

УДК 567.456

## ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ ПОЛУЧЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРОВЫХ ВТУЛОК

**Исмаилов Н. Ш.**, д.т.н., профессор Азербайджанской государственной морской академии (г. Баку, Азербайджанская Республика), e-mail: akademiya@acsc.az

**Исмаилов А. Р.**, асистент Азербайджанской государственной морской академии (г. Баку, Азербайджанская Республика), e-mail: akademiya@acsc.az

**Мамедов Э. Д.**, асистент Азербайджанской государственной морской академии (г. Баку, Азербайджанская Республика), e-mail: akademiya@acsc.az

*Рассмотрены некоторые аспекты повышения эффективности процессов теплообмена судовых двигателей. Установлено, что с увеличением индикаторной работы наблюдается рост эффективности двигателя при неизменном уровне внутренних потерь.*

*Определено, что увеличение термического сопротивления теплопередачи при равенстве передаваемого в охлаждение количества теплоты и других факторов теплообмена требует увеличения температурного напора между тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностями цилиндра за счёт нового значения температуры тепловоспринимающей поверхности.*

*Увеличение температуры тепловоспринимающей стенки при возросшем температурном напоре возможно только за счёт увеличения температуры газа в цилиндре. Увеличение температуры газа приводит к возрастанию его теплосодержания, что повышает работоспособность газа за счёт роста давления в цилиндре.*

*Снижения неполноты сгорания топлива и повышения температуры внутрицилиндровых процессов создает условия для повышения эффективности процессов теплообмена судовых двигателей. Показан положительный эффект предложенных конструктивных решений и их аддитивной технологической реализации.*

**Ключевые слова:** процессы теплообмена, судовые двигатели, индикаторная работа, внутренние потери, конструктивные решения, аддитивные технологии.

**Введение.** Поршневые двигатели внутреннего сгорания являются одними из самых конструктивно-технологически сложных машин. Элементы этих машин, в том числе цилиндрические втулки, головки цилиндров и поршни, работают в экстремальных условиях [1, 2].

Их работа зависит от выбора конструктивных материалов и размеров деталей, температуры и давления рабочего тела, условий теплопередачи и теплообмена и ряда других факторов. Такое разнообразие факторов создает определённые трудности, действие которых наиболее эффективно проявляется в тех или иных условиях [3, 4].

Например, цилиндрическая втулка для обеспечения функциональных характеристик должна иметь определённые физико-механические свойства. Различные поверхности цилиндрической втулки должны иметь следующие физико-механические свойства. На рис. 1 приведена схема положения цилиндрической втулки, установленной в блок двигателя, который:

- 1) поверхность 5 подвергается интенсивному трению и воспринимает высокое давление и температуру газа и поэтому должна иметь малый коэффициент трения, высокую износостойкость, прочность и жаропрочность;
- 2) поверхность 6 интенсивно омывается водой системы охлаждения, на этой поверхности образуются очаги коррозионного и кавитационного разрушения;
- 3) тело цилиндрической втулки 2 обеспечивает теплоотвод газов и сил трения, но вместе с ним тело втулки должно иметь значительное термическое сопротивление.

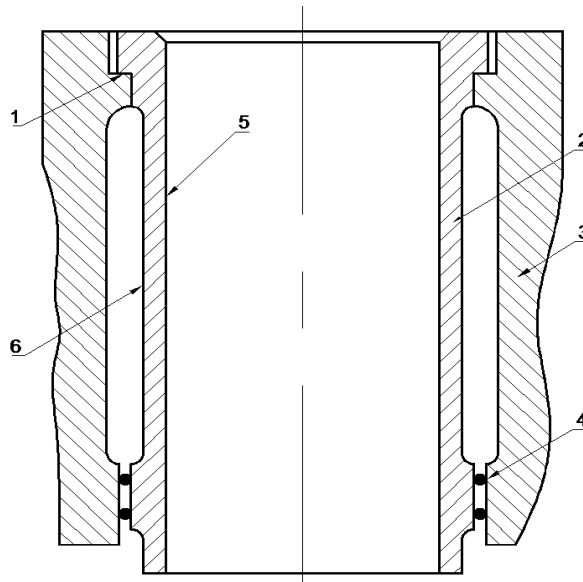


Рисунок 1 – Положение цилиндрической втулки в блоке двигателя:

1 – опорный буртик; 2 – втулка цилиндрическая; 3 – блок цилиндра; 4 – кольцевые прокладки; 5 – рабочая поверхность; 6 – поверхность охлаждения

Наиболее распространёнными конструкционными материалами для цилиндрических втулок высоко- и среднеоборотных дизелей является серые чугуны марок СЧ20÷СЧ 30 (ГОСТ 4832-95) [5, 6].

Установлено, что указанные серые чугуны отвечают требованиям пункта а), но пунктам б) и в) они мало соответствуют. Пункту б) отвечает литейная сталь и биметаллические цилиндрические втулки [6, 7].

Что касается пункту в), то коэффициенты теплопроводности стали и чугуна близки, т.е.  $\lambda=50$  Вт/м-град. Поэтому чугунно-стальная стенка цилиндрической втулки не имеет преимуществ перед чугунной [7, 8]. Следовательно, стенку цилиндрической втулки можно делать многослойной, наружный слой – сталь, промежуточный – термоизолятор, внутренний – модифицированный чугун [8, 9].

**Целью работы** является повышения эффективности процессов теплообмена судовых двигателей за счет снижения неполноты сгорания топлива и повышения температуры внутрицилиндровых процессов.

**Решение задачи.** Схема изготовления такой цилиндрической втулки методом центробежного литья представлена на рис. 2. Сначала в изложницу 1 заливается литейная сталь 25Л (ГОСТ 997-98).

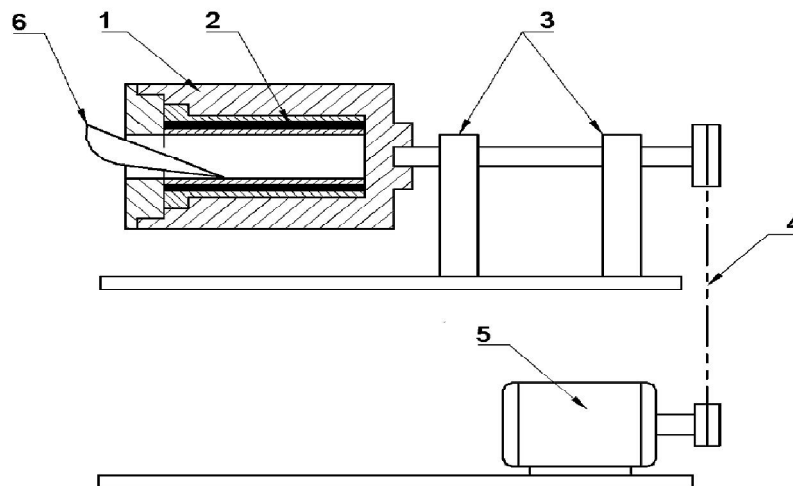


Рисунок 2 – Схема центробежного литья заготовки втулки:

1 – изложница; 2 – отливка; 3 – опоры; 4 – механическая передача; 5 – электродвигатель; 6 – желоб

После начала кристаллизации на внутреннюю поверхность наносится 0,3÷0,4 мм слой двуокись циркония –  $ZrO_2$  с  $\lambda=2\div3$  Вт/м·град. Нанесение термоизолятора может быть произведено посредством лазерного (SLA-технология), плазменного напыления или насыпным способом. Следующим в изложницу заливается жидкий чугун необходимой толщины.

Увеличение термического сопротивления стенки втулки приведёт к возрастанию температурного напора за счёт увеличения температуры тепловоспринимающей стенки при неизменной температуре теплоотдающей стенки.

Предлагаемую конструкцию втулки можно рассматривать в виде многослойной трубы, где  $d_1$  – внутренний диаметр трубы,  $d^*$  – внутренний диаметр термоизоляционного слоя,  $d^{**}$  – внешний диаметр термоизоляционного слоя,  $d_2$  – внешний диаметр трубы.

Для обычной цилиндрической втулки с параметрами  $d_1$  и  $d_2$ , удельная теплопередача на единицу длины трубы будет [9, 10]:

$$Q = (T_{(d_1)} - T_{(d_2)}) / [1/(\pi d_1 \alpha_1) + (\ln d_2 / d_1) / (2\lambda\pi) + 1/(\pi d_2 \alpha_2)], \text{ Вт/м}, \quad (1)$$

где  $T_{(d_1)}$  и  $T_{(d_2)}$  – соответственно, температуры внутренней и внешней стенок втулки, град;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – соответственно коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке ( $d_1$ ) и от стенки ( $d_2$ ) к охлаждающей воде, Вт/(м<sup>2</sup>·град).

В свою очередь, для многослойной стенки (рис. 2) удельная теплопередача будет выражаться как:

$$Q = (T_{(d_1)} - T_{(d_2)}) / [1/(\pi d_1 \alpha_1) + \Sigma R_{тр} + 1/(\pi d_2 \alpha_2)], \text{ Вт/м}, \quad (2)$$

где  $\Sigma R_{тр}$  – суммарное термическое сопротивление стенки трубы, град/(Вт м<sup>2</sup>), значение которого определяется из формулы:

$$\Sigma R_{тр} = (\ln d^* / d_1) / (2\lambda\pi) + (\ln d^{**} / d^*) / (2\lambda_{из}\pi) + (\ln d_2 / d^{**}) / (2\lambda\pi), \quad (3)$$

где  $\lambda$  и  $\lambda_{из}$  – соответственно коэффициенты теплопроводности материала втулки (чугуна или стали) и теплоизолятора (двуокись циркония), Вт/(м·град).

Уравнениями 1 и 2 можно определить количества тепла, прошедшим через однослойную и многослойную стенки трубы. Для стенок труб небольшой толщины, т. е.  $(d_2 - d_1) / 2 \ll d_1$ , расчёт теплопередачи можно проводить по формуле плоской стенки [4]:

$$Q = (T_{(d_1)} - T_{(d_2)}) / (1/\alpha_1 + \Sigma R_{тр} + 1/\alpha_2), \text{ Вт/м}. \quad (4)$$

$\Sigma R_{тр}$  в этом случае определяется как  $\Sigma R_{тр} = \Sigma (\delta_i / \lambda_i)$ , где  $\delta$  и  $\lambda$  толщины (м) и коэффициенты теплопроводности материалов (Вт/м град) слоёв стенки.

Для стабильного режима работы двигателя с цилиндрическими втулками по рис. 1 и рис. 2 теплопередача будет одинаковой, т.е. значения  $Q$  по формулам 1 и 2 будут равны. Будут также равны коэффициенты теплоотдачи со стороны газов и со стороны охлаждения, т.к. скоростные режимы движения газа в цилиндре и теплоносителя в рубашке охлаждения не изменятся.

Также не изменится температура стенки цилиндра со стороны охлаждения, т.к. количество передаваемой в охлаждение теплоты останется прежним, т.е. будут соблюдаться условия,

$$Q, T_{d_2}, \alpha_1, \alpha_2, \lambda = \text{const}. \quad (5)$$

Таким образом, увеличение термического сопротивления теплопередачи (формулы 2, 3), при равенстве передаваемого в охлаждение количества теплоты и других факторов теплообмена (условия 5) требует для обеспечения тождества уравнений 1 и 2 увеличения температурного напора между тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностями цилиндра за счёт нового значения температуры тепловоспринимающей поверхности  $T_{(d_{1нов})} > T_{(d_1)}$ .

Рассмотрим структуру внутреннего теплового баланса двигателя,

$$Q_{\text{расп}} = Q_i + Q_r + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{пот}} \quad (6)$$

где  $Q_{\text{расп}}$  – располагаемая теплота, эквивалентная теплоте, введенной в цилиндр с топливом;  $Q_i$  – индикаторная теплота, эквивалентная индикаторной работе газов в цилиндре;  $Q_r$  – теплота, отведенная из цилиндра с отработавшими газами;  $Q_{\text{охл}}$  – теплота, отведенная в систему охлаждения;  $Q_{\text{пот}}$  – потерянная теплота, вследствие неполноты сгорания топлива.

Увеличение температуры тепловоспринимающей стенки при возросшем температурном напоре возможно только за счёт увеличения температуры газа в цилиндре.

Увеличение температуры газа приводит к возрастанию его теплосодержания, что повышает работоспособность газа за счёт роста давления в цилиндре. Следовательно, имеет место увеличение индикаторной работы и, как следствие, увеличение индикаторного к.п.д.:

$$\eta_i = Q_i / Q_{\text{расп}}$$

**Заключение.** Таким образом, увеличение индикаторного КПД влечёт за собой рост эффективного КПД при неизменном уровне внутренних потерь двигателя. Баланс сохраняется ввиду снижения потерь теплоты в цилиндре из-за уменьшения степени неполноты сгорания топлива, что явилось следствием повышения температуры внутрицилиндровых процессов. Это является положительным эффектом предложенных конструкционных решений и их аддитивной технологической реализации.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баева Л.С. Современные технологии аддитивного изготовления объектов / Л. С. Баева, А. А. Маринин // Вестник МГТУ. – 2014. – Том 17, № 1. – С. 7–12.
2. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутылина. – Санкт-Петербург : СПбГУ, 2013. – 221 с.
3. Абачараев М. М. Кавитация и защита металлов от кавитационных разрушений / М. М. Абачараев. – Санкт-Петербург : СПбПУ, 2012. – 198 с.
4. Беккер Р. Теория теплоты / Р. Беккер. – М. : Энергия, 2014. – 504 с.
5. Создание и развитие научных основ и технологий получения биметаллических отливок на основе железоуглеродистых сплавов. // Обзор. Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины. – К., 2012. – 34 с.
6. Патент Беларуси № 13168. Способ получения двухслойных заготовок. Опубликовано 30.04.2010.
7. Патент РФ № 322Д19. Способ получения биметаллических отливок, 2010.
8. Новрузов Г. Д. Ресурсосберегающая технология получения биметаллических заготовок / Г. Д. Новрузов // Ученые записки АзТУ. – Баку, 2012. – № 4. – С. 56–62.
9. Исмаилов Н. Ш. Исследование теплофизических свойств биметаллических отливок / Н. Ш. Исмаилов // Ученые записки АзТУ. – Баку, 2010. – № 3. – С. 34–40.
10. Биметаллические цилиндрические втулки. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www. ideasandmoney.ru/Ntrr/Details/117390](http://www.ideasandmoney.ru/Ntrr/Details/117390)

## REFERENCES

1. Baeva L.S. Sovremenniye tekhnologii additivnogo izgotovleniya objhektov / L. S. Baeva, A. A. Marinin // Vestnik MGTU. – 2014. – Tom 17, № 1. – S. 7–12.
2. Zlenko M. A. Additivniye tekhnologii v mashinostroenii / M. A. Zlenko, A. A. Popovich, I. N. Mutihlina. – Sankt-Peterburg : SPbGU, 2013. – 221 s.
3. Abacharaev M. M. Kavitatsiya i zathita metallov ot kavitacionnihkh razrusheniy / M. M. Abacharaev. – Sankt-Peterburg : SPbPU, 2012. – 198 s.
4. Bekker R. Teoriya teplotih / R. Bekker. – M. : Ehnergiya, 2014. – 504 s.

5. Sozдание i razvitie nauchnikhkh osnov i tekhnologiyj polucheniya bimetallicheskih otlivok na osnove zhelezouglerodistihkh splavov. // Obzor. Fiziko-tekhnologicheskij institut metallov i splavov NAN Ukrainih. – K., 2012. – 34 s.

6. Patent Belarusi № 13168. Sposob polucheniya dvukhsloyjnihkh zagotovok. Opublikovan 30.04.2010.

7. Patent RF № 322D19. Sposob polucheniya bimetallicheskih otlivok, 2010.

8. Novruzov G. D. Resursosberegayuthaya tekhnologiya polucheniya bimetallicheskih zagotovok / G. D. Novruzov // Ucheniye zapiski AzTU. – Baku, 2012. – № 4. – S. 56–62.

9. Ismailov N. Sh. Issledovanie teplofizicheskikh svoystv bimetallicheskih otlivok / N. Sh. Ismailov // Ucheniye zapiski AzTU. – Baku, 2010. – № 3. – S. 34–40.

10. Bimetallicheskie cilindrovihe vtulki. [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupa : [www.ideasandmoney.ru/Ntrr/Details/117390](http://www.ideasandmoney.ru/Ntrr/Details/117390)

**Ізмаїлов Н. Ш., Ісмаїлов А. Р., Мамедод Е. Д. ВПРОВАДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ МОРСЬКИХ ДВИГУНИХ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БІМЕТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРОВИХ ВТУЛОК**

*Розглянуто деякі аспекти підвищення ефективності процесів теплообміну суднових двигунів. Встановлено, що зі збільшенням індикаторної роботи спостерігається зростання ефективності двигуна при незмінному рівні внутрішніх втрат.*

*Визначено, що збільшення термічного опору теплопередачі за однакової кількості переданої для охолодження кількості теплоти і інших чинників теплообміну вимагатиме збільшення температурного напору між теплосприймаючою та тепловідбиваючою поверхнями циліндра за рахунок нового значення температури теплосприймаючої поверхні.*

*Збільшення температури теплосприймаючої стінки при збільшеному температурному напорі можливо тільки за рахунок збільшення температури газу в циліндрі. Збільшення температури газу призводить до зростання його тепловмісту, що підвищує працездатність газу за рахунок зростання тиску в циліндрі.*

*Зниження неповноти згоряння палива і підвищення температури внутрішньоциліндрових процесів створює умови для підвищення ефективності процесів теплообміну суднових двигунів. Показаний позитивний ефект запропонованих конструктивних рішень і їх адитивної технологічної реалізації.*

**Ключові слова:** процеси теплообміну, суднові двигуни, індикаторна робота, внутрішні втрати, конструкційні рішення, адитивні технології.

**Ismailov N. Sh., Ismailov A. R., Mammadod E. D. IMPROVING THE EFFICIENCY OF HEAT EXCHANGE PROCESSES OF MARINE ENGINES BY OBTAINING BIMETALLIC BUSHINGS CYLINDER**

*Considered some aspects of improving the efficiency of heat exchange processes in marine engines. Found that with the exception of indicator work took him there has been an increase in the efficiency of the engine at a constant level of internal losses.*

*Determined that an increase in the thermal resistance of the heat re villas, with equal passed cooling heat cooperation Coley and other factors will require an increase in temperature of heat transfer between heat flow and heat-transfer receptive surfaces of the cylinder due to new knowledge ensuring surface temperature.*

*The wall temperature is increased with increased thermal head is only possible at the expense of increasing the gas temperature in the cylinder. Increasing the gas temperature leads to ascending its heat content that increases efficiency of gas due to the growth of pressure in the cylinder.*

*Incomplete combustion of fuel reduction and increase the temperature of the processes creates conditions for increase of effectiveness of processes of heat exchange of ship engines. Shows the positive effect of the proposed structural decision and their additive technology implementation.*

**Keywords:** heat transfer processes, marine engines, display work, internal losses, design decisions, additive technology

© Ісмаїлов Н. Ш., Ісмаїлов А. Р., Мамедод Е. Д.

Статтю прийнято  
до редакції 17.07.16