



Estimation of comparative efficiency of air cooling of bimetallic and monometallic cylinder sleeves is run.

Г. А. АНИСОВИЧ, Отделение физико-технических наук НАН Беларуси,
А. М. БОДЯКО, С. В. ГАЛАГАЕВ, И. А. МЕЛЬНИКОВ, ИТМ НАН Беларуси,
В. А. СОКОЛОВСКИЙ, Борисовский завод агрегатов

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ

УДК 621.43.031.3:536.24

Двигатели с воздушным охлаждением широко применяются в самых различных областях техники. Цилиндры для них изготавливают из чугуна, стали или алюминиевого сплава. Большинство цилиндров производят из специального серого чугуна, так как он обладает высокой износостойкостью, хорошими технологическими свойствами, достаточной теплопроводностью и в то же время принадлежит к числу дешевых черных металлов. Основная трудность при изготовлении цилиндров с ребристой рубашкой воздушного охлаждения заключается в том, что при литье необходимо обеспечить хорошую заполняемость тонких и протяженных ребер, а также формирование мелкозернистой и износостойкой структуры на рабочей поверхности гильз. Для качественной заливки ребер чугун должен иметь хорошую жидкотекучесть, чем обладают сплавы, близкие к эвтектическим. Однако такие сплавы склонны к формированию ферритной матрицы, что снижает износостойкость гильз. Помимо этого, серый чугун является хрупким материалом, что в условиях эксплуатации часто приводит к поломке ребер рубашки охлаждения. Достоинство алюминиевого сплава как цилиндрического материала — высокая теплопроводность. Существенным недостатком является резкое падение механической прочности при повышении температуры выше 1500°C. Кроме того, для придания износостойкости, а также во избежание задигов при пуске двигателя и работе в условиях низких температур рабочая поверхность такого цилиндра должна иметь специальное покрытие [1]. Для того чтобы избежать недостатков, которые присущи цилиндрам из чугуна и алюминия, применяют биметаллические цилиндры, состоящие из чугунной втулки, на которую залита алюминиевая ребристая рубашка. В таких конструкциях сочетаются высокая износостойкость материала гильзы с повышенной теплопроводностью материала ребристой рубашки охлаждения. Конструкция биметаллических цилиндров с воздушным охлаждением может применяться не только для двигателей внутреннего сгорания, но и для компрессоров.

На Борисовском заводе агрегатов при организации производства пневмокомпрессоров с воздушным охлаждением для тракторов "Беларус" взамен получаемых ранее из Украины одним из самых острых был вопрос производства цилиндров. Компрессоры, производимые на Украине, комплектовались чугунными ребристыми цилиндрами, однако они не в полной мере удовлетворяли условиям эксплуатации по износостойкости и эффективности охлаждения. Для решения проблемы была принята конструкция биметаллического цилиндра, состоящего из износостойкой чугунной втулки, получаемой методом литья намораживанием, и ребристой алюминиевой рубашки, заливаемой на чугунную вставку под давлением. Оценку эффективности воздушного охлаждения биметаллического цилиндра в зависимости от соотношения толщин чугунной и алюминиевой составляющих его стенки проводили на основании специальных тепловых расчетов.

Сначала рассмотрим теплопередачу через монометаллическую тонкую цилиндрическую стенку (рис. 1, а). Принимая во внимание, что температура на внутренней поверхности цилиндра (T_1) изменяется циклически с достаточно высокой частотой (скорость вращения коленвала компрессора 1350 мин⁻¹), процесс теплопередачи через стенку гильзы можно считать квазистационарным. Амплитуда колебаний температуры будет уменьшаться с удалением от внутренней поверхности стенки за счет теплоемкости ее материала. Поэтому для анализа теплообмена на охлаждаемой поверхности гильзы можно применять простые зависимости стационарной теплопроводности, а в качестве T_1 использовать среднее за цикл значение температуры.

При $T_1 = \text{const}$ интенсивность теплообмена можно приближенно определить по величине критерия Би:

$$Bi = \frac{\alpha X}{\lambda}, \quad (1)$$

где α — коэффициент теплоотдачи на охлаждаемой поверхности; X — толщина стенки цилиндра; λ — коэффициент теплопроводности.

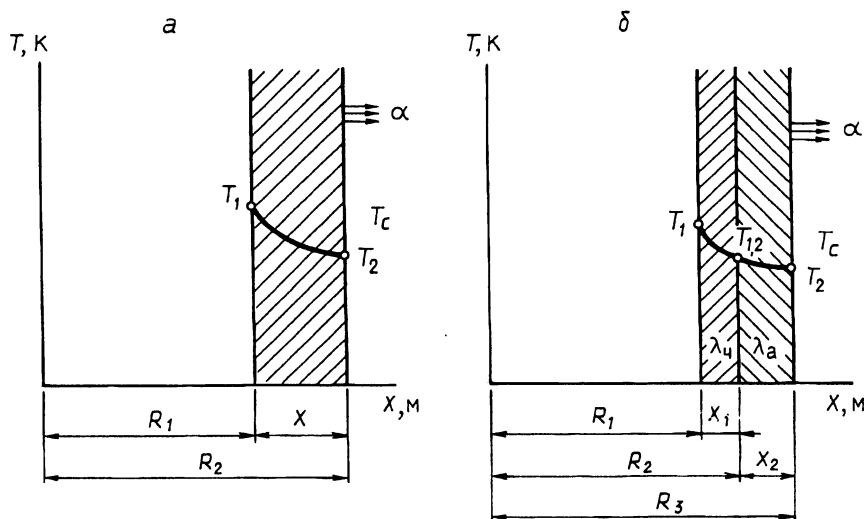


Рис. 1. Схема распределения температуры: *a* — однослойная цилиндрическая стенка; *б* — биметаллическая (чугун — алюминий)

В нашем случае толщина стенки цилиндра $X=11$ мм, коэффициент теплоотдачи в условиях свободной конвекции в воздушной среде с учетом колебаний и вибрации принимаем $\alpha \approx 20$ Вт/(м²·К). Для чугуна гильзового состава при 100°С (что близко к средней температуре стенки гильзы пневмокомпрессора) принимаем $\lambda_{\text{ч}} = 38,8$ Вт/(м·К), а для алюминий-кремниевого сплава типа АЛ10 $\lambda_{\text{А}} = 155$ Вт/(м·К) [2]. После подстановки численных значений в (1) получаем

$$Bi = \frac{20 \cdot 11 \cdot 10^{-3}}{38,8} = 0,00567, \quad Bi \ll 1. \quad (2)$$

Оребрение, существенно увеличивая эффективную наружную поверхность гильзы, соответственно повышает теплоотдачу в окружающую среду. В расчетах этот эффект можно достаточно просто учесть за счет соответствующего увеличения значения коэффициента теплоотдачи α . Оребрение цилиндра пневмокомпрессора увеличивает площадь наружной поверхности примерно в 11 раз, поэтому принимаем $\alpha \approx 200$ Вт/(м²·К). Оценим предельное значение величины Bi для случая воздушного охлаждения без искусственной вентиляции. Как следует из (2), при указанном значении α оно не превысит 0,06, что тоже существенно меньше 1. Это значит, что на практике перепад температуры между внутренней и внешней поверхностями цилиндра пневмокомпрессора имеет незначительную величину как при использовании чугуна, так и сплава АЛ10. Для более точной оценки сделаем расчет.

Количество теплоты, переданное через цилиндрическую стенку для стационарного режима, можно определить из уравнения [3]

$$Q = \frac{L t (T_1 - T_2)}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (3)$$

а плотность теплового потока из уравнения

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{X}{2\pi\lambda} \ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (4)$$

где t — время; T_2 — температура наружной охлаждаемой поверхности; L — длина цилиндра; R_1 , R_2 — внутренний и наружный радиусы цилиндра.

Этот тепловой поток отдается окружающей среде за счет конвекции:

$$q = \alpha(T_2 - T_c). \quad (5)$$

Здесь T_c — температура окружающей среды.

Из равенства левых частей уравнений (2) и (3) имеем

$$\frac{T_1 - T_2}{\frac{X}{2\pi\lambda} \ln \frac{R_2}{R_1}} = \alpha(T_2 - T_c). \quad (6)$$

Откуда температура наружной стенки

$$T_2 = \frac{2\pi\lambda T_1 + \alpha X \ln \frac{R_2}{R_1} T_c}{2\pi\lambda + \alpha X \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (7)$$

Подставляя в (7) значения величин при $T_1 = 80 + 273 = 353$ К и $T_c = 20 + 273 = 293$ К, имеем: для чугуна

$$T_{2ч} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 38,8 \cdot 353 + 20 \cdot 11 \cdot 10^{-3} \ln \frac{41 \cdot 10^{-3}}{36 \cdot 10^{-3}} \cdot 293}{2 \cdot 3,14 \cdot 38,8 + 20 \cdot 11 \cdot 10^{-3} \ln \frac{41 \cdot 10^{-3}}{36 \cdot 10^{-3}}} = 352,988 \text{ К}; \quad (8)$$

для алюминия

$$T_{2А} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 169 \cdot 353 + 20 \cdot 11 \cdot 10^{-3} \ln \frac{41 \cdot 10^{-3}}{36 \cdot 10^{-3}} \cdot 293}{2 \cdot 3,14 \cdot 169 + 20 \cdot 11 \cdot 10^{-3} \ln \frac{41 \cdot 10^{-3}}{36 \cdot 10^{-3}}} = 352,997 \text{ К}. \quad (9)$$

Приведенные расчеты показывают, что при данной толщине стенки цилиндра, равной 11 мм, перепад температур между внутренней и наружной стенкой практически не зависит от материала, поэтому, анализируя формулу (4), приходим к выводу, что плотность теплового потока определяется лишь коэффициентом теплопроводности материала и толщиной стенки цилиндра. Тогда, полагая геометрические размеры чугунной и алюминиевой гильз одинаковыми, из (4) получаем, что отношение удельных тепловых потоков на охлаждаемых поверхностях пропорционально отношению коэффициентов теплопроводности этих материалов:

$$\frac{q_A}{q_ч} = \frac{T_{1A} - T_{2A}}{\frac{X}{2\pi\lambda_A} \ln \frac{R_2}{R_1}} \cdot \frac{\frac{X}{2\pi\lambda_ч} \ln \frac{R_2}{R_1}}{T_{1ч} - T_{2ч}} = \frac{\lambda_A}{\lambda_ч}. \quad (10)$$

Подставляя численные значения в (10), получаем, что охлаждение гильзы цилиндра из алюминиевого сплава происходит в среднем в 4,4 раза интенсивнее, чем из чугуна.

Теперь рассмотрим процессы теплопроводности для биметаллического цилиндра (рис. 1, б). Запишем уравнения для расчета значений температуры в контакте чугунного и алюминиевого слоев ($T_{1,2}$ и $T_{2,1}$) и на охлаждаемой поверхности гильзы цилиндра:

$$T_{1,2} = T_1 - \frac{qX_1 \ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi\lambda_A}, \quad (11)$$

$$T_2 = T_{2,1} - \frac{qX_2 \ln \frac{R_3}{R_2}}{2\pi\lambda_ч}. \quad (12)$$

Из уравнений (11), (12) видно, что наклон касательных для кривых распределения температуры в составляющих биметаллической стенки определяется в основном коэффициентами теплопроводности чугуна и алюминиевого сплава, причем более острый угол наклона имеет кривая распределения температур для чугунной стенки, потому что $\lambda_ч < \lambda_A$.

В определенных случаях между соприкасаемыми поверхностями могут быть полости, заполненные инородной средой, например, воздухом или оксидами, теплопроводность которых отличается от основного материала слоев и может служить причиной дополнительного термического сопротивления, так называемого контактного сопротивления, которое в ряде случаев может составлять заметную часть полного сопротивления теплопроводящей среды. Однако, учитывая, что чугунная вставка, согласно применяемой технологии, обрабатывается без использования охлаждающих жидкостей, что исключает образование оксидов и заливается сплавом алюминия под давлением, коэффициент линейного расширения которого выше, чем чугуна, что способствует при усадке более плотному обжатю заливаемой втулки, то контакт между слоями считаем совершенным и, следовательно, $T_{1,2} = T_{2,1}$.

Тогда удельный тепловой поток для биметаллического цилиндра (q_b) определим по формуле [3]:

$$q_B = \frac{T_1 - T_2}{\frac{X_1}{2\pi\lambda_{\text{ч}}} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{X_2}{2\pi\lambda_A} \ln \frac{R_3}{R_2}} \quad (13)$$

Так как в нашем случае внешний и внутренний радиусы цилиндра намного больше толщины стенки, то $\ln \frac{R_2}{R_1} = \ln \frac{R_3}{R_2}$. С учетом этого находим отношения удельных тепловых потоков биметаллического цилиндра (q_B) и сплошного чугунного ($q_{\text{ч}}$):

$$\frac{q_B}{q_{\text{ч}}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{X_1}{2\pi\lambda_{\text{ч}}} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{X_2}{2\pi\lambda_A} \ln \frac{R_3}{R_2}} \cdot \frac{2\pi\lambda_{\text{ч}} \ln \frac{R_2}{R_1}}{T_1 - T_2} = \frac{X}{X_1 + \frac{\lambda_{\text{ч}}}{\lambda_A} X_2} \quad (14)$$

С практической точки зрения полученную зависимость удобнее представить в виде коэффициента эффективности (K_3) охлаждения биметаллического цилиндра в сравнении с чугунным в зависимости от толщины чугунной вставки X_1 :

$$K_3 = \frac{X}{X_1 + \frac{\lambda_{\text{ч}}}{\lambda_A} X_2} = \frac{X}{X_1 + \frac{\lambda_{\text{ч}}}{\lambda_A} (X - X_1)} \quad (15)$$

Таким образом, при конструировании биметаллических цилиндров с воздушным охлаждением можно, пользуясь выражением (15) или рис. 2, оценить эффективность их охлаждения в сравнении с монометаллическими чугунными.

При разработке конструкции биметаллического цилиндра с целью применения его вместо чугунного на пневмокомпрессорах тракторов "Беларус" толщина стенки вставки из чугуна гильзового состава принята равной 5 мм (рис. 3). Это обеспечивает достаточную прочность конструкции, повышает износостойкость цилиндра и более чем в 1,5 раза увеличивает эффективность его охлаждения по сравнению с применявшимися ранее чугунными.

Производство литых заготовок для чугунных вставок биметаллических цилиндров и их предварительная механическая обработка налажены на опытно-экспериментальной базе ИТМ НАН Беларуси. В целях повышения сцепляемости и увеличения площади контакта с алюминиевым сплавом наружную поверхность чугунных вставок при обработке выполняем профильной по типу скругленной резьбы. Предварительно обработанные чугунные вставки заливают сплавом АЛ10 на Минском моторном заводе на машинах литья под давлением. Чистовую расточку, хонингование цилиндров и сборку компрессоров производят на Борисовском заводе агрегатов. Ежемесячно для потребностей сборочного конвейера БЗА поставляется 3—4 тыс. заготовок гильз, которые получают методом непрерывно-циклического литья намораживанием.

Литература

1. Поспелов Д. Р. Конструкция двигателей внутреннего сгорания с воздушным охлаждением. М.: Машиностроение, 1973.
2. Конструкционные материалы: Справ. / Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше и др.; Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990.
3. Вейн и К. А. И. Тепловые основы теории литья. М.: Машгиз, 1953.

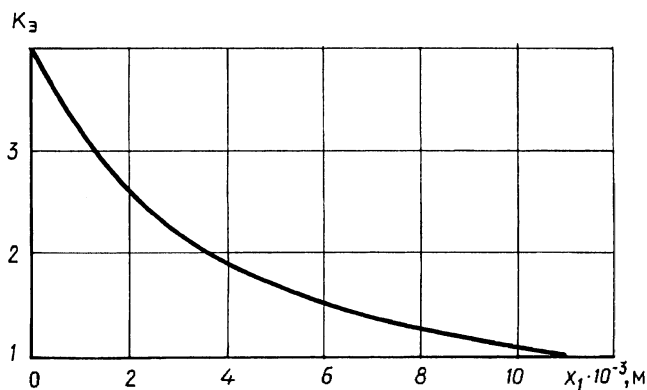


Рис. 2. Зависимость коэффициента эффективности охлаждения биметаллического цилиндра от толщины чугунной вставки

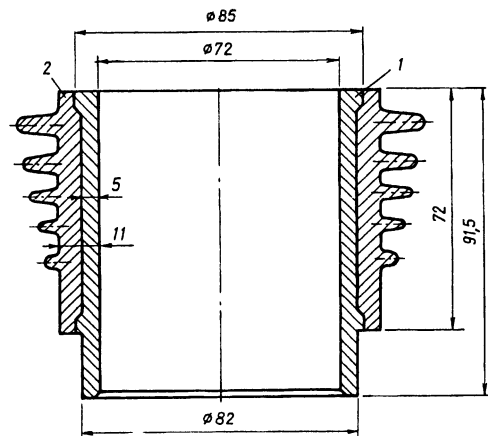


Рис. 3. Биметаллический цилиндр пневмокомпрессора трактора "Беларус": 1 — чугунная вставка; 2 — алюминиевая рубашка