

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.43

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ СБОРКИ НИРЕЗИСТОВОЙ ВСТАВКИ С ГАЛЕРЕЕЙ МАСЛЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПОРШНЯ

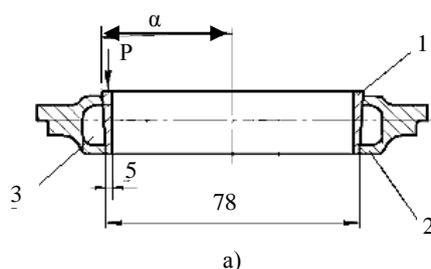
*д-р техн. наук А.Т. ВОЛОЧКО, А.Ю. ИЗОБЕЛЛО*  
(ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск);  
*канд. техн. наук В.А. КЛУШИН*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Исследовано напряженно-деформированное состояние сборочной единицы охлаждающего канала поршня двигателя внутреннего сгорания в условиях упругой и пластической деформации при тепловой сборке с различными натягами колец, изготовленных из высоколегированного чугуна марки ЧН15Д7 (нирезиста) и стали 40Х. Предложен новый способ формирования охлаждающего канала циркуляционного охлаждения поршня двигателя. Суть способа заключается в тепловой сборке двух колец посредством помещения ненагретого внутреннего кольца в нагретое наружное.*

Резервы дальнейшего повышения характеристик двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с использованием традиционных схем и материалов в значительной мере исчерпаны. При этом повышение агрегатной мощности, эксплуатационной экономии по топливу и маслу, улучшение экологических характеристик (снижение токсичности, шумности), повышение ресурса и надежности ДВС связано с интенсификацией, совершенствованием и оптимизацией параметров их работы ДВС. В связи с этим встает проблема принудительного охлаждения поршня. Из известных способов охлаждения наиболее перспективным является циркуляционное (галерейное) охлаждение.

Существует множество конструкторских решений организации галерейного охлаждения поршня, но большинство из них требуют специальных и достаточно трудоемких операций (вымывание соляных стержней при организации безоболочковой камеры охлаждения, применение электронно-лучевой сварки для соединения вставки под поршневое кольцо с полостью тороидального профиля и т.д.).

В данной статье рассматривается простой в изготовлении и надежный в использовании способ формирования охлаждающего канала в алюминиевых поршнях ДВС, который образуют в сборочных единицах (рис. 1), полученных тепловой сборкой двух сопрягаемых деталей: вставки 2, выполненной из высоколегированного чугуна марки ЧН15Д7 (нирезиста), и кольца-заглушки 1 из стали 40Х.



б)



в)

Рис. 1. Сборочная единица поршня ДВС с каналом охлаждения, выполненная посредством тепловой сборки деталей из нирезиста:  
а – чертеж сборочной единицы; б – экспериментальные образцы сборочных единиц;  
в – сборочная единица, залитая в поршень

В дальнейшем в соответствии с известной технологией [1] сборочную единицу подвергают дробеструйной очистке, алитированию и затем помещают в кокиль в качестве армирующей составляющей для последующего получения алюминиевой отливки поршня с каналом для циркуляционного охлаждения.

Цель работы – оптимизация геометрии кольца-заглушки 1, используемого для ее изготовления материала и величины гарантированного натяга, соединяемых деталей, для формирования герметичного охлаждающего канала поршня.

Оптимизацию осуществляли путем исследования (оценки) напряженно-деформированного состояния сборочной единицы поршня, сохраняющей гарантированный натяг по посадочным поверхностям в условиях различного теплового расширения сопрягаемых деталей, выполненных из разных материалов, и неоднородного нагрева, обусловленного процессами алитирования и кокильного литья.

Тепловую сборку предлагаемой конструкции сборочной единицы поршня ДВС (см. рис. 1) осуществляли посредством помещения внутреннего кольца-заглушки 1 в разогретую вставку 2, в которой выполнена полость 3 для масляного охлаждения поршня.

Дробеструйную очистку осуществляли в специальных камерах, а алитирование в металлических расплавах. Алитирование является одним из основных этапов общего технологического процесса получения биметаллических отливок, поскольку именно оно приводит к образованию переходного слоя (альфин-слоя), связывающего чугунную арматуру с алюминиевым сплавом и устраняющего отрыв днища поршня во время эксплуатации. Алитирование – один из видов химико-термической обработки сталей и чугунов, в результате которой поверхностный слой железоуглеродистого сплава насыщается алюминием [1]. В первый момент алитирования образуется соединение  $FeAl_3$ , имеющее наибольшую теплоту образования [1]. Дальнейший рост переходного слоя осуществляется за счет диффузии через слой интерметаллида атомов алюминия. Наряду с продвижением атомов алюминия и образованием слоя  $FeAl_3$  возможны химические реакции с образованием других двойных соединений железа и алюминия ( $Fe_2Al_5$ ,  $FeAl_2$ ,  $FeAl$ ) и даже твердого раствора алюминия в железе.

Для того чтобы кольцо-заглушка 1 не выпало при неоднородном нагреве, натяг при сборке деталей, формирующих охлаждающую полость, должен быть не меньше, чем величина перемещения наружного посадочного радиуса кольца-заглушки 1 при свободном термическом расширении в отсутствие градиента температур. Кроме того, соединение деталей с гарантированным натягом должно удовлетворять требованиям неподвижности соединения и прочности сопрягаемых деталей [2]. Соединение деталей гарантированным натягом осуществляют за счет сил упругости от предварительной деформации механической запрессовки или, как в нашем случае, тепловой сборки. С помощью натяга можно соединять детали как с цилиндрическими, так и с коническими поверхностями.

Цилиндрические соединения  $\alpha = 0^\circ$  (см. рис. 1, а) с натягом просты в изготовлении, обеспечивают хорошее центрирование сопрягаемых деталей, могут воспринимать значительные статические и динамические нагрузки (радиальные и осевые). Недостаток цилиндрических соединений – сложность демонтажа.

Соединение с помощью натяга по коническим поверхностям контакта (рис. 1, а) с углом конуса  $\alpha$ , равным  $3^\circ$ , более сложны в исполнении сопрягаемых деталей.

Величину контактного давления при сборке деталей с гарантированным натягом определяют из условия совместности перемещения сопрягаемых деталей 1 и 2 соединения (см. рис. 1):

$$u_2 - u_1 = \Delta/2, \quad (1)$$

где  $\Delta$  – диаметральный натяг.

Радиальное перемещение деталей 1, 2 соединения определяют по формулам:

$$u_1 = -q\lambda_1; \quad u_2 = q\lambda_2. \quad (2)$$

Здесь  $q$  – контактное давление;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – соответственно коэффициенты радиальной податливости деталей 1 и 2, которые определяют из выражений:

$$\lambda_1 = \frac{c_1 d}{2E_1}; \quad \lambda_2 = \frac{c_2 d}{2E_2}, \quad (3)$$

где  $E_1, E_2$  – модули упругости материалов деталей 1, 2;  $d$  – диаметр посадки;  $c_1, c_2$  – коэффициенты:

$$c_1 = \frac{1 + \left(\frac{d_1}{d}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_1}{d}\right)^2} - \nu_1; \quad c_2 = \frac{1 + \left(\frac{d}{d_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{d}{d_2}\right)^2} + \nu_2, \quad (4)$$

где  $d_1$  – внутренний диаметр охватываемого кольца-заглушки (деталь 1 сборочной единицы);  $d_2$  – наружный диаметр охватывающей вставки (деталь 2 сборочной единицы).

Используя решения (1) – (4), в работе [2] получена формула для определения контактных давлений в сопрягаемых деталях при их соединении с гарантированным натягом:

$$q = \frac{\Delta}{d \left( \frac{c}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right)}$$

Для расчета контактных давлений и напряжений, возникающих в деталях сборочной единицы при тепловой сборке с гарантированным натягом, использовали программу расчета на ПЭВМ 486-DX4-100, базирующуюся на табличном процессоре MS Excel 97 MS Office 97. В деталях сборки определяли радиальные  $\sigma_r$  и тангенциальные  $\sigma_\theta$  напряжения (таблица). Наибольшие напряжения возникают у внутренней поверхности охватываемой детали – вставка 2 (см. рис. 1).

Параметры	Обозначения	Варианты исполнения			
		1	2	3	4
Натяг, создаваемый при посадке, мм	$\Delta$	1,1	0,6	1,1	1,1
Модуль упругости материала кольца-заглушки (сталь 40X), кг/мм <sup>2</sup>	$E_1$	20000	20000	20000	20000
Модуль упругости материала вставки (ЧН15Д7 ГОСТ7769-82), кг/мм <sup>2</sup>	$E_2$	10000	10000	10000	10000
Коэффициенты Пуассона	$\mu$	0,08	0,08	0,08	0,08
Радиус посадки, мм	$r$	40,0	40,0	40,0	40,0
Внутренний радиус кольца-заглушки, мм	$r_1$	37	37	35	33
Толщина кольца-заглушки, мм	$s$	3,0	3,0	5,0	7,0
Наружный радиус вставки, мм	$r_2$	60	60	60	60
Контактное давление, кг/мм <sup>2</sup>	$q$	15,2	8,3	21,5	26,1
Нормальные напряжения в радиальном направлении во вставке, кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_r$	-15,2	-8,3	-21,5	-26,1
Нормальные напряжения в окружном направлении во вставке, кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_\theta$	39,4	21,5	55,8	67,8
Радиальное перемещение внутренней точки поперечного сечения вставки, мм	$u_2$	0,163	0,089	0,230	0,280
Эквивалентное напряжение в опасной точке поперечного сечения вставки, кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{экр}$	54,6	29,8	77,3	93,9
Нормальные напряжения в радиальном направлении кольца заглушки, кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_r$	0	0	0	0
Нормальные напряжения в окружном направлении кольца-заглушки, кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_\theta$	-210,1	-114,6	-183,1	-163,4
Радиальное перемещение внутренней точки поперечного сечения кольца-заглушки, мм	$u_1$	-0,389	-0,212	-0,320	-0,270
Эквивалентное напряжение в опасной точке поперечного сечения кольца-заглушки, кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{экр}$	-210,1	-114,6	-183,1	-163,4
Фактическое значение натяга после завершения тепловой сборки, мм	$\Delta_{факт}$	0,32	0,18	0,00	0,00

Условие отсутствия или наличия пластической деформации в соединяемых деталях сборки определяли путем расчета эквивалентных напряжений в каждой детали и сравнения полученных значений с пределами текучести  $\sigma_T$  для деталей, изготавливаемых из сталей (рис. 2, а), и предела прочности  $\sigma_\sigma$  для деталей, изготавливаемых из нирезиста (рис. 2, б).

$$\sigma_{экр} = \sigma_\theta - \sigma_r.$$

Экспериментальным путем было установлено изменение предела прочности на разрыв и сжатие образцов из нирезиста при различных температурах испытаний (рис. 3).

Установлено, что предел прочности на сжатие образцов в 4...5 раза выше, чем при растяжении.

Анализ результатов расчета напряженно-деформированного состояния кольца заглушки 1 сборочной единицы (см. рис. 1) показал, что тепловая сборка может быть осуществлена в условиях отсутствия пластической деформации и при использовании стального кольца-заглушки диаметром 80 мм и толщиной 3 мм из стали 40X ( $\sigma_T = 80$  кг/мм<sup>2</sup>) только при гарантированном натяге не более 0,4 мм на диаметр. Эквивалентное напряжение в опасной точке поперечного сечения кольца-заглушки при этом будет иметь значение 76,4 кг/мм<sup>2</sup> (вариант исполнения 1, рис. 2, а).

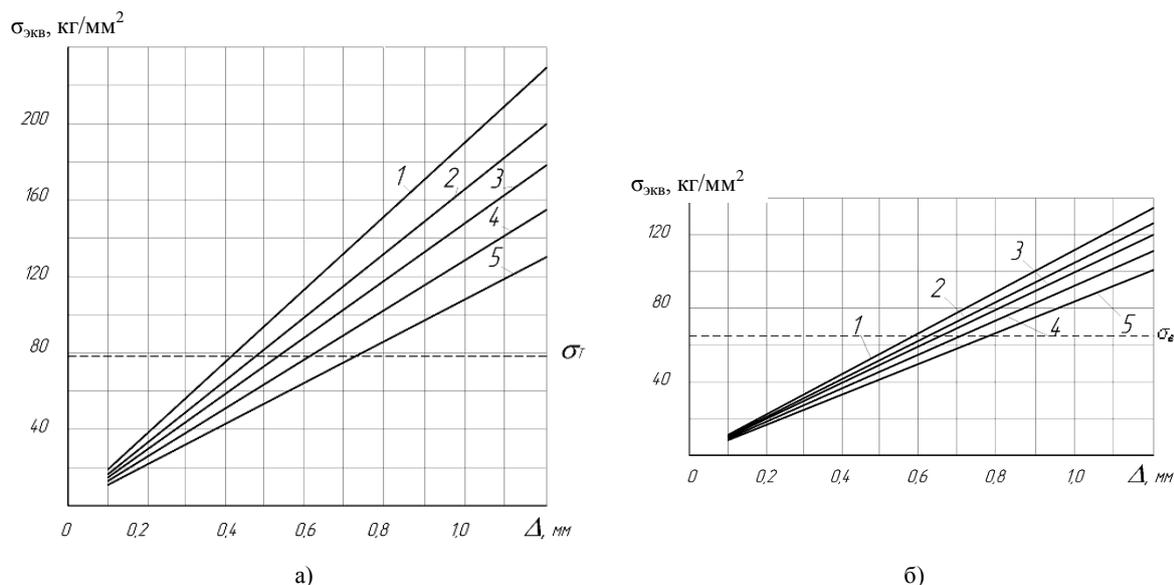


Рис. 2. Зависимость эквивалентных напряжений в кольцо-заглушке от натяга при сборке деталей с различной толщиной стенок (1 – толщина кольца 3 мм; 2 – 5 мм; 3 – 7 мм; 4 – 10 мм; 5 – 15 мм): а – вставка из нирезита, кольцо-заглушка из стали 40X; б – вставка и кольцо-заглушка из нирезита

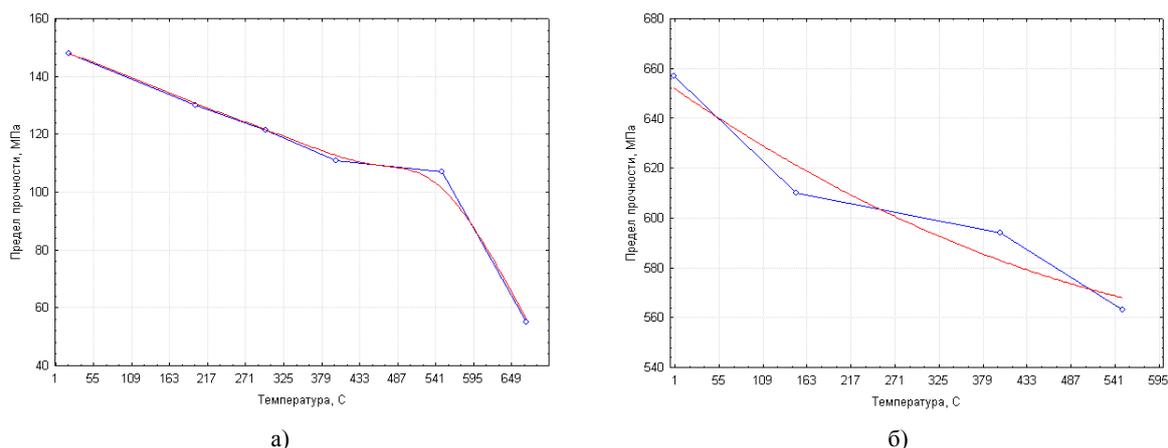


Рис. 3. Графики зависимости предела прочности на растяжение (а) и сжатие (б) образцов из нирезиста при различных температурах

При разогреве деталей сборки натяг в соединении измениться на величину

$$\Delta_T = (D_1\alpha_1 - D_2\alpha_2) \cdot T \quad (5)$$

и станет равным

$$\Delta^* = \Delta - \Delta_T, \quad (6)$$

где  $D_i$  и  $\alpha_i$  – соответственно диаметры посадочных поверхностей и коэффициенты линейного расширения деталей сборки при температуре  $T$  алитирования.

Коэффициент линейного расширения нирезиста при температуре нагрева 800 °C составляет  $18,5 \cdot 10^{-6}$  (деталь 2, см. рис. 1), а стали 40X –  $14,6 \cdot 10^{-6}$  (деталь 1, см. рис. 1);  $D_1 = 80,4$  мм;  $D_2 = 80$  мм.

Используя зависимости (5) и (6), проверим возможность практического использования такого значения гарантированного натяга при сборке в дальнейшем при алитировании сборочной единицы.

$$\Delta_T = (80,4 \cdot 14,6 \cdot 10^{-6} - 80 \cdot 18,5 \cdot 10^{-6}) \cdot 800 = 0,25 \text{ мм}; \quad \Delta^* = 0,4 - 0,25 = 0,15 \text{ мм}.$$

С увеличением толщины стенки стального кольца-заглушки (зависимости 2 – 5, рис. 2, а) гарантированный натяг сборки в условии отсутствия пластической деформации может быть увеличен до 0,6 мм при толщине стенки 10 мм и до 0,7 мм при толщине стенки 15 мм.

Оптимальным вариантом соединения деталей сборки – вставки из нирезита и кольца-заглушки из стали 40Х в условиях отсутствия пластической деформации – следует считать вариант с толщиной кольца-заглушки 10 мм и гарантированным натягом при сборке 0,6 мм, так как при последующей операции алитирования, сопровождающейся нагревом сборочной единицы до температуры 800 °С, натяг уменьшится на 0,3 мм из-за разницы коэффициентов линейного расширения стали и нирезиста. Таким образом, фактический натяг соединения при алитировании и последующем формообразовании поршня кокильным литьем будет равен 0,3 мм, что гарантирует соединение от возможности выпадения кольца-заглушки.

Дальнейшее уменьшение гарантированного натяга может приводить к выпадению кольца-заглушки во время нагрева при алитировании или при кокильном литье поршня, а также к затеканию расплава алюминиевого сплава в канал для охлаждения из-за разности термического расширения сопрягаемых деталей и неоднородность нагрева.

Исследована возможность осуществления сборки путем охлаждения кольца-заглушки в жидком азоте и последующим соединением ее со вставкой. Однако такая сборка не обеспечила требуемого натяга сопрягаемых деталей, так как при диаметре посадочной поверхности кольца-заглушки  $\varnothing 78 \dots 80$  мм за счет охлаждения ее жидким азотом можно добиться уменьшения размера лишь на 0,1 мм.

Экспериментальные исследования соединения деталей, когда и вставку, и кольцо-заглушку изготавливают из нирезита (рис. 2, б), с гарантированными натягами на диаметр 0,6 мм, 0,7 и 0,8 мм показали, что пластическая деформация кольца-заглушки также отсутствует, что объясняется высоким коэффициентом термического расширения материалов и небольшими обжатиями ограниченных по длине посадочных поверхностей. При более высоких значениях натяга при сборке деталей наблюдали разрывы поверхностей контакта кольца-заглушки (предел прочности на сжатие нирезита при температуре 20 °С составил 65,7 кг/мм<sup>2</sup>).

Изготовление кольца-заглушки из нирезиста в свою очередь усложняет технологический процесс ее изготовления из-за отсутствия нужного сортамента труб, поэтому использование для изготовления кольца-заглушки стальных труб является актуальной задачей.

Исследована возможность осуществления соединения деталей 1 и 2, представленных на рисунке 1, тепловой сборкой в условиях пластической деформации. Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния сопрягаемых деталей (вставка выполнена из нирезиста, а кольцо-заглушка – из стали 40Х) при их соединении с гарантированным натягом 1,1 мм (см. таблицу). Поскольку сборка производилась с пластическим деформированием сопрягаемых деталей по поверхностям контакта и нами просчитывались их необратимые радиальные перемещения, то фактическое значение натяга после завершения тепловой сборки изменилось и его следует определять по следующей зависимости:

$$\Delta_{\text{факт.}} = 2 \cdot (\Delta/2 - |u_1| - |u_2|),$$

где  $u_1, u_2$  – радиальные перемещения кольца-заглушки и вставки соответственно.

В случае упругой деформации нирезистовой вставки при расчете фактического натяга радиальное перемещение внутренней точки поперечного сечения вставки не учитывается.

Анализ полученных результатов показывает, что при использовании стального кольца-заглушки диаметром 80 мм и толщиной 3 мм при расчетном натяге 1,1 мм (вариант 1, таблица) можно получить фактический натяг 0,32, тогда как при сборке за счет сил упругости фактический натяг составляет 0,4 мм. При увеличении толщины кольца-заглушки до 5 и 7 мм (варианты 3 и 4, таблица) фактический натяг составит 0 мм на диаметр, что связано с деформацией вставки и кольца-заглушки.

Таким образом, если осуществлять тепловую сборку вставки из нирезиста и кольца-заглушки из стали 40Х в условиях пластической деформации, то оптимальным вариантом следует считать исполнение 1 (таблица 1).

Для обеспечения неподвижности соединения средние (номинальные) контактные давления  $q$  должны быть такими, чтобы силы трения превышали внешние сдвигающие силы, если такие имеют место в процессе заполнения кокиля расплавом и затвердевании отливки поршня.

Рассмотрим, какие внешние нагрузки способно выдержать соединение, показанное на рисунке 1, а, при нагружении его осевой силой.

Допустимое значение внешней сдвигающей силы  $P$  для цилиндрического соединения с натягом с заданными значениями диаметра и длины посадочной поверхности ( $d$  и  $l$ ) можно определить по формуле [2]:

$$P \leq \frac{q_m \mu \pi d l}{k}, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент запаса сцепления, обычно принимают  $k \approx 1,5 \dots 2$ ;  $\mu$  – коэффициент трения.

Из формулы (7) следует, что несущая способность соединения при статических нагрузках определяется средними (номинальными) контактными давлениями. Эти давления зависят от натяга в соединении и условий работы, в том числе температурных.

Кольцо-заглушка, представляет собой тонкостенное кольцо с наружным диаметром  $d = 80$  мм, контактирующее со вставкой по двум площадкам общей длиной  $l = 6$  мм.

Значение коэффициента трения ( $\mu$ ) при тепловой сборке стальных и чугунных деталей принимают 0,07...0,09.

Подставив известные значения параметров посадочной поверхности в формулу (7), получим для нашего соединения  $P \approx 60 q$ .

При осуществлении тепловой сборки вставки и кольца-заглушки из нирезиста в условиях отсутствия пластической деформации соединение может выдержать осевую сдвигающую нагрузку от 300 до 1000 кг, в зависимости от принятых технологических параметров соединения.

При осуществлении тепловой сборки вставки из нирезиста и кольца-заглушки из стали 40Х в условиях пластической деформации соединение может выдержать осевую сдвигающую нагрузку от 900 до 1600 кг.

Учитывая, что заполнение кокиля и затвердевания отливок поршней осуществляют только под действием сил тяжести расплава, рассчитанная несущая способность соединения обеспечит формообразование поршней ДВС без взаимного смещения деталей сборки.

**Заключение.** При соединении вставки из нирезиста и кольца-заглушки из стали 40Х в условиях отсутствия пластической деформации оптимальным следует считать толщину кольца-заглушки 10 мм и гарантированный натяг при сборке 0,6 мм, так как при последующей операции алитирования, сопровождающейся нагревом сборочной единицы до температуры 800 °С, натяг уменьшится на 0,3 мм из-за разницы коэффициентов линейного расширения стали и нирезиста. Если осуществлять тепловую сборку вставки из нирезиста и кольца-заглушки из стали 40Х в условиях пластической деформации, то оптимальным вариантом следует считать соединение деталей при толщине кольца-заглушки 3 мм с фактическим натягом на диаметр 0,32 мм. При сборке деталей вставки и кольца-заглушки из нирезиста оптимальными являются гарантированные натяги на диаметр 0,6 мм, 0,7 мм и 0,8 мм, что объясняется высоким коэффициентом термического расширения материалов и небольшими обжатиями ограниченных по длине посадочных поверхностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ласковнев, А.П. Производство алюминиевых поршней для высокофорсированных двигателей внутреннего сгорания / А.П. Ласковнев, В.В. Овчинников, О.Е. Жданович. – Минск: Экоперспектива, 2004. – 190 с.
2. Расчет на прочность деталей машин: справ. / И.А. Биргер [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.

Поступила 29.04.2009