

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ ПОРШНЯ ПРИ ФОРСИРОВАНИИ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ

*А.В. Белогуб, д.т.н.; ПАО АВТРАМАТ (Харьковский завод «Поршень»);
В.А. Пылев, д.т.н., А.Ю. Федоров, студент; НТУ ХПИ (г. Харьков, Украина);
И.Л. Ночвин, гл. конструктор, ООО УДМЗ (г. Екатеринбург, Россия)*

Приведены результаты расчетных исследований по снижению теплонапряженности поршня за счет применения комплекса мероприятий, связанных с нанесением термоизолирующего корундового покрытия поверхности камеры сгорания, а также интенсификации теплоотвода от головки поршня. Показано, что предложенный комплекс мероприятий позволяет форсировать дизель по мощности на 25 % при использовании материала базовой конструкции.

В машиностроении наметилась общая тенденция максимального использования потенциальных возможностей конструкционных материалов для создания техники с высоким отношением прочности к массе. Относительно двигателестроения этот подход требует решения сложных проблем обеспечения работоспособности и ресурсной прочности деталей камер сгорания современных дизелей при значительном росте их теплонапряженности, связанной с форсированием, ограничением теплоотвода, повышением максимального давления цикла и др.

Применение современных технологий конструкторско-технологического проектирования двигателей и их ответственных деталей предопределило необходимость разработки методического, математического, программного, технического и организационного обеспечения, позволяющего осуществлять как ранжирование качества создания конструкций [1, 2], так и реализовать переход от концепции гарантированного обеспечения ресурсной прочности к концепции работы материалов на границе их прочности [3].

Одним из распространенных способов снижения теплонапряженности поршней при форсировании тепловозных дизелей является применение составного поршня (рис. 1). Такой поршень, как правило, представляет собой сборку, состоящую из головки с камерой сгорания (КС), выполненной из жаропрочного материала с развитой полостью охлаждения, и тронка, выполненного из алюминиевого сплава и служащего для восприятия боковой силы. Значительных напряжений от термических и механических нагрузок тронк не несет.

Поршень сложен в изготовлении, дорог, имеет перегретую камеру сгорания и переохлажденный тронк [4] (температура огневого днища поршня возрастает примерно на 150–250 К, а в зоне первого поршневого кольца всего на 65 К). В поршнях таких конструкций далеко не всегда полностью используются все свойства материалов.

Для поршней из алюминиевых сплавов также широко распространены конструкции с залитым в области головки металлическим змеевиком (рис. 2), обеспечивающим снижение теплонапряженности путем организации циркуляционного масляного охлаждения. Общеизвестно, что основным недостатком здесь выступает ограничение скорости движения масла в змеевике, а также

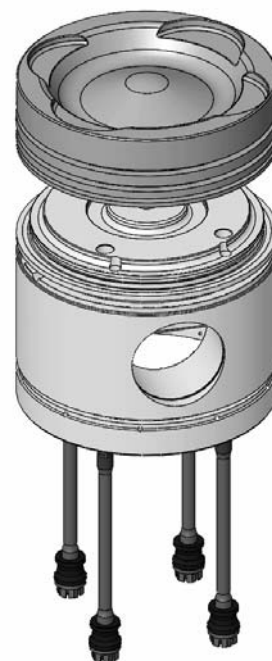


Рис. 1. Составной поршень

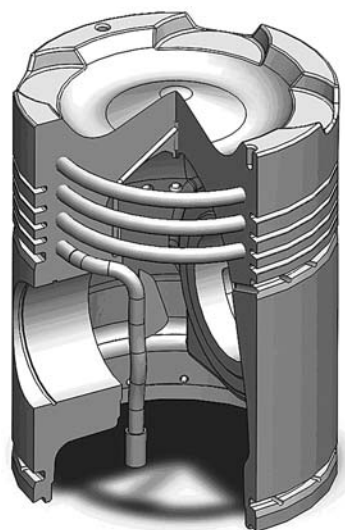


Рис. 2. Поршень с системой циркуляционного масляного охлаждения



Рис. 3. Поршень с оксидно-керамическим слоем поверхности камеры сгорания

обеспечение эффективного теплоотвода от основного материала поршня к змеевику.

На поршнях из алюминиевых сплавов сегодня находит применение технология оксидно-керамической модификации поверхности (рис. 3) [5]. Технология позволяет получить уже не покрытие в традиционном понимании, а некий корундовый слой Al_2O_3 с коэффициентом теплопроводности значительно ниже теплопроводности основного материала поршня. Формирование поверхностного корундового слоя происходит за счет микродугового оксидирования алюминиевой детали, а получаемый слой имеет высокую адгезию с алюминиевой основой. При этом кроме эффектов, связанных с теплоизоляцией КС, существенно повышается ресурс поршневых канавок и тронка до их предельного износа [6].

Основным конструктивным мероприятием, не требующим значительных изменений в конструкции поршня, является выполнение кольцевой полости охлаждения (рис. 4), формируемой с помощью растворимых соляных стержней и обеспечивающей галерейное масляное охлаждение. Существует множество вариантов профилей геометрии кольцевой полости. Как правило, они схожи между собой формой сечения и отличаются размерами, углом наклона и т. д.

В рассматриваемых случаях нетрудно показать, что вектор качества конструкций, связанный с процедурами и режимами их создания, имеет существенно более высокие значения для двух последних вариантов конструкций. Поэтому, исходя из требования минимизации производственных затрат на изготовление, наиболее интересным с практической точки зрения является решение задачи определения уровней форсирования дизеля с цельнолитым поршнем для случаев применения мероприятий, включающих

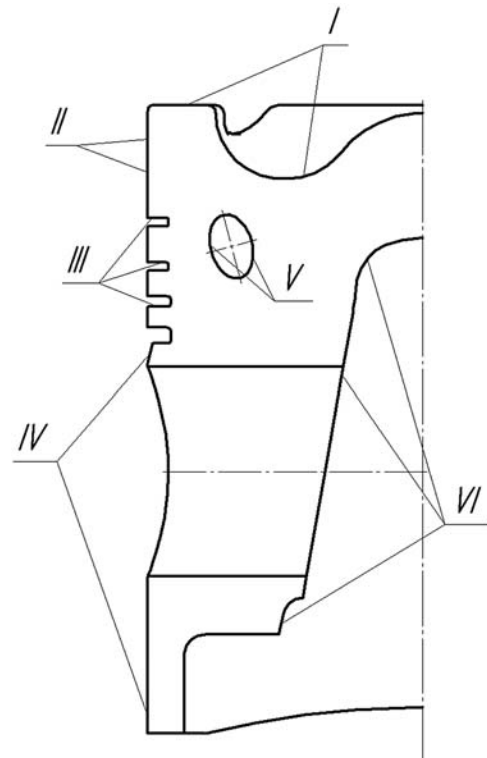


Рис. 4. Зоны задания граничных условий:

I — зона огневой поверхности днища; II — зона жарового пояса; III — зона поршневых колец; IV — зона тронка; V — зона кольцевой галереи; VI — зона охлаждаемых поверхностей

использование галерейного масляного охлаждения и поверхностного керамического слоя головки поршня.

Моделирование температурного состояния поршня дизеля

В качестве объекта моделирования выбран поршень тепловозного дизеля 6ЧН21/21 (рис. 4). Для этого в пакете SolidWorks создана базовая модель поршня, не включающая какие-либо мероприятия по снижению теплонапряженности, и модели с галерейным охлаждением, проведено численное моделирование температурного состояния ряда конкурирующих конструкций. Для выполнения сравнительного анализа использованы граничные условия третьего рода. Для зон II–VI граничные условия назначались по данным работ [7–9]. Для зоны I (камера сгорания) граничные условия определены по методике НТУ ХПИ [9], наиболее экономичной из рассмотренных в процессе выполнения работы¹. Закон изменения коэффициента теплоотдачи в радиальном направлении камеры сгорания (КС) принят согласно данным [10].

¹ Были рассмотрены варианты задания граничных условий по камере сгорания по Вошни, Эйхельбергу, Хохенбергу и НТУ ХПИ. Для первых 3-х — необходимы индикаторные диаграммы, для последней — литровая мощность двигателя. Результаты расчета температурных полей по всем методикам достаточно близки, а разница в температурах максимально горячей точки камеры сгорания совпадает для всех методик с достаточной для практики точностью.

Наличие корундового слоя (термосопротивления) поверхности КС учтено следующим образом:

$$\alpha_r^* = \alpha_r / \left(1 + \frac{\delta_{сл}}{\lambda_{сл}} \alpha_r \right), \quad (1)$$

где α_r — коэффициент теплоотдачи по поверхности поршня без корундового слоя; $\delta_{сл} = 0,24$ мм — толщина слоя теплоизоляции; $\lambda_{сл} = 2,85$ Вт/(м·К) — теплопроводность слоя теплоизоляции.

Следует заметить, что использование выражения (1) не позволяет учесть в расчете динамический эффект теплоизоляции. Это означает, что реальный уровень теплонапряженности конструкции будет ниже расчетного.

Сравнительное расчетное исследование выполнено для четырех уровней форсирования двигателя, представленных в табл. 1. Здесь уровень форсирования по мощности, равной 715 кВт, рассмат-

Таблица 1

Граничные условия 3-го рода по днищу поршня

| Особенность поверхности КС | Мощность дизеля, кВт | | | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|------|-----------------------------------|------|-----------------------------------|------|-----------------------------------|------|
| | 715 | | 750 | | 895 | | 915 | |
| | α кВт/м ² ·К | T, К | α кВт/м ² ·К | T, К | α кВт/м ² ·К | T, К | α кВт/м ² ·К | T, К |
| Без теплоизоляции | 0,482 | 1054 | 0,493 | 1060 | 0,538 | 1087 | 0,545 | 1090 |
| С корундовым слоем | 0,463 | 1054 | 0,474 | 1060 | 0,515 | 1087 | 0,521 | 1090 |

ривался как исходный. При нем надежно работает поршень конструкции, представленной на рис. 4. Уровень форсирования до мощности 750 кВт рассматривается как желаемый, а 915 кВт — как перспективный. Результаты определения граничных условий по днищу поршня для выбранных уровней форсирования приведены в табл. 1.

Сравнение эффективности снижения тепловой напряженности конструкций за счет применения галерейного охлаждения и корундирования огневой поверхности поршня осуществлялось для контрольных точек, представленных на рис. 5. В табл. 2 приведены результаты численного эксперимента применительно к поршню из алюминиевого сплава АК12М2МгН (АЛ25).

Анализ результатов показывает, что поршень с галерейным масляным

охлаждением при мощности двигателя 715 кВт имеет приемлемый уровень теплонапряженности (см. рис. 5). В зоне кромки КС (точка 4) температура достигает 323 °С, в зоне верхнего поршневого кольца (ПК), в точке 6 — 225 °С, а в кольцевой галерее (точка 9) — 223 °С. На представленном этапе работ данный уровень теплонапряженности был принят за исходный и желаемый для поддержания при дальнейшем форсировании двигателя.

Результаты расчетов показывают (табл. 2), что поршень с корундовым поверхностным слоем без полости охлаждения при уровне форсирования 715 кВт в рассматриваемых точках 4 и 6 имеет, соответственно, температуры 328 °С и 230 °С. При мощности двигателя 750 кВт и применении конструкции поршня с галерейным масляным охлаждением и корундированием поверхности КС температурное состояние поршня в рассматриваемых точках соответствует 325 °С и 229 °С. Полученный результат свидетельствует, что применение технологии оксидно-керамической модификации поверхности КС в перспективе может позволить отказаться от применения конструктивных мероприятий, например, представленных на рис. 1, 2, которые в большей степени повышают производственные затраты на изготовление поршней.

Более весомый результат получен в случае применения полости охлаждения специально разработанной формы (конструкция полости в поршне патентуется). При этом для новой конструкции изучен эффект увеличения теплового потока от поверхности КС к поверхности полости и учтен

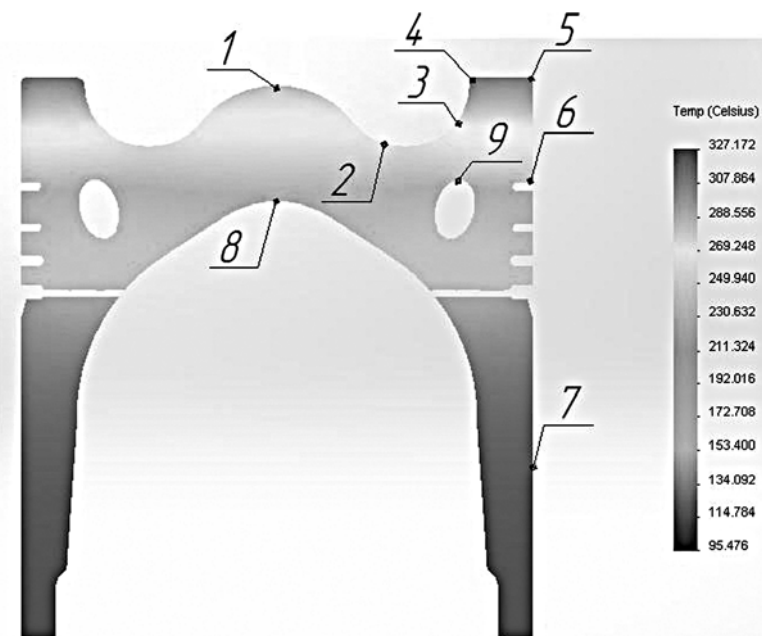


Рис. 5. Температурное состояние поршня при уровне форсирования дизеля 715 кВт и размещение точек контроля температуры на 3D модели

Сравнительный уровень температур в характерных точках поршня, °С

| № контрольной точки | Мощность дизеля, кВт | | | | | | | |
|---------------------|---|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|
| | 715 | 750 | 895 | 915 | 715 | 750 | 895 | 915 |
| | Без галереи | | | | Без галереи с корундированием | | | |
| 1 | 312 | 318 | 340 | 344 | 307 | 313 | 334 | 338 |
| 2 | 268 | 273 | 292 | 294 | 265 | 269 | 287 | 290 |
| 3 | 280 | 285 | 305 | 308 | 277 | 282 | 301 | 304 |
| 4 | 332 | 339 | 362 | 366 | 328 | 335 | 358 | 361 |
| 5 | 331 | 337 | 360 | 364 | 327 | 333 | 356 | 359 |
| 6 | 231 | 235 | 251 | 253 | 230 | 234 | 250 | 252 |
| 7 | 105 | 105 | 107 | 107 | 105 | 105 | 106 | 107 |
| 8 | 223 | 226 | 240 | 243 | 220 | 224 | 237 | 239 |
| № контрольной точки | Мощность дизеля, кВт | | | | | | | |
| | 715 | 750 | 895 | 915 | 715 | 750 | 895 | 915 |
| | С галерей ($\alpha = 2,2$ кВт/(м ² ·К)) | | | | С галерей ($\alpha = 2,2$ кВт/(м ² ·К)) и корундированием | | | |
| 1 | 296 | 302 | 323 | 326 | 291 | 297 | 317 | 320 |
| 2 | 250 | 254 | 271 | 273 | 246 | 251 | 267 | 269 |
| 3 | 266 | 270 | 288 | 291 | 263 | 267 | 285 | 288 |
| 4 | 323 | 329 | 352 | 355 | 319 | 325 | 347 | 351 |
| 5 | 321 | 328 | 350 | 354 | 318 | 324 | 346 | 350 |
| 6 | 225 | 229 | 244 | 247 | 224 | 229 | 244 | 246 |
| 7 | 103 | 103 | 104 | 104 | 103 | 103 | 104 | 104 |
| 8 | 208 | 211 | 223 | 225 | 205 | 208 | 220 | 222 |
| 9 | 223 | 226 | 240 | 242 | 221 | 224 | 238 | 240 |
| № контрольной точки | Мощность дизеля, кВт | | | | | | | |
| | 715 | 750 | 895 | 915 | 715 | 750 | 895 | 915 |
| | С галерей специальной формы ($\alpha = 2,2$ кВт/(м ² ·К)) | | | | С галерей специальной формы ($\alpha = 2,2$ кВт/(м ² ·К)) и корундированием | | | |
| 1 | 291 | 296 | 317 | 320 | 286 | 291 | 311 | 314 |
| 2 | 242 | 246 | 262 | 264 | 239 | 243 | 258 | 260 |
| 3 | 251 | 256 | 272 | 275 | 248 | 253 | 269 | 271 |
| 4 | 311 | 317 | 339 | 342 | 307 | 313 | 334 | 337 |
| 5 | 310 | 316 | 338 | 342 | 307 | 313 | 334 | 338 |
| 6 | 217 | 221 | 236 | 238 | 216 | 221 | 235 | 237 |
| 7 | 103 | 103 | 104 | 104 | 103 | 103 | 104 | 104 |
| 8 | 203 | 206 | 217 | 219 | 200 | 203 | 214 | 216 |
| 9 | 226 | 230 | 244 | 246 | 224 | 228 | 242 | 244 |
| № контрольной точки | Мощность дизеля, кВт | | | | | | | |
| | 715 | 750 | 895 | 915 | 715 | 750 | 895 | 915 |
| | С галерей специальной формы ($\alpha = 4,0$ кВт/(м ² ·К)) | | | | С галерей специальной формы ($\alpha = 4,0$ кВт/(м ² ·К)) и корундированием | | | |
| 1 | 279 | 284 | 304 | 307 | 274 | 279 | 298 | 301 |
| 2 | 227 | 230 | 245 | 247 | 224 | 227 | 241 | 243 |
| 3 | 230 | 234 | 248 | 251 | 227 | 231 | 245 | 247 |
| 4 | 295 | 300 | 321 | 325 | 291 | 297 | 317 | 320 |
| 5 | 296 | 302 | 323 | 326 | 293 | 298 | 319 | 322 |
| 6 | 210 | 214 | 227 | 229 | 209 | 213 | 227 | 229 |
| 7 | 102 | 102 | 103 | 103 | 102 | 102 | 103 | 103 |
| 8 | 192 | 195 | 205 | 207 | 190 | 192 | 202 | 204 |
| 9 | 205 | 208 | 220 | 222 | 204 | 207 | 219 | 220 |

известный эффект интенсификация теплообмена в кольцевой галерее [11].

Здесь в первом исследовании выполнено моделирование температурного состояния конструкции при неизменном уровне теплоотдачи в масле ($\alpha = 2,2 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$). Установлено (см. табл. 2), что для этого расчетного случая в точках 4 и 6 температура поршня с галереей специальной формы при уровне форсирования двигателя до мощности 750 кВт имеет более низкие значения, чем для поршня с галереей исходной конструкции при мощности 715 кВт (соответственно, 317 °С против 325 °С и 221 °С против 225 °С). С другой стороны, интенсификация теплообмена в полости специальной формы при увеличении коэффициента теплоотдачи в масло до 4,0 кВт/(м²·К) с одновременным корундированием поверхности КС даже при форсировании двигателя до мощности 915 кВт приводит к следующему результату. В зоне кромки КС (точка 4) температура составляет 320 °С, в зоне верхнего поршневого кольца (ПК), в точке 6, — 229 °С, а в кольцевой галерее (точка 9) — 220 °С. Таким образом, показано, что перспективы снижения теплонапряженности поршней при использовании галерейного масляного охлаждения еще полностью не исчерпаны.

Выводы

Проведенные исследования показывают, что применение галерейного масляного охлаждения поршня в комплексе с образованием на поверхности его камеры сгорания теплоизолирующего слоя с хорошими адгезионными свойствами позволяет существенно форсировать дизель и отказаться от применения составного поршня либо системы циркуляционного масляного охлаждения. При этом степень форсирования тепловозного дизеля по мощности может достигать 20–25 % при разумной интенсификации масляного охлаждения и неизменном уровне теплонапряженности поршня.

Дальнейшее направление работ связано с учетом динамического эффекта поверхностной теплоизоляции камеры сгорания, оптимизацией формы и положения кольцевой полости, а также исследованием пределов повышения уровня теплонапряженности конструкции, при которых обеспечивается заданный уровень ее ресурсной

прочности в условиях эксплуатации промышленного дизеля с учетом минимизации производственных затрат.

Литература

1. Звонов В.А. Козлов А.В., Теренченко А.С. Оценка жизненного цикла — основа совершенствования АТС // Автомобильная промышленность. — 2003. — № 11. — С. 9–12.
2. Белогуб А.В. Поддержка жизненного цикла тонкостенных поршней ДВС на основе технологии интегрированного проектирования и производства // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2010. — № 3. — С. 27–40.
3. Белогуб А.В. Научно-технические основы интегрированного проектирования и производства тонкостенных поршней ДВС // дис. ... докт. техн. наук. — Харьков, НТУ ХПИ, 2011. — 468 с.
4. Костин А.К. Ларионов В.В., Михайлов Л.И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания. — Л.: Машиностроение, 1979. — 222 с.
5. Shpakovsky V. Shpakovsky I., Beleske A. Patent Application Publication United States. Method of producing corundum layer on metal parts, // № US 2006/0207884 A1, Sep. 21, 2006.
6. Шпаковский В.В. Повышение ресурса и снижение расхода топлива ДВС путем применения частично-динамической теплоизоляции камеры сгорания: учеб. пособие — Харьков: НТУ ХПИ, 2012. — 132 с.
7. Белогуб А.В. Гусев Ю.А., Зотов А.А., Щербина А.Г. Исследование температурного поля поршня // Авиационно-космическая техника и технология. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т ХАИ. — 2002. — Вып. 31. — С. 120–123.
8. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: алгоритмы прикладных программ / Р.М. Петриченко, С.А. Батулин, Ю.Н. Исаков и др.; под общ. ред. Р.М. Петриченко. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. — 328 с.
9. Пильов В.О. Автоматизоване проектування поршнів швидкохідних дизелів із заданим рівнем тривалості міцності. — Харків: НТУ ХПІ, 2001. — 332с.
10. Дьяченко Н.Х. Костин А.К., Булин М.М. К определению граничных условий при моделировании температурных полей в поршнях ДВС // Энергомашиностроение. — 1968. — № 4. — С. 18–21.
11. An analytical approach for prediction of piston temperature distribution in diesel engines. Hidehiko Kajiwara, Yukihiro Fujioka, Tatsuya Suzuki, Hideo Negishi, Proceedings. JSAE Annual Congress, 23/2002.