

# ВЫБОР РЕЖИМОВ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГОЛОВКИ ЦИЛИНДРОВ АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ

## SELECTION OF ACCELERATED TEST MODES FOR THE HEAD OF CYLINDER OF THE AUTOMOBILE DIESEL ENGINE

**А.Н. ГОЦ**, д.т.н.  
**В.С. КЛЕВЦОВ**

Владимирский государственный университет  
им. А.Г и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия, hotz@mail.ru

**A.N. GOTS**, DSc in Engineering  
**V.S. KLEVTSOV**

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay  
Stoletovs, Vladimir, Russian Federation, hotz@mail.ru

Рассмотрены возможности прогнозирования долговечности головок цилиндров автомобильных дизелей на стадии проектирования и доводки их до заданных показателей, особенно по надежности. Поскольку дизели в эксплуатации работают на неустановившихся режимах, то основная нагрузка – не только механическая, но и тепловая. При этом она возникает при изменении режимов работы дизеля. Наиболее нагруженными сечениями в головке цилиндров являются перемычки между впускными и выпускными клапанами, а также перемычки между отверстиями под форсунку и впускным или выпускным каналами. Под действием тепловой нагрузки в сечениях головки цилиндров возникают сначала искажения кристаллической решетки, что приводит к появлению по какому-то направлению, в котором действуют наибольшие касательные напряжения, надрывов, постепенно переходящих под действием переменных напряжений в трещину. Когда полная накопленная поврежденность достигает некоторой критической величины, а трещина существенно ослабляет поперечное сечение, происходит усталостное разрушение. Для обеспечения надежности дизеля в эксплуатации необходимо выбрать такие методы расчета и испытаний, которые обеспечили бы заданную долговечность головки цилиндров. Поскольку проверка надежности в эксплуатации занимает значительное время, то для сокращения сроков испытаний используют ускоренные испытания. Рассмотрено место, занимаемое ускоренными испытаниями в проектировании дизелей, а также последовательность формирования их программы. Показано, что на практике возможно достижение лишь некоторой степени изменения технического состояния головки цилиндров, обусловленной степенью полноты учета взаимодействующих эксплуатационных нагрузок и их искажения при воспроизведении на испытательном оборудовании. Предложены возможные режимы испытания головок цилиндров на безмоторном тепловом стенде с целью определения их долговечности. Они соответствуют режимам ускоренных испытаний на надежность дизелей автомобильных двигателей. Рассмотрена проблема сходимости результатов при ускоренных испытаниях и данных, полученных в эксплуатационных условиях.

**Ключевые слова:** головка цилиндров, дизель, тепловая нагрузка, надежность, трещина, ускоренные испытания.

The possibilities of a prediction of the heads of cylinder durability of the automotive diesel engines at the design stage and their completion to specified parameters, especially for reliability are considered. Since diesel engines operate in the unsteady modes, the main load is not only mechanical, but also thermal. At that, it occurs when the operating modes of the diesel engine change. The most loaded sections in the cylinder head are the bridges between the inlet and exhaust valves, as well as the bridges between the nozzle holes and inlet and exhaust valves. Under the influence of the thermal load, the distortions of the crystal lattice appear in the sections of the cylinder head at first, which leads to the appearance in some direction in which the greatest tangential stresses act, tears, gradually change under the influence of alternating stresses in the crack. When the total accumulated damage reaches a certain critical value, and the crack substantially weakens the cross section, fatigue failure occurs. To ensure the reliability of the diesel engine in operation, it is necessary to choose such methods of calculation and testing that would ensure a specified durability of the cylinder head. Since the reliability check in operation takes considerable time, that accelerated testing is used to reduce the test time. The place occupied by the accelerated tests in the design of diesel engines, as well as the sequence of the formation of their program are considered. It is shown that in practice it is possible to achieve only a certain degree of change in the technical condition of the cylinder head due to the degree of completeness of the accounting of the interacting operational loads and their distortion during reproduced on the test equipment. Possible modes of testing the cylinder heads on a non-motorized thermal bench are proposed with the aim of a determination their durability. They correspond to the modes of accelerated tests for the reliability of the automobile diesel engines. The problem of convergence of the results at accelerated tests and the data under operating conditions is considered.

**Keyword:** cylinder head, diesel engine, thermal load, reliability, crack, accelerated tests.

## Введение

Рост литровых мощностей двигателей внутреннего сгорания приводит к повышению теплонапряженности деталей, окружающих камеру сгорания, – поршня и головки цилиндров, т.е. повышая энергетические показатели дизелей, необходимо одновременно решать проблему повышения термостойкости головок цилиндров (ГЦ).

При работе двигателей внутреннего сгорания напряжения в сечениях ГЦ изменяются циклически, поэтому от температурных напряжений возможно появление усталостных разрушений. Изменение температурного режима происходит не только в период одного цикла, но и в результате изменения нагрузки, так как дизели работают на неустановившихся режимах [1–3].

Известно, что температурные напряжения в ГЦ дизеля возникают при протекании рабочего процесса. Они относятся к циклическим температурным напряжениям (и соответственно, нагрузкам) высокой частоты. При переходе дизеля с одного режима на другой также меняется тепловая нагрузка, которая относится к нагрузке низкой частоты. Поэтому изменение температуры газов в цилиндре за период цикла (высокочастотное нагружение) вызывают изменение температуры на огневом днище. Но по мере удаления от огневого днища ГЦ температура в ее сечениях постепенно затухает, т.е. влияние высокочастотного нагружения на термические напряжения незначительны [4].

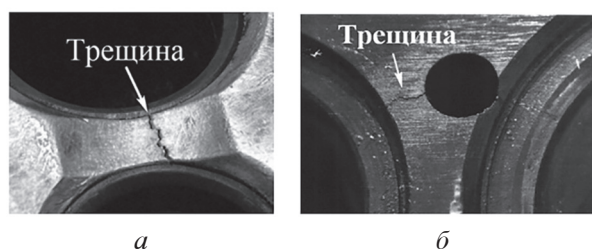
В период пуска, при переходе двигателя с режима на режим по внешней скоростной характеристике, останове возникают низкочастотные тепловые нагрузки. В эксплуатации переход от одного режима к другому составляет от 5 до 15 с, а максимальная температура ГЦ после выхода на заданный режим становится постоянной в течение 180...240 с [5], т.е. низкочастотные нагрузки являются основными, что определяет надежность ГЦ.

Поэтому при определении надежности ГЦ необходимо выбрать такую методику испытаний, подтвержденную при эксплуатационных испытаниях, которая позволила бы спрогнозировать долговечность ГЦ в условиях действия произвольных нагрузок с помощью кривых усталости, полученных при симметричном цикле нагружения.

Известно, что долговечность детали испытывающих нагрузки произвольного спектра, определяется числом циклов нагружения, при

котором происходит усталостное разрушение. Считается, что каждый раз происходит накоплению повреждений (микро- или макротрещин) от каждой нагрузки в отдельности, причем полная поврежденность равна сумме этих повреждений, получаемых под воздействием каждой нагрузки.

Применительно к ГЦ можно считать, что в сечениях, где возникают наибольшие температурные напряжения (обычно это перемычки между отверстиями под форсунку и выпускным (выпускным) каналом, перемычки между впускными и выпускными клапанами), появление максимальных касательных напряжений по какому-либо направлению приводит к искажению кристаллической решетки, появлению микротрещин, постепенно переходящих под действием переменных напряжений от макротрещины в трещину. Усталостное разрушение происходит тогда, когда трещина существенно ослабляет поперечное сечение. На рис. 1 показаны характерные трещины на днище головки цилиндров [3].



**Рис. 1. Характерные трещины в сечениях головки цилиндров:**

*a* – на межклапанной перемычке дизеля 4СН 9,6/10,3 (Toyota 1KZ-T); *б* – на перемычке между отверстием под форсунку и выпускным каналом дизеля 8СН 13/14 (ЯМЗ-238НБ)

Причиной таких отказов могли быть конструктивные ошибки при разработке деталей с целью форсирования дизеля до заданных показателей. Как правило, при этом возникала необходимость увеличить диаметр впускных и выпускных каналов или перейти на четырехклапанную головку цилиндров. Видимо, это и вызывало уменьшения запасов прочности в сечениях ГЦ.

В расчетной модели для определения напряженно-деформированного состояния головки цилиндров необходимо учитывать напряжения и деформации от следующих действующих на нее нагрузок:

– сил давления газов в цилиндре, которые равны максимальному давлению сгорания

$p_z$  на расчетном режиме (для дизеля это, как правило, режим максимального крутящего момента);

- усилий от затяжки шпилек или болтов крепления головки цилиндров (при расчете МКЭ принимается, что усилие вокруг элементов крепления распределяется в пределах «конуса давления») [4];

- усилий, возникающих при установке форсунки;

- радиальных напряжений, возникающих при запрессовке седел и втулок клапанов (определяется в зависимости от натяга);

- вызванных перепадом температур.

Для обеспечения надежности двигателей внутреннего сгорания и его деталей на всех этапах проектирования и изготовления проводятся различного рода испытания, в том числе ускоренные.

### Цель исследования

Целью исследования является проведение анализа исследовательских и ускоренных испытаний с целью выбора режимов ускоренных испытаний головки цилиндров автомобильного двигателя.

### Место испытаний в проектировании деталей

ГЦ может проектироваться в составе двигателя внутреннего сгорания или отдельно при модернизации базовой конструкции, например, при изменении числа впускных или выпускных клапанов, при изменении конфигурации впускных и выпускных каналов. Покажем упрощенный вариант проектирования ГЦ для определения роли испытаний в системе конструирования (рис. 2).

Представим, что проводятся эксплуатационные испытания новой конструкции двигателя (или модели двигателя). В принципе, эксплуатация есть также процесс испытания машин по их прямому назначению, т.е. испытания в естественных условиях. Полученная потребителем информация об этих испытаниях может вызвать необходимость сформировать новые требования к конструкции или отдельным деталям (например, ГЦ). После этого составляется техническое задание на новую или модернизированную модель. На этом этапе, по существу, представляется описание будущей машины или отдельных ее узлов. Для обоснования предъявленных требований могут про-

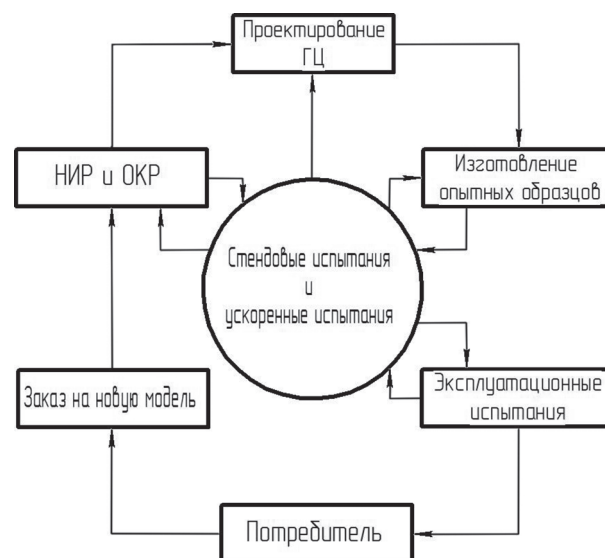


Рис. 2. Испытания на этапах цикла реализации конструкции

водиться испытания на прототипе машины для решения поставленной задачи.

На этапе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ может проводиться большой объем экспериментальных работ – от уточнения конструкции до испытания опытных образцов разрабатываемой конструкции (см. рис. 1). На этом этапе обращаемся к эксперименту, реализуя информационную обратную связь. Успех на этом этапе в значительной степени определяется испытаниями, поскольку полную и надежную информацию удастся получить экспериментально. Чем раньше будут обнаружены недостатки конструкции, тем дешевле будет их устранение.

После завершения работ на этапе НИР и ОКР переходим к собственно проектированию ГЦ, при этом на этом этапе имеется информационная связь с данными испытаний прототипов, что позволяет своевременно внести изменение в конструкцию.

На этапе изготовления опытных образцов (производство конструкции) также имеется связь с испытаниями и конструированием. Например, при разработке систем впуска и выпуска необходимо провести исследовательские стендовые испытания. Они проводятся по индивидуальным программам и методикам, которые ориентированы на получение требуемой, например, для этого этапа работ научно-технической информации с минимальными затратами трудовых и временных ресурсов. С целью получения экспериментальных данных, сопоставимых с результатами серийных об-

разцов двигателей, при проведении исследовательских работ на моторных стендах методики проведения испытаний и обработки их результатов базируются на соответствующих стандартах. Это позволяет внести своевременно изменение не только в конструкцию, но и улучшить процесс изготовления конструкции.

Таким образом, на этом примере проектирования ГЦ показано, что на всех этапах изготовления конструкции детали или опытного образца изделия наиболее полная информация получается при испытаниях, в том числе ускоренных.

### Последовательность формирования программ ускоренных испытаний

Если для получения достаточно надежных сведений о надежности двигателя или его составных частей при работе в условиях нормальной эксплуатации требуется длительное время (для тракторных двигателей 3–4 г.), то нужно найти такой режим работы, чтобы выработка ресурса произошла в более сжатые сроки. При такой более напряженной работе двигателя отказы деталей станут появляться быстрее и удастся получить необходимые сведения о надежности конструкции за более короткий срок. В этом идея методов ускоренных испытаний, которая сама по себе является очень заманчивой. Однако предварительно необходимо изучить, как происходит процесс выработки ресурса в зависимости от жесточения режима работы. Обычно принимаемая при таких исследованиях гипотеза, что отказы в эксплуатационных условиях и при ускоренных испытаниях происходит одинаково, требует серьезной проверки. Другими словами, необходимо обеспечить автоточность изменения технического состояния деталей и узлов двигателя при ускоренных и эксплуатационных испытаниях. Достаточно вспомнить, что закон Гука, например, действует в строго ограниченных пределах. Поэтому при проведении ускоренных испытаний в деталях могут появиться остаточные деформации, которые неизбежно приведут к ошибочным результатам при оценке надежности конструкции. Поэтому требуется тщательная проверка причин появления отказов ГЦ при работе двигателя в эксплуатации и при ускоренных испытаниях – по крайней мере, отказы должны быть идентичны и возникать в тех же сечениях. В связи с этим разработка методов ускоренных испытаний

должна быть отнесена к одному из важнейших теоретических и экспериментальных направлений исследований теории надежности.

Формирование программ испытаний целесообразно разделить в два этапа. На первом этапе составляется программа лабораторных исследовательских испытаний, воспроизводящих реальные эксплуатационные нагрузки. Для ГЦ это может быть испытание на безмоторном стенде или при стендовых испытаниях на развернутом двигателе, когда определяются действующие нагрузки или температуры в характерных точках. На втором этапе выбираем условия нагружения с целью сокращения времени наработки на отказ, т.е. циклограммы нагружения при ускоренных испытаниях.

При ускоренных испытаниях не всегда удастся обеспечить такое нагружение, которое характерно при эксплуатации. Известно, температурные напряжения в межклапанной перемычке превосходят напряжения от монтажных нагрузок и от сил давления газов в цилиндре [5, 6]. Кроме того, максимальные напряжения от воздействия тепловых нагрузок и напряжения от давления газов, отстоят друг от друга на  $5...20^\circ$  поворота коленчатого вала. Другими словами, нагружение ГЦ газовыми силами и силами, возникающими под действием перепада температур, происходит не одновременно. Это происходит потому, тепло при сгорании в камере сгорания выделяется после ВМТ. На рис. 3 приведена характеристика тепловыделения  $\frac{dx}{d\varphi} = f(\varphi)$ , а также зависимостей температуры  $T = f(\varphi)$  и давления  $p = f(\varphi)$  от угла поворота. Здесь  $x$  – доля топлива, выгоревшего к данному моменту времени.

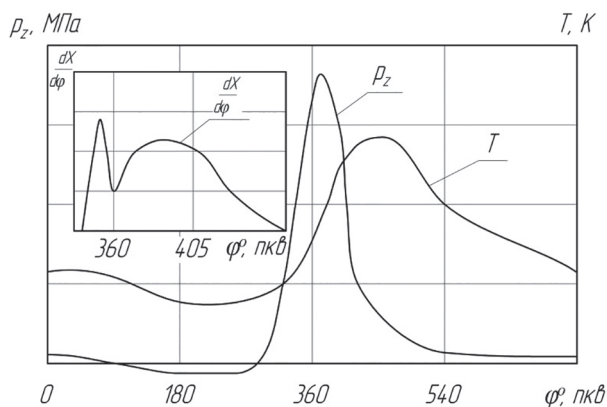


Рис. 3. Диаграмма изменения давления  $p_z$  и температуры  $T$  в цилиндре 4-тактного ДВС



Температура рабочего тела  $T = f(\varphi)$  возрастает в процессе сгорания и достигает максимального значения после момента достижения максимального давления  $p_z = f(\varphi)$ .

Поэтому первый этап возможен при стендовых испытаниях снятия индикаторной диаграммы двигателя для определения времени протекания максимальной температуры цикла (см. рис. 3). На втором этапе с целью ускорения процесса нагружения ГЦ тепловой нагрузкой определяется цикл нагружения. Обеспечить на безмоторной установке нагружение, аналогичное давлению газов в камере сгорания, не представляется возможным.

Выбор цикла нагружения является главным при ускоренных испытаниях. Так, при выборе цикла термонагружения тракторных дизелей [3] учитывалось, что при выполнении таких наиболее энергоемких сельскохозяйственных работ, как пахота и культивация, нагрузки на детали дизеля непрерывно изменяются в широких пределах, в результате этого ГЦ испытывает переменные нагрузки. Это приводит к резкому росту температур в межклапанных перемычках, при этом уровень температур  $T_{max}$  стабилизируется в течение 2...3 мин после выхода дизеля на заданный режим [3].

Для выбора циклов испытаний ГЦ на безотказность на безмоторном стенде проанализируем принятые циклы нагружений при ускоренных испытаниях дизелей [7]. Среди наиболее

приемлемых можно отметить циклы Komatsu и НАМИ (табл. 1 и 2). Отметим, что опираясь на методику Komatsu в НИКТИД был разработан ОСТ 23.3.21 на методику ускоренных стендовых испытаний тракторных и комбайновых дизелей.

Здесь  $n_{xxmin}$  и  $n_n$  – частоты вращения вала двигателя, минимальная на режиме холостого хода и номинальная, соответственно;  $M_{emax}$  – максимальный крутящий момент двигателя.

Анализ приведенных в табл. 1 и 2 циклов показывает, что наибольшую тепловую нагрузку испытывают детали, образующие камеру сгорания, в циклах Komatsu – второй, когда двигатель работает на частоте вращения коленчатого вала на 5 % превышающей номинальную.

Здесь  $N_n$  – мощность двигателя на номинальном режиме;  $n_{Memax}$  – частота вращения вала двигателя при максимальном моменте.

В циклах НАМИ только 2-й и 3-й циклы (см. табл. 2) вызывают наибольшую термонапряженность ГЦ. Это связано с тем, что максимальные температуры могут быть не только на режиме максимального крутящего момента, но и на номинальном.

Поэтому более целесообразно в качестве цикла термонагружения ГЦ дизеля 8ЧН 12/13 на безмоторном стенде следует принять цикл, показанный на рис. 4.

Как показывают расчеты цикла дизеля 8ЧН 12/13, на режиме максимального крутящего

Таблица 1

Циклы испытаний фирмы Komatsu на переменных режимах

№	Длительность циклов, с	Частота вращения коленчатого вала	Значения эффективного крутящего момента
1	30	$1,05 n_{xxmin}$	0
2	300	$1,05 n_n$	$1,05 M_{emax}$
3	30	$1,05 n_{xxmin}$	0

Таблица 2

Циклы НАМИ испытаний на безотказность дизелей

№	Частот вращения коленчатого вала, мин <sup>-1</sup>	Мощность, крутящий момент (брутто)		Время, с
		Дизели без наддува	Дизели с газотурбинным наддувом	
1	$n_{xxmin} + 300$	0	0	60
2	$1,05 n_n$	$1,05 N_n$	$1,1 N_n$	300
3	$n_{Memax}$	$M_{emax}$	$M_{emax}$	210
4	$1,15 n_n$	0	0	90
5	$n_{xxmin} + 300$	0	0	60
ИТОГО				720

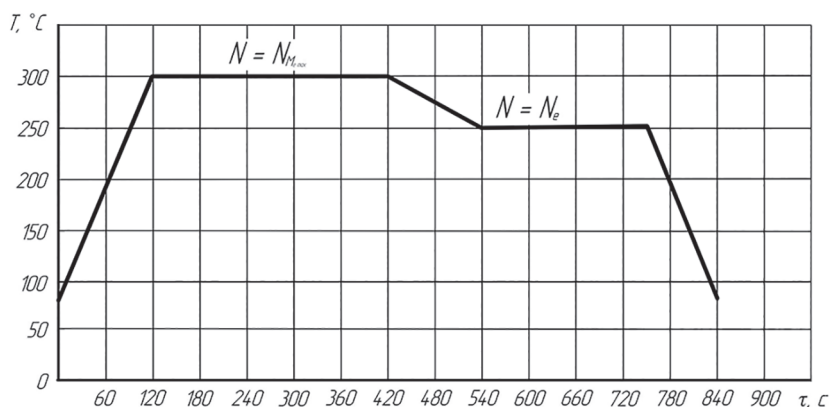


Рис. 4. Диаграмма термонагружения дизеля 8ЧН 12/13

момента при частоте вращения коленчатого вала  $1300 \text{ мин}^{-1}$  максимальная температура  $T_{\text{max}} = 1961 \text{ К}$  цикла возникает при угле поворота кривошипа на угол  $30^\circ$  после ВМТ (см. рис. 2). На номинальном режиме при частоте вращения коленчатого вала  $1900 \text{ мин}^{-1}$  максимальная температура  $T_{\text{max}} = 1763 \text{ К}$  цикла возникает при угле поворота кривошипа на угол  $36^\circ$  после ВМТ. Цикл термонагружения на безмоторном стенде будет переменный: нагрев 120 с, выдержка при постоянной температуре 300 с, охлаждение 120 с и выдержка при постоянной температуре 210 с, при этом нагрев длится 510 с, а охлаждение – 210 с.

Поскольку целью экспериментальных исследований является определение момента возникновения трещины на огневом днище ГЦ после определенного количества циклов нагружения, то при выборе экспериментального образца рационально использовать не всю ГЦ, а лишь часть ее, являющуюся основным элементом, подвергающимся при термоциклическом нагружении разрушению. Это вызвано тем обстоятельством, что для нагрева ГЦ требуется значительное время. Поэтому верхняя часть ГЦ может быть удалена. Кроме того, при испытаниях на безмоторном тепловом стенде появление трещины при определенном цикле нагружений (а не полное разрушение) свидетельствует об отказе [8, 9].

С целью сокращения длительности ускоренных испытаний и интенсификации процессов накопления микротрещин в сечениях ГЦ за счет увеличения уровня напряжений, возникающих в ходе термоциклирования, необходимо выполнить ряд мероприятий, которые позволили бы:

- увеличить частоту нагружения ГЦ (сокращение времени цикла нагружения);

- увеличить температурный градиент в цикле нагружения;

- за счет локального охлаждения в некоторых сечениях увеличить радиальный перепад температуры по огневому днищу ГЦ.

### Обеспечение автомодельности изменения технического состояния

При ускоренных испытаниях ГЦ необходимо обеспечить такое нагружение, чтобы изменение температуры в ГЦ (в некоторых характерных точках) было наиболее приближенным к реальным условиям эксплуатации [9, 10]. Для обеспечения этого условия в некоторых сечениях ГЦ необходимо установить термопары. Известно, что автомодельным считается такое изменение технического состояния двух объектов (в нашем случае ГЦ), один из которых установлен на двигателе, а второй – на безмоторной установке. На каждом этапе работы или испытаний ГЦ первой группы должна соответствовать определенному этапу испытаний ГЦ второй группы, т.е. изменения их технического состояния должны быть одинаковы.

На практике возможно достижение лишь некоторой степени автомодельности, обусловленной степенью полноты учета взаимодействующих эксплуатационных нагрузок и их искажения при воспроизведении на испытательном оборудовании. Вообще, обеспечение автомодельности не является строго обязательным условием проведения ускоренных испытаний. Действительно, не заботясь об автомодельности, можно получить, например, распределения температур по огневому днищу, по высоте или по периметру в относительных величинах одинаковыми, как в режимах нормальной эксплуатации, так и при ускоренных испытаниях [10]. Основное преимущество при соблюдении ав-

томодельности состоит в возможности прямой оценки технического состояния ГЦ на каждой стадии их испытаний и перенесения (пересчета) результатов ускоренных испытаний на условия нормальной эксплуатации. Действительно, при ускоренных испытаниях ГЦ на предложенном нами стенде [3, 9] при циклическом нагружении до 3670 циклов на межклапанной перемычке появилась трещина (рис. 5)

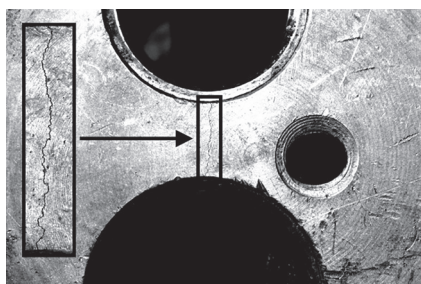


Рис. 5. Трещина на межклапанной перемычке ГЦ, наблюдаемая в ходе эксперимента [3, 9]

Важным средством обеспечения автомодельности является такое формирование программы испытаний, при котором предусматривается не создание средних или максимальных нагрузок, а возможно более полное воспроизведение уровней нагрузок, характерных для реальной эксплуатации. Выявление такого распределения составляет важную часть работ формирования программы ускоренных испытаний.

### Оценка сходимости результатов ускоренных испытаний и реальной эксплуатации

При ускоренных испытаниях неизбежна некоторая неполнота учета спектра эксплуатационных нагрузок и их искажение при воспроизведении на безмоторном стенде, а определенные искажения вносятся преднамеренно. Так, при испытании ГЦ на безмоторном стенде не удастся осуществить нагружение силами, аналогичными газовым силам.

Термонагружение ГЦ на безмоторном стенде осуществляется двумя циклами, которые соответствуют работе дизеля на режиме максимального крутящего момента и на номинальном режиме.

Поэтому неперенным условием законного использования результатов ускоренных испытаний является оценка сходимости результатов ускоренных испытаний и реальной эксплуатации. Это можно сопоставить по ре-

зультатам отказов ГЦ цилиндров. Если появление трещин происходит в тех же сечениях и с одинаковым результатом, то можно считать, что напряженно-деформированное состояние ГЦ при ускоренных испытаниях и в эксплуатации идентичное. Другими словами, техническое состояние ГЦ при ускоренных испытаниях можно считать аналогичным в условиях реальной эксплуатации.

### Заключение

Проведенный анализ термонагружения головок цилиндров автомобильных дизелей показывает, что для проведения ускоренных испытаний ГЦ на надежность необходимо на основании исследовательских испытаний дизеля выбрать правильные циклы нагружения с целью обеспечения автомодельности технического состояния и сходимости результатов ускоренных испытаний с результатами при реальной эксплуатации.

### Литература

1. Биргер И.А. Детерминированные и статистические модели долговечности // Проблемы прочности летательных аппаратов: сборник. Под ред. И.Ф. Образцова, А.С. Вольмира. М.: Машиностроение, 1985. 280 с.
2. Биргер И.А. и др. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1981. 221 с.
3. Прыгунов М.П. Исследование и разработка методики оценки долговечности головок цилиндров тракторных дизелей с воздушным охлаждением: дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2013. 177 с.
4. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
5. Орлин А.С., Чайнов Н.Д., Мосин Ю.С. Температурные напряжения в днище головок цилиндров двигателей внутреннего сгорания // Вестник машиностроения. 1970. № 9. С. 13–15.
6. Орлин А.С., Чайнов Н.Д., Тимофеев В.Е. Напряженное состояние алюминиевой головки цилиндра тракторного двигателя // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1974. № 12. С. 75–78.
7. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. и др. Машиностроение. Энциклопедия. Двигатели внутреннего сгорания. Т. IV–14; под общ. ред. А.А. Александрова и Н.А. Иващенко. М.: Машиностроение, 2013. 784 с.
8. Гоц А.Н., Клевцов В.С. Прогнозирование долговечности головок цилиндров дизелей // Фонда-

ментальные исследования. 2017. № 10. Вып. 3. С. 429–432.

9. Гоц А.Н., Прыгунов М.П., Французов И.В., Клевцов В.С., Сысоев С.Н. Стенд для исследования теплонапряженного состояния головки цилиндров двигателя внутреннего сгорания: патент на полезную модель № 142963, Российская Федерация. Опубликовано 2014. Бюл. № 19.
10. Гоц А.Н., Клевцов В.С. Ускоренные испытания головок цилиндров дизелей // Международный научно-исследовательский журнал «Успехи современной науки». 2017. № 4. Том 4. С. 150–155.

## References

1. Birger I.A. Deterministic and statistical models of the longevity. Problemy prochnosti letatel'nykh apparatov: sbornik [Problems of strength of the aircrafts: collection]. Pod red. I.F. Obraztsova, A.S. Vol'mira. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 280 p.
2. Birger I.A. i dr. Konstruktsionnaya prochnost' materialov i detaley gazoturbinnnykh dvigateley [Structural strength of gas turbine engine materials and parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 221 p.
3. Prygunov M.P. Issledovanie i razrabotka metodiki otsenki dolgovechnosti golovok tsilindrov traktornykh dizeley s vozdushnym okhlazhdeniem: dis. ... kand. tekhn. nauk [Investigation and development of a methodology for an assessment the durability of the heads of cylinder of tractor diesel engines with air cooling: dissertation for a degree of the candidate of technical sciences]. Vladimir, 2013. 177 p.
4. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. Raschet na prochnost' detaley mashin: Spravochnik [The strength calculation of machine parts: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1993. 640 p.
5. Orlin A.S., Chaynov N.D., Mosin Yu.S. Temperature stresses in the bottom of cylinder head of internal combustion engines. Vestnik mashinostroeniya. 1970. No 9, pp. 13–15 (in Russ.).
6. Orlin A.S., Chaynov N.D., Timofeev V.E. Stress state of the aluminum cylinder head of the tractor engine. Izvestiya VUZov. Mashinostroenie. 1974. No 12, pp. 75–78 (in Russ.).
7. Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. i dr. Mashinostroenie. Entsiklopediya. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Mechanical engineering. Encyclopedia. Internal combustion engines]. T. IV–14; Pod obshch. red. A.A. Aleksandrova i N.A. Ivashchenko. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2013. 784 p.
8. Gots A.N., Klevtsov V.S. Prognostication the durability of cylinder heads of diesel engines. Fundamental'nye issledovaniya. 2017. No 10. Vyp. 3, pp. 429–432 (in Russ.).
9. Gots A.N., Prygunov M.P., Frantsuzov I.V., Klevtsov V.S., Sysoev S.N. Stend dlya issledovaniya teplonapryazhennogo sostoyaniya golovki tsilindrov dvigatelya vnutrennego sgoraniya [The bench for the heat stress investigation of the internal combustion engine cylinder head]: patent na poleznuyu model' No 142963, Rossiyskaya Federatsiya. Opublikovano 2014. Byul. No 19.
10. Gots A.N., Klevtsov V.S. Accelerated tests of cylinder heads of diesel engines. Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal «Uspekhi sovremennoy nauki». 2017. No 4. Vol. 4, pp. 150–155 (in Russ.).