

ДВС ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Всеукраинский научно-технический журнал

1'2019

Издание основано Национальным техническим университетом
"Харьковский Политехнический Институт" в 2002 году

Госиздание

Свидетельство Госкомитета информационной политики,
телевидения и радиовещания Украины КВ №6393 от 29.07.2002 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

А.П. Марченко, *д. т. н., проф.*

Заместители главного редактора

С.В. Епифанов, *д. т. н., проф.*

И.В. Парсаданов, *д. т. н., проф.*

Ответственный секретарь

И.В. Рыкова, *к. т. н., с.н.с.*

Ф.И. Абрамчук, *д. т. н., проф.*

А.В. Белогуб, *д. т. н., проф.*

А.Л. Григорьев, *д. т. н., проф.*

И.В. Грицук, *д.т.н., проф.*

Ю.Ф. Гутаревич, *д. т. н., проф.*

Л.П. Клименко, *д. т. н., проф.*

Г.М. Кухаренок, *д. т. н., проф.*

В.А. Пылев, *д. т. н., проф.*

А.П. Поливянчук, *д. т. н., проф.*

А.А. Прохоренко, *д.т.н., проф.*

С. Радковский, *д.н., проф.*

Д.Е. Самойленко, *д.н.*

В. Сенчила, *д.н., проф.*

Б.Г. Тимошевский, *д. т. н., проф.*

Н.А. Ткачук, *д. т. н., проф.*

Х.М. Чо, *д.н., проф.*

Н.Д. Чайнов, *д. т. н., проф.*

СОДЕРЖАНИЕ

РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ДВС

Б.Г. Тимошевський, О.С. Митрофанов

Дослідження параметрів роботи роторно-поршневого двигуна. 3

Т.М. Колеснікова, В. Г. Заренбін, О.П. Сакно, В.П. Олло

Математична модель бензинового двигуна, що працює за циклом Аткинсона. 8

С.О. Ковальов

Камера згоряння газового ДВЗ, конвертованого на базі дизеля для роботи на зрідженому нафтовому газі. 15

А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, А.Г. Лал

Сфера застосування та визначення резервів підвищення ефективності згоряння в опозитних двотактних дизелях із зустрічно-протилежно рухомими поршнями. 21

Е.В. Белоусов, Р.А. Варбанец, В.П. Савчук, И.В. Грицук, В.С.

Вербовский

Исследование процессов топливоподачи в газодизельных малооборотных двухтактных двигателях низкого давления. .27

А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, А.В. Савченко

Моделювання періоду затримки спалаху палива в циліндрі дизеля. 34

КОНСТРУКЦИЯ ДВС

О.В. Триньов, С.С. Кравченко

Дослідження теплового стану циліндрової гільзи з алюмінієвого сплаву. 39

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ ДВС

А. М. Левтеров, В.М. Бганцев

Моторне дослідження впливу мікродомішок водню на показники токсичності малолітражного дизеля. 46

О. Р. Strokov, О. М. Kondratenko, V. Yu. Koloskov,

I. V. Mishchenko

Description of mass hourly emissions of particulate matter of diesel engine by beta-distribution with taking into account the passport accuracy of gas analyzer. 49

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДВС

С.А. Дмитриев, А.Э. Хрулев

Некоторые аспекты повышения выходных параметров ДВС при модернизации в условиях серийного производства. 63

О.О. Осетров, Є.І. Жуковський

Визначення кількості та послідовності відключення циліндрів стаціонарного дизель-генератора на експлуатаційних режимах. 73

АДРЕС РЕДКОЛЛЕГИИ

61002, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2

НТУ «ХПИ», кафедра ДВС

Тел. (057)707-68-48, 707-60-89

E-mail: rykova@kpi.kharkov.ua,

dvs@kpi.kharkov.ua

С.А. Дмитриев, А.Э. Хрулев

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВС ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Выполнен анализ особенностей и способов модернизации серийных ДВС, проводимой с целью повышения выходных параметров. На конкретных примерах показано, что стремление производителей двигателей к улучшению характеристик при одновременной минимизации затрат нередко приводит к неоправданно высокому риску неконтролируемого изменения нагрузок на детали, когда после модернизации заметно ухудшается качество и надежность продукции. При этом наиболее опасными вариантами модернизации следует считать так называемое масштабирование, при котором производится небольшое повышение выходных параметров при сохранении неизменной конструкции и геометрии основных деталей, что обычно принято выполнять без проведения комплекса необходимых исследований и испытаний или, как минимум, без моделирования нагрузок на детали с целью определения критических сечений и возможного их усиления. Приведены примеры модернизации двигателей путем масштабного увеличения размеров деталей и повышения давления наддува, а также ее последствия, вызывающие различные повреждения и разрушения основных деталей, что связано с превышением допустимого уровня нагрузок. С целью недопущения снижения надежности модернизированных серийных двигателей при исключении неоправданно высоких затрат выполнена оценка возможных способов модернизации. Предложен общий подход к моделированию нагрузок на основные детали модернизированных серийных ДВС, приведены основные результаты моделирования напряженно-деформированного состояния поршня, поршневого пальца и шатуна. Получены данные, позволяющие выявить опасные сечения, в которых наблюдаются локально высокие напряжения, повышающие риск усталостного разрушения деталей при повышении нагрузок. На основании полученных результатов даны рекомендации по практическому применению вычислительного эксперимента при проведении модернизации серийных ДВС.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; модернизация; повышение мощности; усталостное разрушение; моделирование; вычислительный эксперимент; напряженно-деформированное состояние.

Постановка проблемы

Известно, что в серийном производстве транспортных средств различного назначения нередко возникает необходимость улучшения характеристик двигателей, в том числе, повышением их выходных параметров. Это часто диктуется изменениями на рынке, которые невозможно было предусмотреть при длительном проектировании, доводке и постановке двигателя на производство. В результате через некоторое время после начала выпуска производитель уже хочет повысить параметры серийного ДВС, который постепенно перестал удовлетворять потребностям рынка.

С другой стороны, понятно, что серийно выпускаются полностью рассчитанные, смоделированные, испытанные и доведенные образцы, для производства которых были отработаны технологии, приобретено необходимое оборудование. То есть, в производство были инвестированы значительные средства, и любое его изменение на данной стадии может повлечь за собой дополнительные и не всегда оправданные затраты.

В таком случае фактически возникает противоречие между условиями производства, связанными с невозможностью или чрезмерно большой стоимостью изменений в серийной продукции, и требованиями рынка, когда необходимость внесения таких изменений, тем не менее, имеется.

Чтобы разрешить такое противоречие, производители решают данную проблему различным

образом. Так, вполне естественно выглядит желание повысить параметры двигателя без перепроектирования и последующих серьезных изменений в конструкции и технологии. При этом проведение повторных разработок и доводочных испытаний для уже находящегося в серийном производстве изделия явно неэффективно, поскольку любая такая переделка оказывается чрезмерно дорогостоящим мероприятием. Однако попытки минимизировать усилия и затраты, как показывает практика, далеко не всегда оказываются успешными.

Цель данной работы – показать возможный общий подход к модернизации (повышению параметров) ДВС в условиях серийного выпуска без перепроектирования и фактического создания нового двигателя.

Некоторые особенности и проблемы модернизации серийных ДВС на практике.

На практике модернизация может выглядеть по-разному. Например, для атмосферных ДВС во многих известных случаях производитель выбирает один из двух следующих путей модернизации с целью повышения выходных параметров, в том числе:

- 1) увеличение рабочего объема увеличением диаметра цилиндра и/или хода поршня,
- 2) повышение наполнения цилиндров при неизменном рабочем объеме (например, увеличением количества клапанов).

Нетрудно видеть, что первый путь, а он явля-

ется одним из самых популярных, реализуется в виде своего рода масштабирования, т.е. некоторого увеличения размеров отдельных деталей. Это делается с помощью замены части деталей на новые, среди которых могут быть не только поршневая группа и коленвал, но и головка цилиндров и даже блок цилиндров. При этом конструкция двигателя в целом и его узлов и агрегатов обычно остается неизменной.

Однако такой путь не только технически сложный, но и весьма затратный. Если основные детали будут заменены, то фактически речь пойдет о создании и производстве нового двигателя, который может быть сделан тоже несколькими способами. Например, мало только заново спроектировать новый двигатель – скорее всего, потребуется выполнить его доводку в таком же полном объеме, что и для уже отлаженного прототипа. А это слишком дорого.

Можно также попытаться сделать двигатель подобным прототипу. То есть, исходить из простой и очевидной формулы: давайте повысим мощность только чуть-чуть, на 5-10% – и ничего не будет страшного. Действительно, у каждой детали серийного прототипа есть достаточные запасы усталостной прочности, которые обычно составляют 1,3-1,5 и даже более. Тогда, повысив параметры строго контролируемым образом, можно найти искомый компромисс между стоимостью модернизации, ее надежностью и эффективностью.

Но в таком подходе к модернизации двигателей скрывается опасность. В самом деле, ДВС, прошедший полный цикл моделирования, испытаний и доводки при одних параметрах, не факт, что будет нормально работать, если провести экстраполяцию на немного увеличенные размеры и несколько более высокие нагрузки. И если что-то оказалось не так, возможны ускоренные износы и даже усталостные поломки в наиболее слабых местах конструкции.

Тем не менее, примеры масштабирования с целью создания подобных двигателей на практике не редкость. Так, один из достаточно известных производителей автомобилей малого класса через 3 года после начала выпуска хорошо отработанного и доведенного двигателя объемом 1,3 л приступил к производству модернизированного на его базе двигателя объемом 1,5 л. Увеличение объема повлекло за собой новый блок и головку цилиндров, клапаны, коленчатый вал и поршни с кольцами.

Однако полученная прибавка в 14 л.с. сказалась на надежности и долговечности нового двигателя далеко не самым лучшим образом. Например, выяснилось, что блок с увеличенным диаметром

цилиндров и высотой не столь доведен, как его прототип – его жесткость получилась заметно меньше, а изнашивание цилиндро-поршневой группы – намного быстрее и сильнее. В результате ресурс модернизированного двигателя заметно, на 25-30%, снизился.

Или такой пример. Известный мировой производитель через несколько лет после начала выпуска одной из популярных моделей автомобиля малого класса в дополнение к базовому двигателю 1,5 л начал выпуск и модифицированного двигателя 1,8 л. При этом модернизация была выполнена, главным образом, за счет увеличения диаметра цилиндра.

Через сравнительно небольшое время после начала продаж обновленной модели автомобиля с модифицированным двигателем производитель оказался практически завален претензиями дилеров и покупателей. Причем настолько, что был вынужден срочно заказать производство поршневых групп двух ремонтных размеров, а это само по себе является большой редкостью (многие производители предпочитают вообще не заниматься поставками двигательных комплектующих ремонтных размеров, разрешая это только независимым производителям и только после 7-10 лет с начала производства модели).

Причиной претензий к модернизированному двигателю стал чрезмерный расход масла, который катастрофически быстро возрастал уже при пробеге 50-60 тыс.км. И это при том, что у базового варианта двигателя никаких проблем с расходом масла не возникало вплоть до 200-250 тыс.км пробега.



Рис. 1. Результат неудачной модернизации двигателя - из-за деформации цилиндра поршень после сравнительно небольшой наработки уже настолько сильно изношен, что практически выработал свой ресурс

Другими словами, ресурс модернизированного двигателя уменьшился в 5 раз. Причина неис-

правности была обнаружена (рис.1), но не сразу. Вначале выяснилось, что проблема локализована в 4-м цилиндре, где наблюдалось ускоренное изнашивание рабочих поверхностей сопряженных деталей. Затем удалось определить, что при затягивании одного из верхних болтов крепления коробки передач происходит заметная деформация 4-го цилиндра – его овальность могла превышать рабочий зазор поршня в цилиндре. А дальше нашлась и сама причина – модернизация путем увеличения диаметра цилиндра фактически "приблизила" этот болт к поверхности цилиндра на недопустимо близкое расстояние.

Минимизация затрат на модернизацию и ее последствия

Приведенные примеры показывают, что выполнить модернизацию путем некоторого масштабирования двигателя может быть не только сложно технически, но и опасно непрогнозируемым снижением ресурса и надежности. А проводить большой объем конструкторских работ и испытаний экономически нецелесообразно. Вот почему на практике постепенно получили распространение более простые способы модернизации. Они продолжают и дополняют указанные выше и включают:

3) изменение настроек топливоподачи (правда, этот путь используется редко, поскольку имеет жесткие ограничения по экологическим соображениям),

4) повышение давления наддува (для двигателей с наддувом).

Оба этих способа объединяет то, что они реализуются путем изменений в системе управления, т.е. на программном уровне. А это значит, что никаких специальных двигателей строить уже не надо – модернизация не отражается на конструкции базового прототипа и воздействует только на управление им.

Важно отметить, что в современном двигателестроении наблюдается постепенное и все более широкое распространение турбонаддува. Если еще лет 20-25 назад турбонаддув повсеместно внедрялся на малолитражные дизели, то теперь это захватило и сегмент бензиновых ДВС с искровым зажиганием. И именно здесь и кроются самые серьезные резервы повышения параметров.

В самом деле, практика показывает, что достаточно лишь немного увеличить давление наддува, как двигатель сразу "оживает" и заметно "прибавляет". А поскольку все системы ДВС, включая турбокомпрессор, давно управляются электронно, для повышения мощностных характеристик ничего, кроме изменений в программе управления, вроде и

не требуется. Тем более, если у базового прототипа всегда есть некоторый запас прочности. Но вопрос в том, имеется ли он на самом деле.

И действительно, примеры непродуманных модернизаций, которые не только очень легко было выполнить, но и так же легко можно было предвидеть их последствия, тем не менее, находят практическое подтверждение. По крайней мере, то, к чему приводят подобные "эксперименты" некоторых производителей, хорошо иллюстрирует пример ниже.

Базовый бензиновый двигатель V6 2,8 л с турбонаддувом был изначально установлен на серийный автомобиль бизнес-класса и имел мощность всего только 230 л.с. Поскольку удельная мощность такого двигателя (80 л.с./л) была совсем невысока, уже через год производитель провел модернизацию, повысив его мощность до 240 л.с., а еще через 2 года – до 260 л.с.

Но этого оказалось мало, и к случившемуся как нельзя кстати юбилею производителя была выпущена топ-версия двигателя мощностью 280 л.с. А уже на следующий год на одну из представительских моделей производителя пошел все тот же двигатель, но мощностью уже... 300 л.с. Другими словами, за несколько лет мощность серийного двигателя выросла на 30%! Причем, все эти модернизации происходили исключительно путем повышения давления наддува, не затрагивая ни единой внутренней детали двигателя.



Рис. 2. Усталостное разрушение поршня по избыткам (трещина распространялась от концентратора напряжений в отверстии под палец - края масляного кармана на внутренней поверхности отверстия) вследствие чрезмерных нагрузок, вызванных непродуманной модернизацией серийного двигателя

Рассматривая историю этой модернизации, невольно возникает такая картина. Некий двига-

тель, серийно выпускаемый в течение несколько лет, подвергается некоторой незначительной модернизации, повышающей мощность всего на какие-то 4-5%. Но после того, как модернизация уже проведена, специалисты, ее проводившие, больше не работают на предприятии. Поэтому очередная 2-я модернизация проводится новой группой специалистов, не знакомых с прошлыми работами - как бы от нулевого уровня исходных параметров.

Но исходные параметры уже не нулевые. В результате 2-я модернизация, хотя и повышает мощность только на 7-8%, на самом деле дает 13% от исходного уровня, а это много. Следующая, 3-я модернизация – это еще "чуть-чуть", те же 7-8% от предыдущей, но уже 22% от исходного базового двигателя (как будто и она проведена новой группой специалистов, не знакомых с предыдущими работами своих предшественников). И так далее.

Закончился этот "эксперимент" достаточно закономерно и ожидаемо - на большинстве новых моделей 300-сильные двигатели начали массово выходить из строя по причине усталостного разрушения поршней (рис. 2 и 3). Причем производитель даже не сразу признал ошибку, попытавшись вначале "свалить" проблему на некое несоответствующее топливо [2]. Однако затем был вынужден менять двигатели на почти новых автомобилях по гарантии, одновременно переписывая программу управления с целью их дефорсирования и снижения нагрузок на детали.

Приведенный пример со всей очевидностью показывает, что некоторые производители, предпочитая использовать наиболее простые способы модернизации серийно выпускаемых двигателей с целью минимизации собственных затрат, проводят модернизацию своей продукции в условиях серийного производства без проведения необходимых исследований и без оценки последствий своих действий.

Судя по результатам этой деятельности, такой способ вызван нежеланием повышать себестоимость серии, поэтому никаких сколько-нибудь серьезных исследований и не делается. А это прямо ведет к снижению надежности и долговечности, в том числе, уже давно доведенной и проверенной продукции. Фактически происходит ухудшение качества (порча) продукции, в том числе, высокого качества, в угоду сиюминутным потребностям рынка и желанию им соответствовать - как будто сложная работа по модернизации двигателей доверена маркетологам, весьма далеким от технической стороны дела.

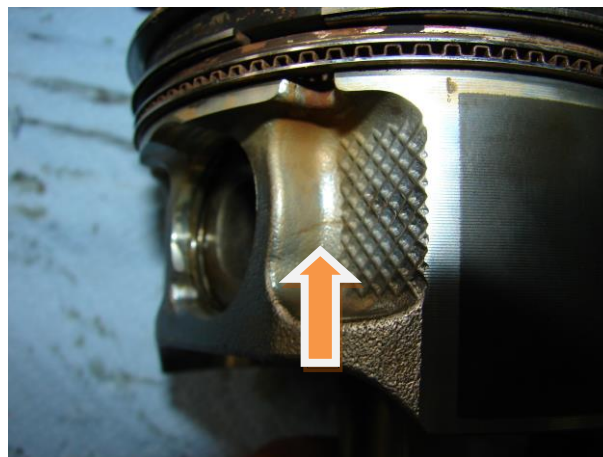


Рис. 3. Место образования усталостной трещины на наружной (вверху) и внутренней (внизу) поверхности соседнего с приведенным на рис.2 поршня у его бобышки в результате действия нерасчетных нагрузок вследствие непродуманной модернизации двигателя

Описываемые события в целом напоминают и о другой проблеме, связанной с так называемым "тюнингом" двигателя. Это тот случай, когда владелец автомобиля использует точно такой же способ модернизации двигателя, но уже в эксплуатации транспортного средства. Разница между описанным выше "заводским" и "самодельным" тюнингом лишь в том, что производитель имеет возможности хотя бы исследовать двигатель и проверить, в той или иной степени, к чему могла привести модернизация, в то время как владелец полностью лишен этой возможности.

С другой стороны, современные автомобильные ДВС, в отличие от двигателей прошлых поколений, давно уже не имеют больших запасов прочности основных деталей. Это вполне объяснимо – любой лишний запас означает неоправданно завышенную себестоимость массового производства. Поэтому перейти допустимую грань становится

достаточно просто. То есть, в результате самодеятельного и практически неконтролируемого "накручивания" мощности, даже незначительного, легко получить усталостную поломку одной из тяжело нагруженных деталей.

На рис.4 показан типичный результат самодеятельного "тюнинга" бензинового двигателя с турбонаддувом – усталостная трещина днища вдоль оси поршневого пальца. Такая трещина возникает вследствие недостаточной жесткости конструкции поршня в результате действия на днище циклических изгибающих нагрузок от чрезмерного давления газов в цилиндре при опоре поршня на поршневой палец (рис.5).



Рис. 4. Типичное повреждение поршня вследствие нештатного повышения давления наддува – трещина днища по оси поршневого пальца, характерная для самодеятельного нештатного "тюнинга" двигателя

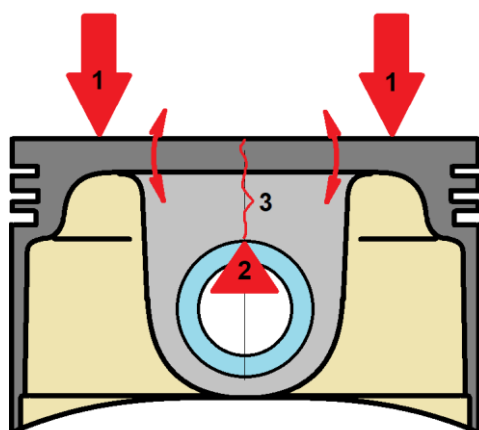


Рис. 5. Схема нагружения поршня циклическими нагрузками от давления газов: 1- силы давления, 2- опора бобышки на поршневой палец, 3- усталостная трещина

Характерно, что разрушению данного вида подвержены двигатели всех типов – и бензиновые, и дизельные (рис.6). Кроме того, в подавляющем большинстве случаев оно связано именно с "тюнингом" двигателя, выполненным в эксплуатации автомобиля [1,4,5]. Вследствие этого на практике при исследовании причин неисправности такое разрушение можно считать прямым признаком выполнения работ по внесению нештатных изменений в конструкцию двигателя, что, в частности, оказывается веским основанием для прекращения действия гарантий на транспортное средство в гарантийный период.



Рис. 6. Трещина в днище дизельного поршня, проходящая вдоль оси пальца - один из признаков нештатного повышения давления наддува в результате "тюнинга" двигателя

Вместе с тем, следует отметить, что при модернизации двигателя опасные перегрузки могут возникнуть не только у поршня, но и у других деталей, в частности, поршневых пальцев и шатунов. Например, конструктивные особенности пальцев, а именно, наличие галтелей – мест резкого перехода от одного диаметра к другому (рис.7), внутри отверстия может вызвать усталостное разрушение пальца.

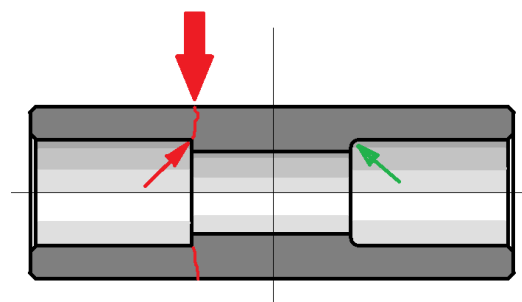


Рис. 7. Схема усталостного (поперечного) разрушения поршневого пальца при распространении трещины от галтели на внутренней поверхности отверстия

Действительно, известны случаи, когда простое использование производителями при модернизации двигателей путем повышения их мощности тех же поршневых пальцев, что и у доведенного ранее базового прототипа, приводило к их усталостному разрушению (рис.8). Такой вид разрушения чрезвычайно опасен, поскольку приводит к наиболее тяжелым повреждениям и последующей неремонтопригодности двигателя [6].

Все указанные выше примеры свидетельствуют о том, что при модернизации двигателей с целью повышения выходных параметров опасность возникновения неисправностей, связанных с перегрузкой деталей, неизбежно возрастает. Для решения проблемы, по логике вещей, следует или вообще отказаться от модернизации, или проводить ее со всеми необходимыми исследованиями и доводкой, как это делается для вновь создаваемого двигателя.

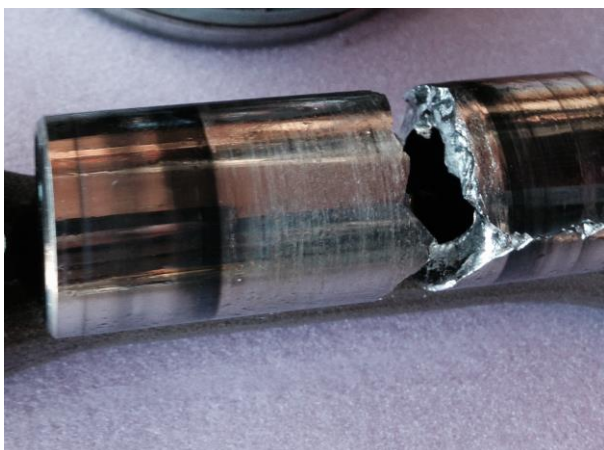


Рис. 8. Пример усталостного разрушения поршневого пальца

Вместе с тем, очевидно, что подобные крайние способы, предполагающие гарантированную надежность модернизированного двигателя, с точки зрения затрат будут в любом случае неудачны и неэффективны. Поэтому возникает резонный вопрос – нельзя ли все-таки минимизировать эти затраты, сохранив при этом приемлемую надежность модернизированного двигателя?

Возможный способ "контролируемой" модернизации двигателей и особенности его реализации

Для того, чтобы избежать ухудшения качества при минимальных затратах, если модернизация двигателя все же необходима, требуется, в первую очередь, проанализировать причины разрушения деталей при превышении нагрузок. Понятно, что речь идет об усталости, вызванной ростом напря-

жений в неких "слабых" местах конструкции. Другими словами, необходимо выявить наиболее слабые места у деталей при самых обычных рабочих нагрузках – ведь совершенно ясно, что при дальнейшем увеличении нагрузок с ростом мощности деталь начнет разрушаться именно в тех сечениях, где напряжения максимальны.

Для того, чтобы определить эти сечения, очевидно, следует выполнить моделирование нагрузок самых обыкновенных серийных деталей, чтобы затем определить напряжения и деформации в них – так называемое напряженно-деформированное состояние. Эти данные необходимы для определения опасных сечений и возможных изменений в детали с целью уменьшения действующих сил в опасных сечениях.

Обычно такое моделирование, выполняемое вместо задач проектирования, не представляет больших трудностей, поскольку существует ряд соответствующих программ, позволяющих это сделать. В данном исследовании использовалась программа ANSYS [7-11].

В качестве примера были выбраны детали реального двигателя – поршень, поршневой палец и шатун, на которые приходится основная часть дополнительных нагрузок при модернизации любого двигателя с целью увеличения его мощности.

Действующие на детали нагрузки (рис.9) определялись путем расчета цикла ДВС с помощью программы Lotus Engine Simulation [12], далее полученные диаграммы сил использовались для задания граничных условий при расчете напряженно-деформированного состояния деталей.

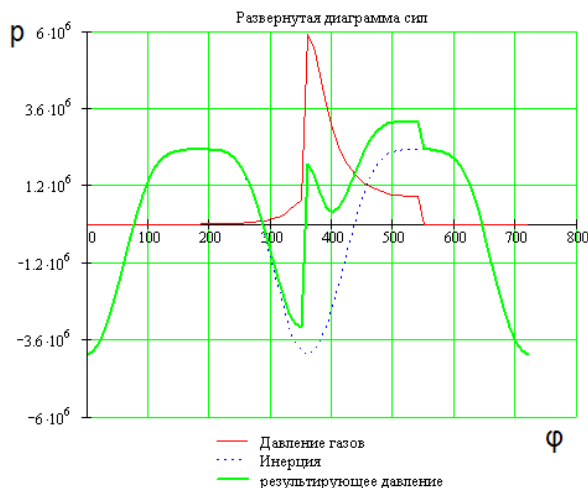


Рис. 9. Определение сил, действующих на поршень при работе ДВС

Расчет выполнялся в несколько этапов. Сначала создавалась математическая модель, представляющая собой сетку трехмерных конечных элементов (рис.10). После этого для теплонапря-

женных деталей (поршень) необходимо было учесть такие факторы, как температурные деформации и зависимость свойств материала от температуры [8,9]. Поэтому путем моделирования процессов определялось распределение температуры по сечениям поршня (для шатуна и поршневого пальца температурные деформации не учитывались).

В расчетах приближенно учитывался характер теплообмена, в частности, конвективный теплообмен с внешней стороны поршня - подвод тепла к днищу от газов, и контактный теплообмен - отвод тепла от канавок колец и юбки, в то время как конвективным теплообменом с внутренней стороны поршня и теплопередачей теплопроводностью в поршневой палец и шатун в 1-м приближении пренебрегалось.

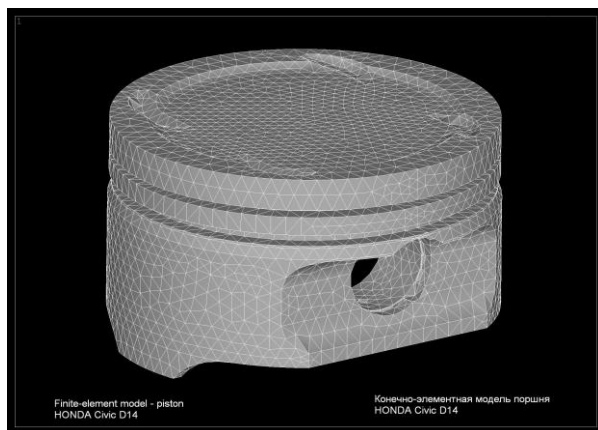


Рис. 10. Математические модели поршня (вверху) и шатуна (внизу), полученные путем разбиения деталей на конечные элементы

Полученное температурное поле (рис.11) вводилось в расчеты напряженно-деформированного состояния, в ходе которого рассчитывались температурные напряжения и деформации, причем одновременно учитывалась зависимость свойств материала от температуры. Затем на полученные данные накладывалось силовое воздействие сил инер-

ции и давления газов, полученных при расчете цикла ДВС, что позволяло получить результирующую картину напряжений и деформаций детали.

Результаты моделирования показали, что все исследованные детали имели сечения с локально повышенными напряжениями. Такие участки были условно названы критическими, поскольку именно в таких местах следует ожидать возникновения усталостных трещин в случае, если нагрузки на эти детали были бы повышены в результате модернизации двигателя.

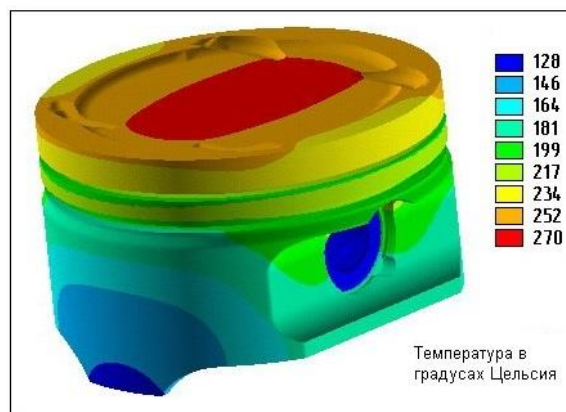


Рис. 11. Температурное поле поршня, полученное при задании граничных условий теплообмена со стенкой цилиндра

Так, еще только на предварительном этапе расчета температурных напряжений и деформаций было установлено, что исследуемый поршень имеет критическое сечение - это полка под канавкой маслоъемного кольца (рис.12) непосредственно над отверстием под палец.

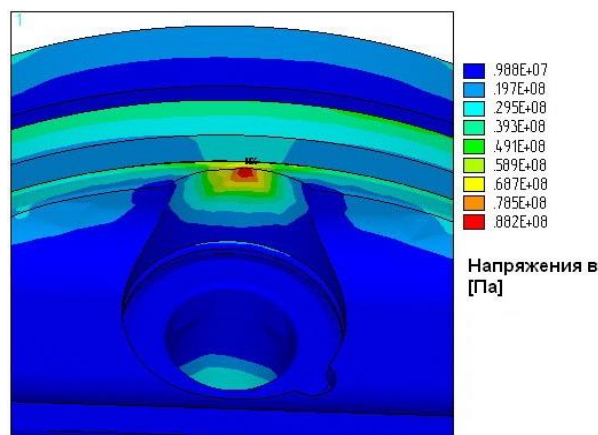


Рис. 12. Напряжения от внутренних сил при термическом расширении поршня - критическое сечение обнаружено в тонкой полке под канавкой маслоъемного кольца

Наличие тонкого сечения полки (толщина в данном месте составила 1,2 мм) обусловлено стремлением конструкторов к уменьшению высоты поршня. Опыт эксплуатации и ремонта большого

числа двигателей подтверждает полученный результат - известны не только случаи образования трещин в этом сечении, но и примеры мероприятий по их исключению (в некоторых двигателях поршни имеют вырез полки в этом месте).

Критические сечения были выявлены и у шатуна. Так, при нагружении стержня сжимающей нагрузкой такие места были обнаружены на внешних краях ребер на переходе от кривошипной головки к стержню (рис.13).

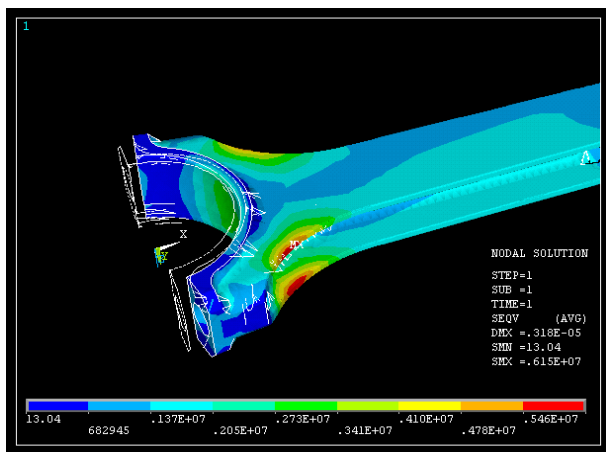


Рис. 13. Моделирование сжатия вдоль стержня шатуна выявляет критические сечения у кривошипной головки шатуна на ребрах в местах перехода от головки к стержню

Растягивающие усилия на стержень вызвали аналогичную картину вблизи поршневой головки шатуна (рис.14). Имеющийся опыт подтверждает полученные результаты - действительно, разрушения стержня шатуна в эксплуатации наиболее характерны именно для этих сечений [1,3,6].

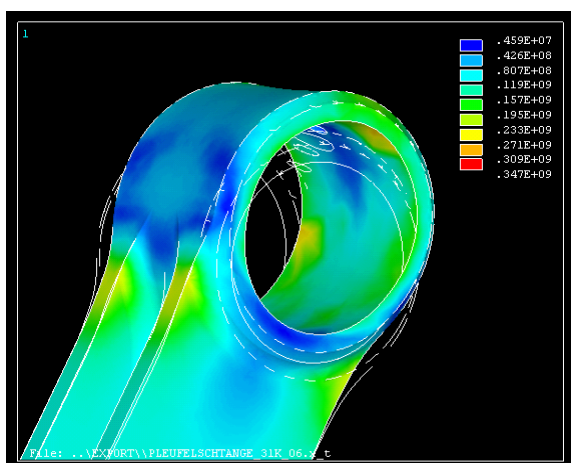


Рис. 14. Моделирование растяжения шатуна указывает на наличие критических участков вблизи поршневой головки

Однако наиболее опасные сечения в рамках данного исследования были обнаружены в крышке стандартного шатуна (рис.15). Выяснилось, что

нагружение крышки моделирующей распределенной нагрузкой от вкладыша подшипника выявляет явно критические сечения конструкции в зоне переходов (галтелей) от опорной плоскости для головок болтов. Причем, при моделировании усилия затяжки болтов локальные напряжения в критических сечениях еще больше увеличились.

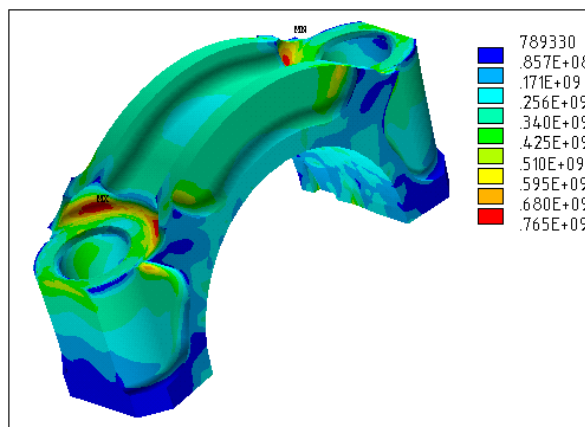


Рис. 15. Критическое сечение крышки шатуна, обнаруженное при моделировании

Совершенно ясно, что использовать шатун такой конструкции для модернизированного двигателя, от которого планируется получить более высокую мощность, чем у стандартного, опасно - крышка шатуна явно требует доработки (как минимум, увеличения радиуса галтелей). Причем этот результат моделирования вполне соответствует практике, когда были отмечены случаи разрушения крышки шатуна по указанным опасным сечениям при сравнительно высоком форсировании двигателей.

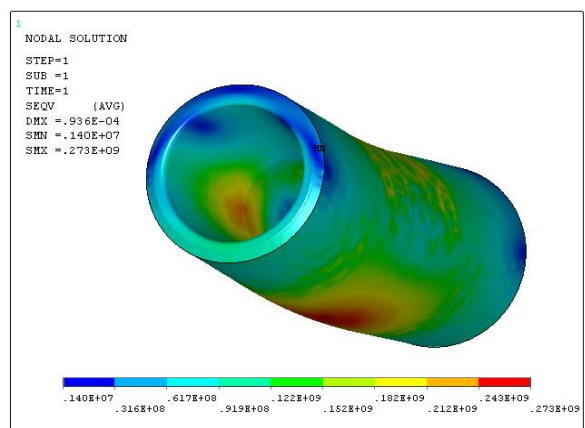


Рис. 16. Критическое сечение, выявленное на внутренней поверхности поршневого пальца в зоне перехода от цилиндрической поверхности к конической

Расчет напряженно-деформированного состояния для сборки из двух деталей – шатуна и поршневого пальца был выполнен при задании в сопряжении поршня и поршневого пальца давления в

виде нагрузки, распределенной по длине и окружности. При моделировании нагрузок опасные сечения ожидаемо были обнаружены в местах перехода между цилиндрической и конической внутренними поверхностями около кромок отверстия поршневой головки шатуна (рис.16).

Поскольку разрушение поршневого пальца при модернизации двигателей не является редкостью, моделирование нагрузок позволяет выбрать два варианта доработок пальца в случае обнаружения опасных сечений - увеличение радиуса галтели между поверхностями и/или смещение этого сечения дальше от кромок отверстия поршневой головки шатуна.

Проведенные исследования показали, что самый вычислительный эксперимент по расчёту напряжённо-деформированного состояния вышеприведенных моделей с числом элементов около 30.000 на современном персональном компьютере занимает не более 1-2 минут. При этом подготовка вычислительного эксперимента при наличии готовой трёхмерной модели занимает 15-20 минут, а обработка результатов расчёта – еще 30-40 минут в зависимости от поставленной задачи. То есть, общее время исследования одной детали не превышает, таким образом, одного часа работы.

Другими словами, нет и не может быть никакой сложности в проведении подобных вычислительных экспериментов при модернизации двигателя. Понятно, что вследствие принятых упрощений при постановке граничных условий поле напряжений в исследованных деталях может не полностью соответствовать действительности, что указывает на оценочный характер расчетов. Тем не менее, даже самые предварительные результаты уже способны дать информацию о возможных последствиях модернизации двигателя. Тем самым, модернизация может превратиться из опасной авантюры с неясными для качества продукции последствиями во вполне контролируемый процесс, не требующий значительных затрат.

В соответствии с этим, в зависимости от полученных результатов, а также характера выполняемой модернизации, особенностей и режимов эксплуатации, могут быть намечены и конкретные практические мероприятия по повышению усталостной прочности деталей, в том числе:

1) обработка радиусов переходов и галтелей (полировка, суперфиниш), если вычислительный эксперимент показывает повышенный уровень напряжений, а применяемый способ механической обработки дает грубую поверхность,

2) увеличение радиусов переходов и галтелей, если эксперимент показывает явно высокий уро-

вень напряжений в них, когда дополнительная полировка может оказаться недостаточной для повышения усталостной прочности,

3) увеличение толщины сечений в случае наиболее высоких локальных напряжений.

Характерно, что все эти доработки могут быть выполнены в условиях серийного производства без перепроектирования двигателя и серьезной перенастройки оборудования, поскольку указанные мероприятия не носят принципиального характера, оставляя неизменными материал, заготовки деталей, виды и режимы химико-термической обработки и прочие технологические факторы.

Заключение

Современные компьютерные модели при правильном подходе позволяют решать не только задачи проектирования новых ДВС, но и выявлять слабые места у давно выпускаемых двигателей с целью определения возможности повышения их выходных параметров в серии. Выполненное исследование показывает, что при моделировании напряженно-деформированного состояния деталей даже приближенных вычислений может быть вполне достаточно для прогнозирования последствий модернизации без больших затрат на перепроектирование и/или внесение серьезных изменений в технологию производства.

Список литературы:

1. Greuter E. *Engine Failure Analysis. Internal Combustion Engine: Failures and Their Causes [Text]* / Greuter E., Zima S. // SAE International, R-320, ISBN 978-0-7680-0885-2. Warrendale, USA. - 2012. - 582 p. 2. P.Stenquist. *Can Using the Wrong Octane Fuel Lead to Disaster?* [Электронный ресурс], New York Times, 30.03.2010, <https://wheels.blogs.nytimes.com/2010/03/30/can-using-the-wrong-octane-fuel-lead-to-disaster/>. 3. Хрулев А.Э. *Ремонт двигателей зарубежных автомобилей [Текст]* / А.Э.Хрулев // М.: Изд-во "За Рулем". - 1998. - 480 с. 4. *Piston damage – recognizing and rectifying. 4th Edition [Text]* MSI Motor Service International GmbH, Neckarsulm, Germany. - 2014. - 92 p. 5. *Piston Damage – Causes and Remedies [Text]* MAHLE GmbH, Stuttgart. - 1999. - 66 p. 6. Хрулев А. *Экспертиза технического состояния и причины неисправности автомобильной техники [Текст]* / А.Хрулев, С.Лосавио, В.Дроздовский // М.: Издательство АБС. - 2019. - 966 с. 7. ANSYS. *Theory Reference. Release 5.6 [Text]* / Edited by Peter Kohnke, Ph.D // ANSYS Inc., Canonsburg, PA 15317. - 1999. - 1286 p. 8. Денисов М.А. *Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование: учебное пособие [Текст]* / М.А.Денисов // Екатеринбург: УрФ. - 2011. - 149 с. 9. *Решение задач теплообмена. Ansys 5.7 Thermal Analysis Guide [Текст]* / Перевод с англ. Югов В.П. // Москва, CADFEM. - 2001. - 108 с. 10. Сегерлинд Л. *Применение метода конечных элементов [Текст]* / Л.Сегерлинд // М.: "Мир". - 1979. - 392 с. 11. Басов К.А. *ANSYS в примерах и задачах [Текст]* / Под общей редакцией Д.Г.Красковского // М.: Изд-во "КомпьютерПресс". - 2002. - 224 с. 12. Duleba V. *Simula-*

tion of Automotive Engine in Lotus Simulation Tools [Текст] / В.Дулеба // Transfer inovacii 30/2014, p.48-52.

Bibliography (transliterated):

1. Greuter E. (2012), "Engine Failure Analysis. Internal Combustion Engine: Failures and Their Causes", SAE International, USA, 582 p.
 2. Stenquist P. (2010), "Can Using the Wrong Octane Fuel Lead to Disaster?" New York Times, available at: <https://wheels.blogs.nytimes.com/2010/03/30/can-using-the-wrong-octane-fuel-lead-to-disaster/>.
 3. Khrulev A.E. (1998), "Repair of foreign cars engines" [Remont dvigatelei inostrannykh avtomobilei, Izdatelstvo "Za Rulem"], Publishing house "Za Rulem", Moscow, 480 p.
 4. "Piston damage – recognizing and rectifying" (2014), 4th Edition, MSI Motor Service International GmbH, Neckarsulm, Germany, 92 p.
 5. "Piston Damage – Causes and Remedies" (1999), MAHLE GmbH, Stuttgart, Germany, 66p.
 6. Khrulev A. (2019), "Examination of the technical condition and the causes of malfunctions of vehicle en-

gines" [Expertiza tekhnicheskogo sostoyania i prichini neispravnosti avtomobilnoi tekhniki, OOO Izdatelstvo ABS], OOO Publishing house ABS, Moscow, 966 p.
 7. "ANSYS. Theory Reference" (1999), Release 5.6, ANSYS Inc., Canonsburg, 1286 p.
 8. Denisov M.A. (2011), "Mathematical modeling of thermophysical processes. ANSYS and CAE-design: study guide" [Matematicheskoe modelirovaniye teplofizicheskikh processov. ANSYS i CAE-proektirovaniye], UrFU, Ekaterinburg, 149 p.
 9. "Solving heat transfer problems. Ansys 5.7 Thermal Analysis Guide" (2001) [Reshenie zadach teploobmena], CADFEM, Moscow, 108 p.
 10. Segerlind L. (1979), "Application of the finite element method" [Primeneniye metoda konechnykh elementov, Izdatelstvo "Mir"], Publishing house "Mir", Moscow, 392 p.
 11. Basov K.A. (2002), "ANSYS in examples and problems" [ANSYS v primerakh i zadachah, Izdatelstvo "Komputerpress"], Publishing house "Komputerpress", Moscow, 224 p.
 12. Duleba B. (2014), "Simulation of Automotive Engine in Lotus Simulation Tools", Transfer inovacii, No. 30, pp. 48-52.

Поступила в редакцію 01.06.2019 з.

Дмитриев Сергей Алексеевич - доктор технических наук, профессор, директор Учебно-научного аэрокосмического института Национального авиационного университета, e-mail: sad@nau.edu.ua.

Хрулев Александр Эдуардович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Киев, Украина, ORCID: 0000-0002-6841-9225, e-mail: alo.engine@gmail.com.

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ ДВЗ ПРИ МОДЕРНІЗАЦІЇ В УМОВАХ СЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

С.О.Дмитрієв, О.Е.Хрулев

Виконано аналіз особливостей і способів модернізації серійних ДВЗ, що проводиться з метою підвищення вихідних параметрів. На конкретних прикладах показано, що прагнення виробників двигунів до поліпшення характеристик при одночасній мінімізації витрат нерідко призводить до не виправдано високого ризику неконтрольованої зміни навантажень на деталі, коли після модернізації помітно погіршується якість і надійність продукції. При цьому найбільш небезпечними варіантами модернізації слід вважати, так зване, масштабування, при якому проводиться невелике підвищення вихідних параметрів при збереженні незмінної конструкції і геометрії основних деталей, що зазвичай прийнято виконувати без проведення комплексу необхідних досліджень і випробувань або, як мінімум, без моделювання навантажень на деталі з метою визначення критичних перерізів і можливого їх посилення. Наведені приклади модернізації двигунів шляхом масштабного збільшення розмірів деталей і підвищення тиску наддуву, а також її наслідки, що викликають різні пошкодження і руйнування основних деталей, які пов'язані з перевищенням допустимого рівня навантажень. З метою недопущення зниження надійності модернізованих серійних двигунів і отримання не виправдано високих витрат виконано оцінку можливих способів модернізації. Запропоновано загальний підхід до моделювання навантажень на основні деталі модернізованих серійних ДВЗ, наведені основні результати моделювання напружено-деформованого стану поршня, поршневого пальця і шатуна. Отримано дані, що дозволяють виявити небезпечні перетини, в яких спостерігаються локально високі напруги, що підвищують ризик втомного руйнування деталей при підвищенні навантажень. На підставі отриманих результатів надано рекомендації щодо практичного застосування обчислювального експерименту при проведенні модернізації серійних ДВЗ.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання; модернізація; підвищення потужності; утомлююче руйнування; моделювання; обчислювальний експеримент; напружено-деформований стан.

SOME ASPECTS OF IMPROVING OF ICE OUTPUT PARAMETERS DURING MODERNIZATION IN THE CONDITIONS OF SERIAL PRODUCTION

S.A.Dmitriev, A.E. Khrulev

The analysis of the features and methods of modernization of serial internal combustion engines was carried out in order to increase the output parameters. With specific examples, it is shown that the desire of engine manufacturers to improve performance while minimizing costs often leads to an unreasonably high risk of uncontrolled changes in the loads on parts, when after upgrading the quality and reliability of products deteriorates. At the same time, the most dangerous variants of modernization should be considered the so-called scaling, which produces a slight increase in output parameters while maintaining the same structure and geometry of the main parts, which is usually done without necessary research and testing or, at least, without modeling loads on parts the purpose of determining the critical sections and their possible amplification. Examples of modernization of engines by increasing the size of parts and increasing the boost pressure, as well as its consequences, causing various damage and destruction of the main parts, which is associated with exceeding the permissible level of loads, are done. In order to prevent a reduction in the reliability of upgraded production engines with the exclusion of unnecessarily high costs, an assessment was made of possible ways of modernization. A general approach to modeling the loads on the main parts of the upgraded serial ICE is proposed, the main results of modeling the stress-strain state of the piston, piston pin and connecting rod are given. Data were obtained to identify dangerous sections in which locally high stresses are observed, which increase the risk of fatigue failure of parts with increasing loads. Based on the results obtained, recommendations were given on the practical application of a computational experiment when modernization of serial ICEs.

Keywords: internal combustion engine; modernization; power increase; fatigue failure; modeling; computational experiment; stress-strain state.