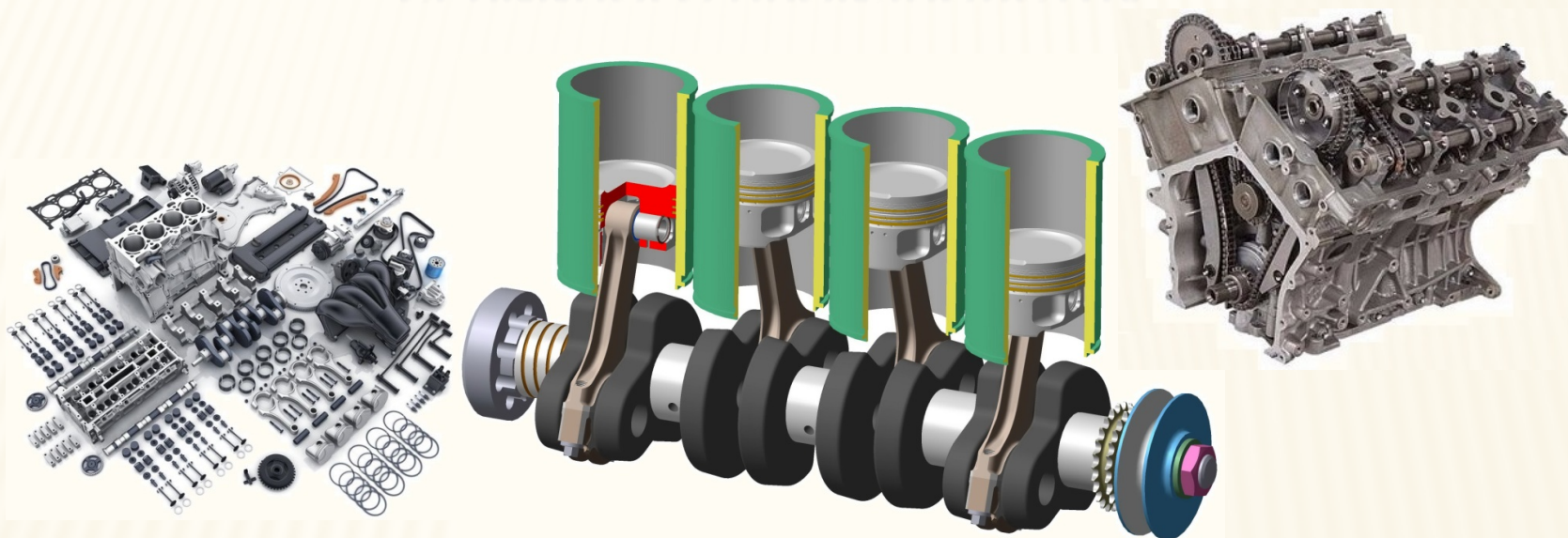


НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВС ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА



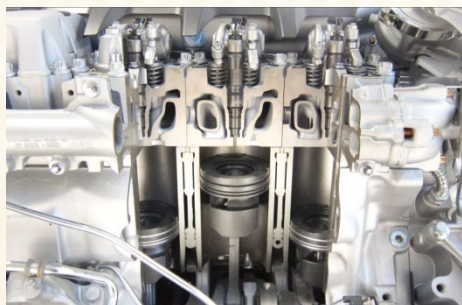
**XXIV Международный Конгресс Двигателестроителей
2-7 сентября 2019г.**

Задача улучшения характеристик двигателей, в том числе, повышением их выходных параметров:

- ❑ - изменения на рынке, которые невозможно было предусмотреть при длительном проектировании, доводке и постановке двигателя на производство,
- ❑ - параметры серийного ДВС постепенно перестали удовлетворять потребностям рынка.

Особенности модернизации серийных двигателей:

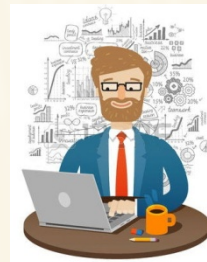
- ❖ - любое изменение на стадии серийного производства может повлечь за собой дополнительные и не всегда оправданные затраты,
- ❖ - проведение повторных разработок для уже находящегося в серийном производстве изделия явно неэффективно, любая такая переделка оказывается чрезмерно дорогостоящим мероприятием,
- ❖ - очевидно желание производителя повысить параметры двигателя без перепроектирования и последующих серьезных изменений в конструкции и технологии.



Противоречие между 1) требованиями рынка, 2) условиями производства при чрезмерно большой стоимости перепроектирования серийной продукции, и 3) риском снижения надежности продукции.

Цель работы:

- ❑ показать возможный общий подход к модернизации (повышению параметров) ДВС в условиях серийного выпуска без перепроектирования и фактического создания нового двигателя.



Основные способы модернизации ДВС:

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

Проблемы: модернизация путем масштабирования двигателя может быть не только сложна технически, но и опасна непрогнозируемым снижением ресурса и надежности. А проводить большой объем конструкторских работ и испытаний экономически нецелесообразно.



Результат: на практике постепенно получили распространение более простые способы модернизации:

- 3) **изменение настроек топливоподачи** (этот путь используется редко, поскольку имеет жесткие ограничения по экологическим соображениям),
- 4) **повышение давления наддува** (для двигателей с наддувом).



Вывод – кажущаяся простота: никаких специальных более мощных двигателей строить уже не надо, модернизация не отражается на конструкции базового прототипа и воздействует только на управление – достаточно только увеличить давление наддува.

Пример модернизации атмосферного ДВС способом масштабирования:

Базовый 4-цилиндровый бензиновый двигатель объемом 1,5 л, уже хорошо отработанный и доведенный, через 3 года после начала выпуска был модернизирован путем создания на его базе двигателя объемом 1,8 л. Увеличение объема повлекло за собой:

- 1) новый блок и головку цилиндров, клапаны, коленчатый вал и поршни с кольцами,
- 2) прибавку мощности в 24 л.с.,
- 3) чрезмерный расход масла, который катастрофически быстро возрастал уже при пробеге 50-60 тыс.км (против 200-250 тыс. у двигателя 1,5 л),
- 4) резкое снижение ресурса двигателя – в 4-5 раз.



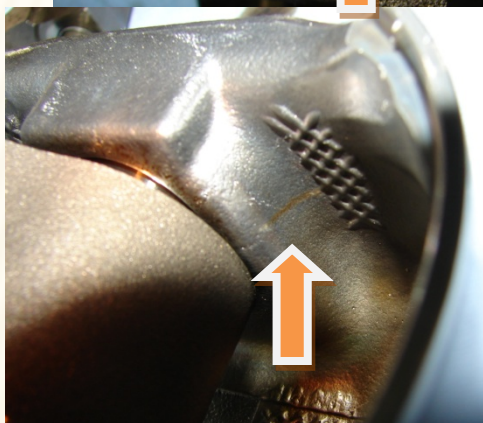
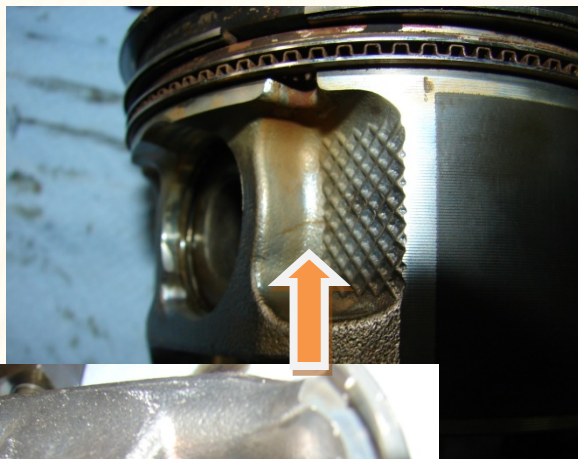
Анализ причин неудачной модернизации:

- проблема была локализована **в 4-м цилиндре** - 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.
- дальше нашлась сама причина – модернизация путем увеличения диаметра цилиндра фактически "приблизила" этот болт к поверхности цилиндра на недопустимо близкое расстояние.

Вывод: никаких исследований при выполнении модернизации не проводилось, в противном случае деформация 4-го цилиндра была бы обнаружена сразу, при первых же испытаниях.



Минимизация затрат на модернизацию и ее последствия:



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, модернизация выполнялась последовательно за счет роста давления наддува без изменения деталей ЦПГ:

- 1) через год повышение мощности до 240 л.с. (+4%),
- 2) через 2 года – до 260 л.с. (+8%),
- 3) еще через год выпущена топ-версия двигателя мощностью 280 л.с. (+7,5%),
- 4) далее на новые модели пошел все тот же двигатель мощностью уже 300 л.с. (+7%)

Результат модернизации:

- когда общее повышение мощности достигло 30% относительно базового варианта, новые 300-сильные двигатели начало массово выходить из строя по причине усталостного разрушения поршней.

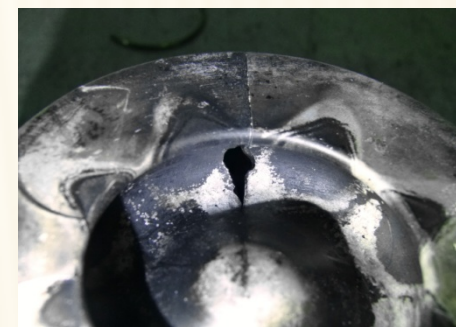
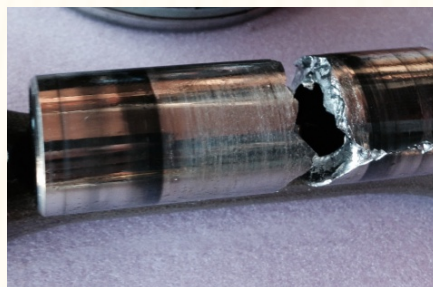
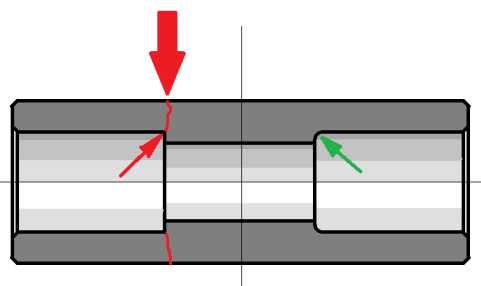
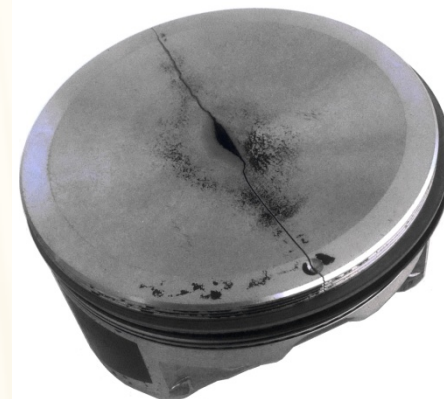
Вывод:

Некоторые производители с целью минимизации собственных затрат проводят модернизацию своей продукции в условиях серийного производства без проведения необходимых исследований и даже без оценки последствий своих действий.



Тюнинг как пример неконтролируемой модернизации:

- 1) владелец автомобиля использует точно такой же способ модернизации двигателя, но не при производстве, а уже в эксплуатации транспортного средства,
- 2) 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,
- 3) фактически владелец превращает себя в инженера-исследователя и водителя-испытателя.

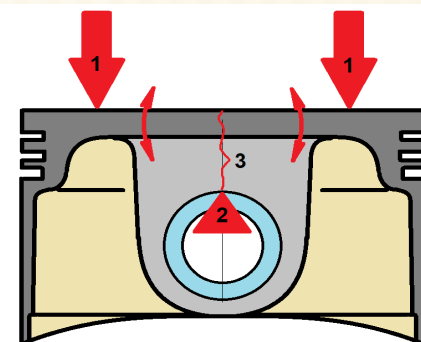


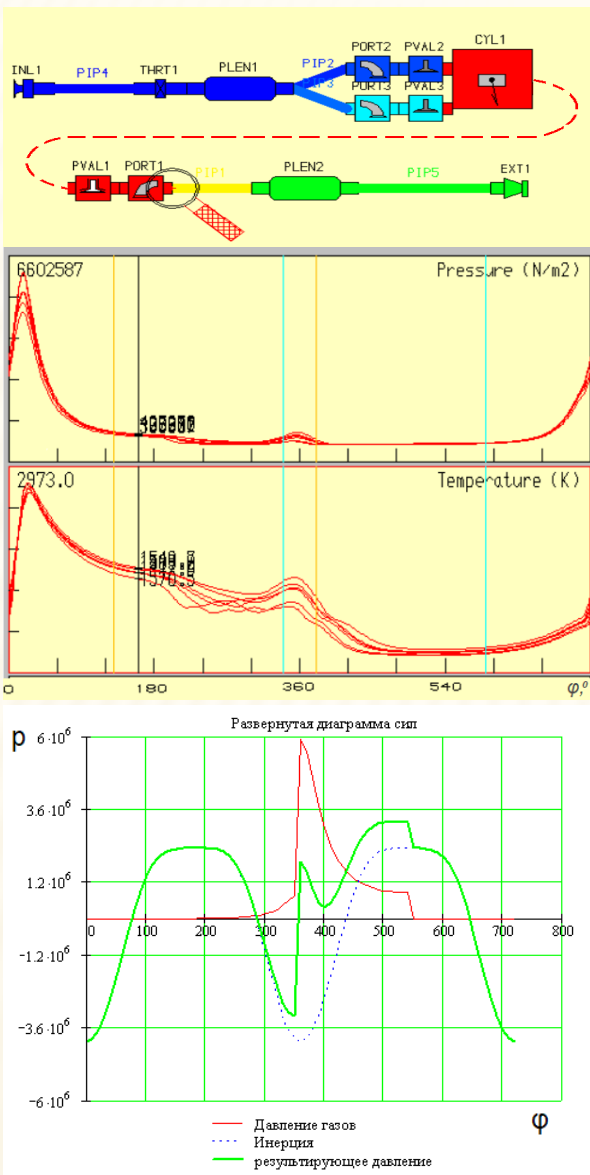
Часто встречающиеся виды разрушений после модернизации:

- разрушение днища поршня вдоль оси пальца,
- разрушение поршневого пальца (по внутренним галтелям),
- разрушение шатуна по стержню или болтам.

Вывод – исключить снижение надежности двигателя при модернизации гарантированно можно только 2-мя способами:

- 1) не проводить никакой модернизации,
- 2) выполнять полный комплекс исследовательских и проектно-конструкторских работ, включая испытания.





Постановка задачи исследования:

1. Причина разрушения деталей при модернизациях всех видов - усталостное разрушение, вызываемое ростом напряжений в неких "слабых" местах конструкции.
2. Задача исследования – выявить наиболее слабые места у деталей при обычных рабочих нагрузках для оценки возможности модернизации двигателя.
3. Возможное решение:
 - ❖ смоделировать нагрузки у самых обыкновенных серийных деталей,
 - ❖ определить напряжения и деформации в них (напряжённо-деформированное состояние),
 - ❖ найти опасные сечения с максимальным уровнем напряжений,
 - ❖ в зависимости от величин напряжений сделать вывод о возможности модернизации или необходимости внесения изменений в конструкцию деталей.



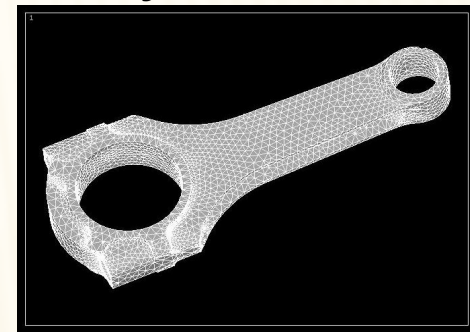
Пример – детали реального двигателя:

- ❑ поршень, поршневой палец и шатун (на такие детали приходится основная часть дополнительных нагрузок при модернизации любого двигателя с целью увеличения его мощности).
- ❑ действующие на детали нагрузки - расчет цикла ДВС (Lotus Engine Simulation), режим максимальной частоты вращения.
- ❑ полученные диаграммы сил - задание граничных условий для моделирования (ANSYS).

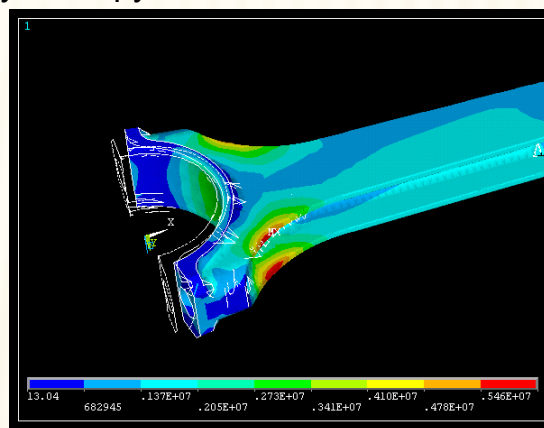
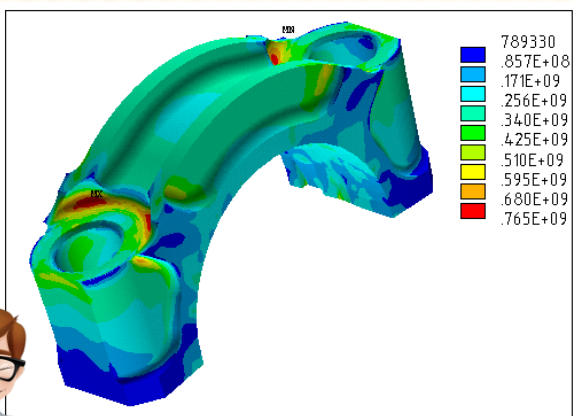
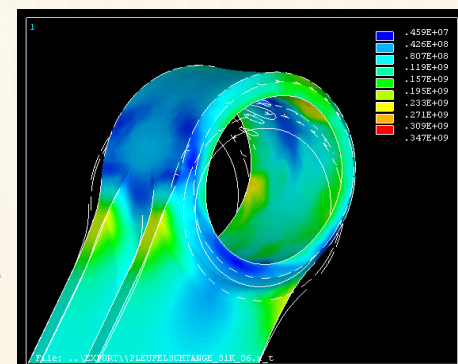
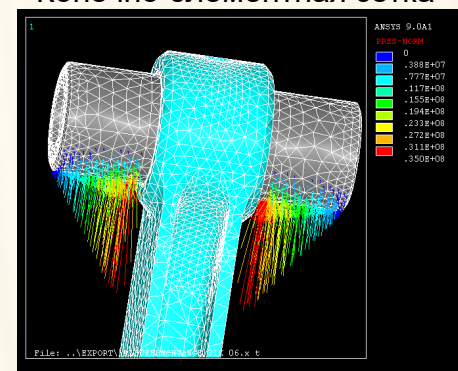
Моделирование напряженно-деформированного состояния шатунов:

- 1) Порядок проведения моделирования не отличается от обычного и общепринятого, включая разбиение на конечные элементы и постановку граничных условий.
- 2) Граничные условия – распределенная нагрузка на части окружности головок для создания усилия растяжения и сжатия между головками.
- 3) Цель – определение сечений с явно выраженными флуктуациями напряжений, что может быть причиной усталостного разрушения при росте нагрузок.

Результат – в конкретном примере конструкции выявлены 2 вида опасных сечений, в которых при повышении мощности требуются доработки путем изменения толщины и увеличения радиуса закругления.



Конечно-элементная сетка



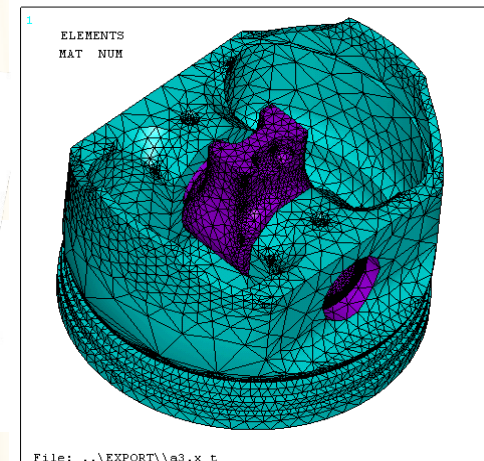
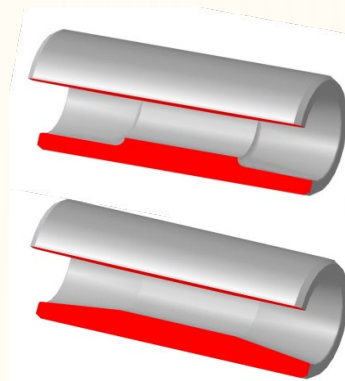
Критические сечения крышки шатуна на периферии площадок для головок болтов при растяжении и изгибе

Моделировании сжатия вдоль стержня шатуна выявляет критические сечения у кривошипной головки шатуна

Моделирование растяжения шатуна указывает на отсутствие критических участков у поршневой головки

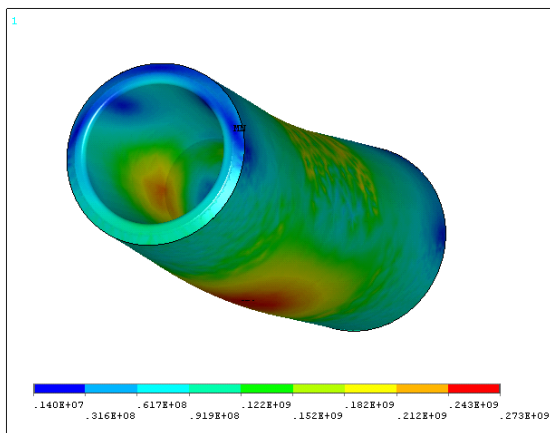
Моделирование напряженно-деформированного состояния поршневого пальца:

- ❖ моделирование совместно с поршнем и шатуном,
- ❖ шатун может быть представлен только верхней головкой при задании распределенной нагрузки, действующей в сечении стержня,
- ❖ поршень закрепляется неподвижно, температурные деформации не учитываются,

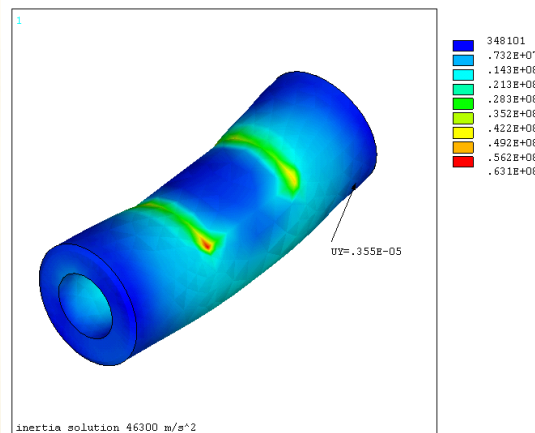


Результат: наибольшую опасность могут представлять напряжения на внутренней поверхности (в отверстии) пальца.

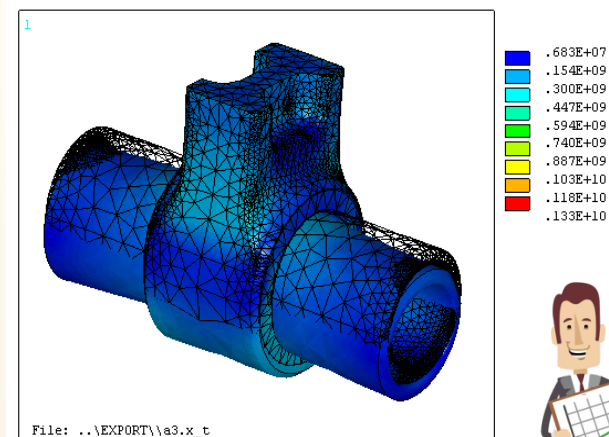
Конечно-элементная модель пальца с поршнем и шатуном



Палец с коническим отверстием - напряжения на наружной и внутренней поверхности



Простой цилиндрический палец с напряжениями на наружной поверхности от сил инерции

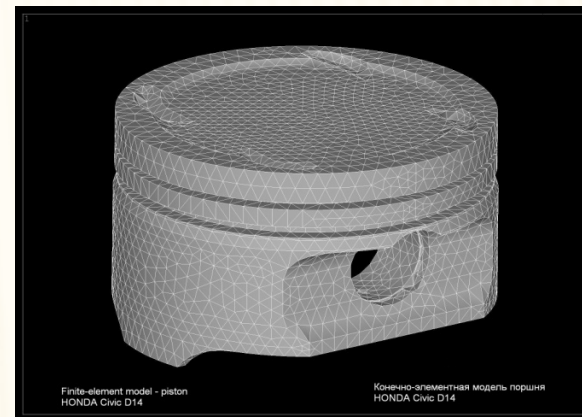


Фрагмент модели с напряжениями от сил инерции

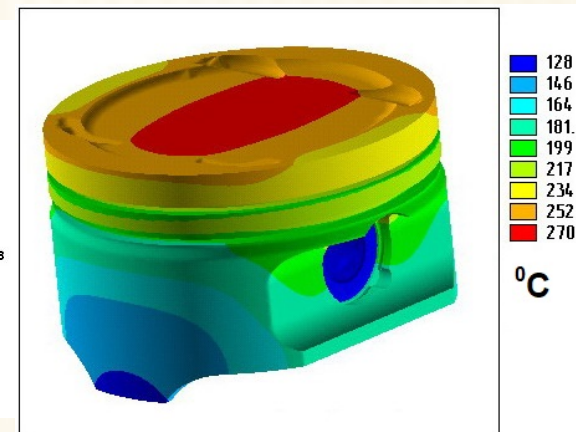
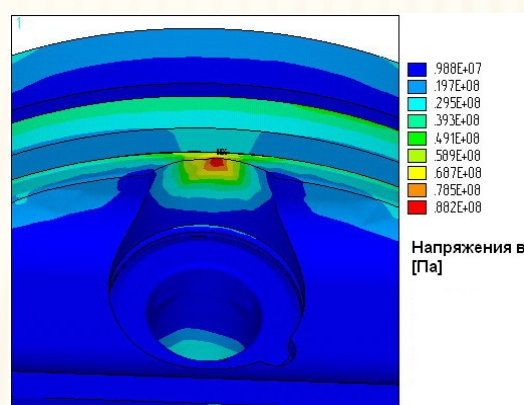
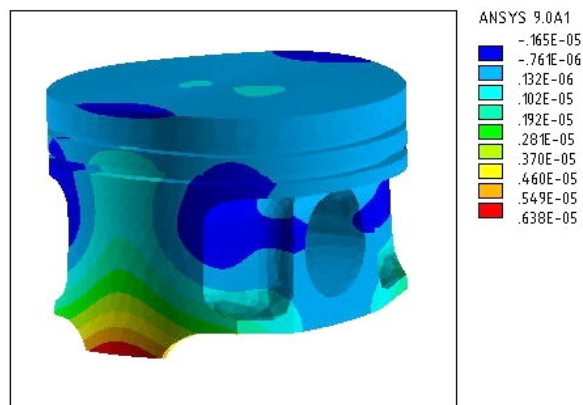


Моделирование напряженно-деформированного состояния поршня:

- ❖ наиболее сложная задача, поскольку требуется учитывать влияние температуры,
- ❖ необходимость постановки граничных условий, учитывающих особенности сопряжения поршня с цилиндром,
- ❖ возможность поэтапного решения задачи определения напряжений и деформаций путем последовательного добавления влияния: температуры, инерции и давления.



Сеточная модель поршня



Деформация поршня от сил инерции

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

Результаты расчета температурного поля поршня при граничных условиях – подводе теплоты в днище и отводе от канавок колец и от юбки

1. Современные компьютерные модели 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.
2. Даже самые предварительные результаты способны дать информацию о возможных **последствиях модернизации двигателя**, и даже приближенных вычислений может быть вполне достаточно для прогнозирования последствий модернизации без больших затрат на перепроектирование и/или внесение серьезных изменений в технологию производства
3. 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 уровень напряжений в них, когда дополнительная полировка может оказаться недостаточной для повышения усталостной прочности,
 - 3) **изменение толщины сечений** в случае наиболее высоких локальных напряжений.
4. Все доработки данного вида могут быть выполнены в условиях серийного производства без перепроектирования двигателя и серьезной перенастройки оборудования, поскольку указанные мероприятия, как правило, **не носят принципиального характера**, оставляя неизменными материал, заготовки деталей, виды и режимы химико-термической обработки и прочие технологические факторы.
5. Информация о модернизации двигателя и ее последствиях, полученная с помощью моделирования, может представлять практическую ценность, главным образом, **для экспертов** при определении причин отказа двигателей в эксплуатации.



С.А.Дмитриев, д.т.н., профессор
Аэрокосмический институт,
Национальный авиационный университет

А.Э.Хрулев, к.т.н.
Международное моторное бюро

