

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ШАТУНА С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВС

Хрулев А.Э., Дмитриев С.А.



10-ї Міжнародна науково-практична конференція  
СУЧАСНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ НА ТРАНСПОРТІ,  
ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЇХ ОБСЛУГОВУВАННЯ  
12 – 13 вересня 2019 року

## Конструктивные особенности шатунов

- ❑ в подавляющем большинстве ДВС применяются шатуны, имеющие конструкцию, давно ставшую традиционной и общепринятой,
- ❑ конструктивная схема шатуна за 100 лет претерпела минимальные изменения, которые, помимо применения так называемой разрывной кривошипной головки, касались, главным образом, уменьшения размеров и утончения сечений стержня.



## Факторы, влияющие на конструкцию ДВС

- ❖ совершенствование автомобильных ДВС шло по пути повышения удельной мощности:
  - 30 лет назад литровая мощность 50 л.с. на 1 литр была нормой, а 70 л.с./литр говорили об эксклюзивности или специальном применении двигателя,
  - сейчас уровень 90-100 л.с./литр уже не является пределом для вполне массовых конструкций.
- ❖ рост максимальной частоты – до 7000 об/мин,
- ❖ даунсайзинг – уменьшение рабочего объема



## Вывод

- Серьезные изменения параметров оказывают влияние на конструкцию большинства основных деталей ДВС. Однако изменения коснулись шатунов в наименьшей степени. Это позволяет предположить дальнейшее развитие конструкции шатунов.

## Внешние факторы

- ❑ изменения технических требований к двигателям могут диктоваться не только экономическими, но и другими требованиями, включая мощностные и экологические характеристики ДВС.
- ❑ эти изменения могут стать причиной серьезных изменений в конструкции двигателей.

## Цель работы

- анализ конструкций шатунов и выявление факторов, оказывающих влияние на основные параметры ДВС.





**Шатун со стержнем традиционного 2-таврового профиля:**

- 1) **двутавровое сечение** (профиль) стержня достаточно хорошо держит нагрузки в продольном (окружном) направлении, чего нельзя сказать о поперечном.
- 2) но в поперечном направлении явных нагрузок на шатун нет, поэтому для массового производства эта конструкция продолжает оставаться доминирующей.

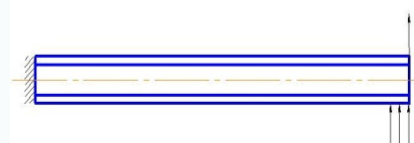
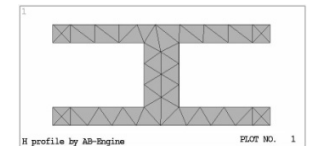
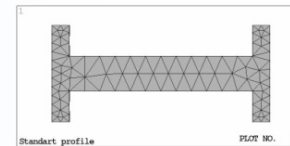
**Шатун со стержнем H-образного профиля:**

- 1) H-образный стержень по-прежнему представляет собой двутавр, но развернутый на  $90^{\circ}$  вокруг продольной оси стержня,
- 2) не совсем понятно, зачем нужен такой специальный профиль, и что он дает, но в спортивных ДВС применяется широко.

## 2. Моделирование нагрузок на стержни шатунов различных типов



- ❖ две балки, имитирующие стержень шатуна – традиционная двутавровая и H-образная,
- ❖ площадь поперечного сечения и длина балки одинаковые,
- ❖ скруглений по ребрам для упрощения задачи намеренно не предусмотрено,
- ❖ расчетная схема для моделирования: на одном краю неподвижная заделка, другой край свободный, но к нему прикладывалась одинаковая поперечная сила в 1000 Н.



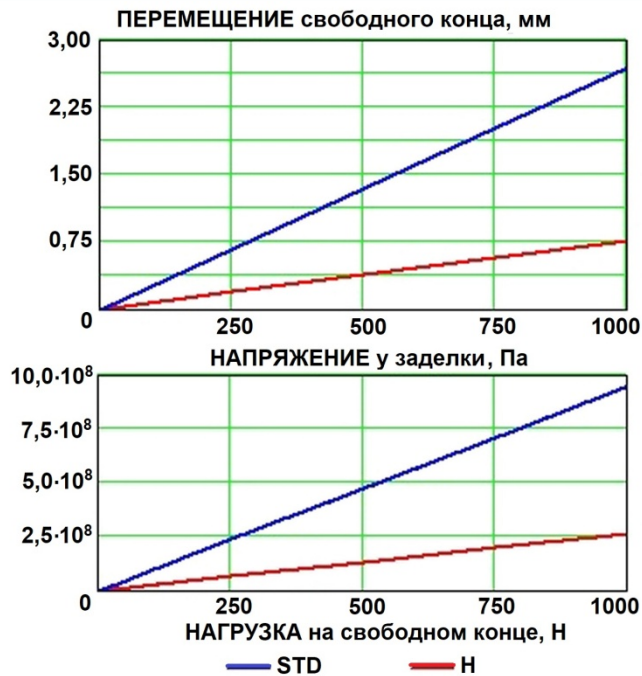
*Поперечные сечения стержней и расчетная схема их нагружения поперечной нагрузкой.*





### 3. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния стержней шатунов

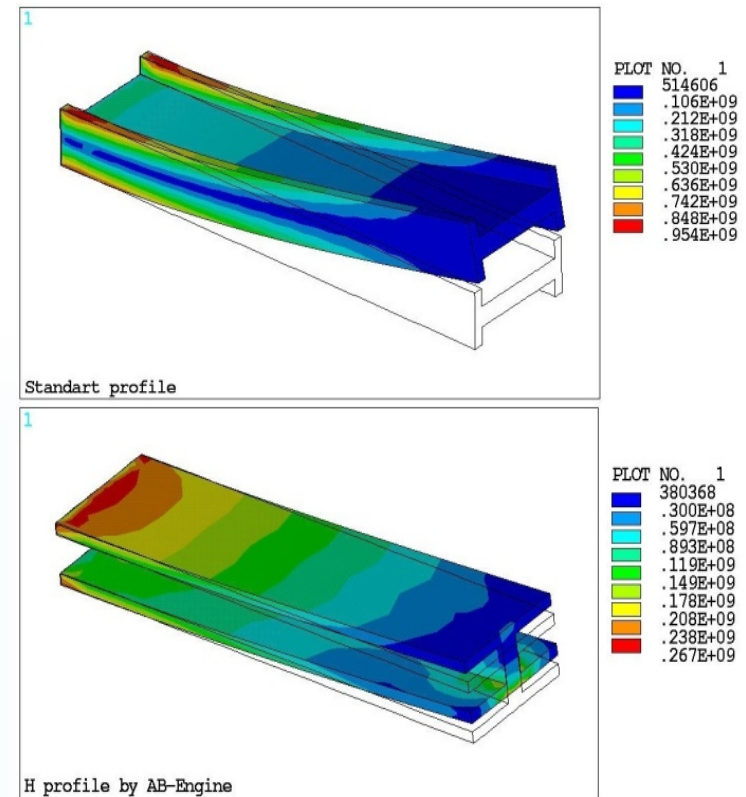
- метод конечных элементов (МКЭ) - конечно-элементная модель с разбиением стержня на несколько тысяч элементов,
- контурные графики результатов расчета - позволяют видеть не только состояние детали под нагрузкой, но и ее исходное положение (для большей наглядности масштаб деформаций балок на графиках увеличен в 5 раз)



Деформации и напряжения в стержне шатунов рассматриваемых конструкций в зависимости от поперечной нагрузки.

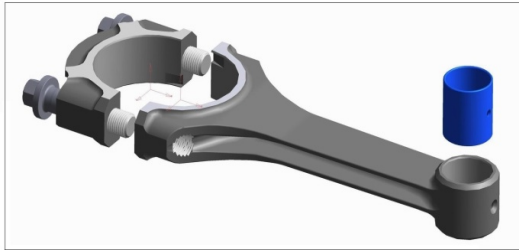


Характер поперечной деформации у стержня традиционной конструкции (вверху) и H-образного (внизу) при одинаковой поперечной нагрузке..

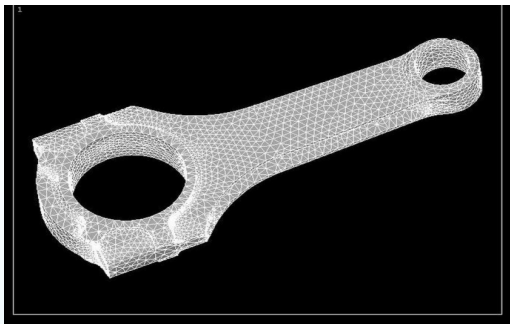


### Результат

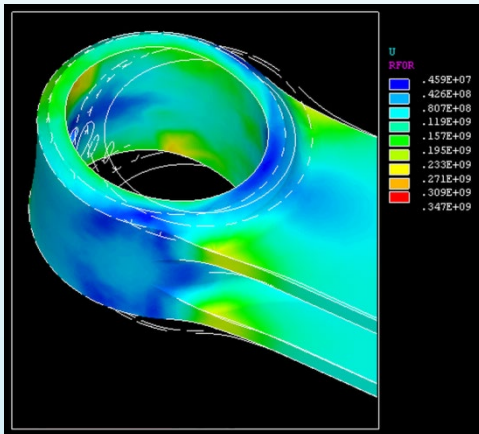
- ❑ В поперечном направлении шатун с H-образным стержнем обеспечивает в 3,5 раза большую жесткость и в 3 раза меньшие напряжения, чем шатун со стержнем стандартного профиля при одинаковой площади поперечного сечения,
- ❑ в продольном направлении оба типа шатунов по жесткости (определяемой толщиной горизонтально расположенных элементов) мало отличаются друг от друга.



3-мерная модель шатуна



Результаты разбиения модели шатуна на конечные элементы (математическая модель).

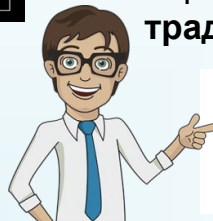


### Сравнение конструктивных схем шатунов по результатам моделирования:

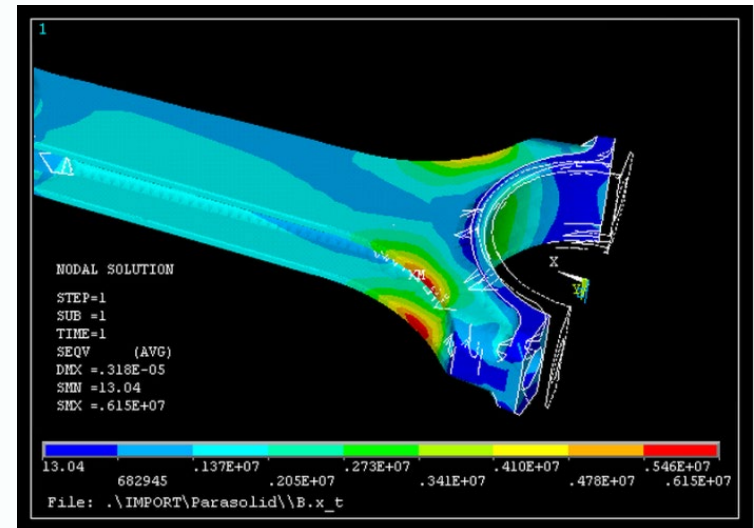
- ❑ в отличие от традиционной конструкции у шатуна с Н-образным профилем внимание следует уделить ребрам профиля стержня в нижней их части вблизи выхода на кривошипную головку.

### Недостатки Н-образной схемы:

- 1) масштабный фактор – сравнение поперечного сечения традиционного и Н-образного типа, показывает, что площади сечений будут одинаковы только в том случае, если толщина ребер у Н-образного стержня будет в 2 раза тоньше основания двутавра у традиционного,
- 2) выполнить ребра чрезвычайно тонкими - 1,5-2,0 мм толщиной, сомнительно. В результате при прочих одинаковых условиях Н-образный шатун получается, как минимум, на **10-15% тяжелее традиционного.**



Моделирование растяжения и сжатия шатуна указывает на наличие опасных участков на наружной поверхности ребер вблизи кривошипной головки, в то время как у поршневой головки шатуна выявлены только зоны повышенных напряжений.



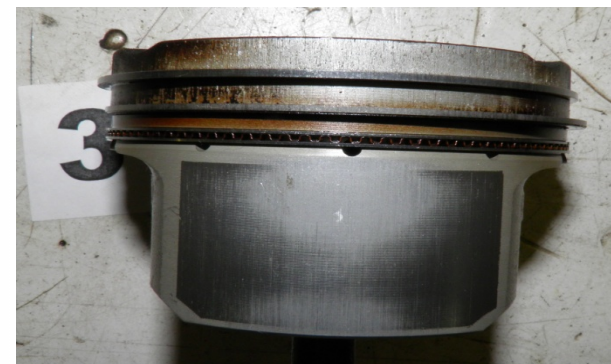
### Общие признаки работы поршня с перекосом.

#### Перекос поршня в плоскости качания шатуна:

- ❑ При перекладке в мертвых точках люфт (или качание) поршня осуществляется в плоскости вращения и ограничен юбкой.
- ❑ При большом износе юбки и/или цилиндра качание поршня при перекладках станет значительным и может привести к тому, что поршень будет доставать до цилиндра жаровым поясом,
- ❑ Стук, нештатный контакт, увеличение мех.потерь.

#### Поперечный перекос поршня в цилиндре:

- 1) перекос поршня в цилиндре в направлении, перпендикулярном плоскости вращения, т.е. в вертикальной плоскости, проходящей через ось коленчатого вала,
- 2) любой поперечный перекос поршня в цилиндре возможен только вместе с поршневой головкой шатуна, что может быть вызвано только **поперечным изгибом шатуна**,
- 3) **главный признак** - отполированные участки над отверстиями под палец на жаровом поясе поршня.



*Типичный признак абразивно изношенного поршня*



*Типичный признак работы поршня с деформированным шатуном после гидроудара*



#### Основные причины поперечной деформации шатуна:

- 1) гидроудар из-за попадания в цилиндры различных жидкостей,
- 2) ударные повреждения поршня и шатуна (обрыв клапана, попадание посторонних предметов),
- 3) некачественный ремонт двигателя в целом и шатуна в частности.

**Главная особенность деформации данного типа – ее односторонний характер**





**Признак нештатной работы – 2-сторонний поперечный контакт жарового пояса поршня с цилиндром.**

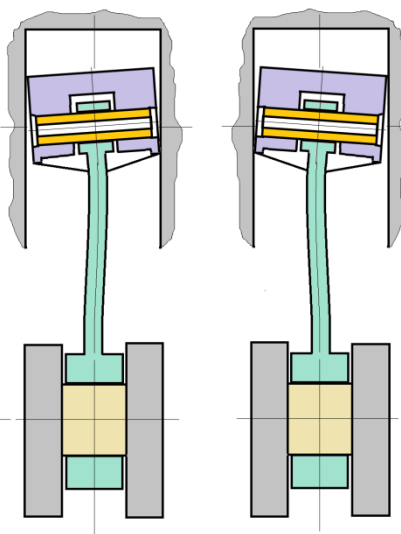
❖ Рабочая гипотеза - причина 2-сторонней потертости жарового пояса заключена в **изгибных колебаниях шатуна**.

**Косвенное подтверждение гипотезы:**

➤ Обычно 2-сторонний поперечный контакт поршня с цилиндром выявляется у высокооборотных спортивных двигателей.

**Особенность взаимодействия поршня с цилиндром:**

❑ Наблюдаемый характер контакта, вероятно, не связан с термическим расширением поршня, поскольку 2-стороннее взаимодействие проявлялось у поршней различной геометрии и конструкции.



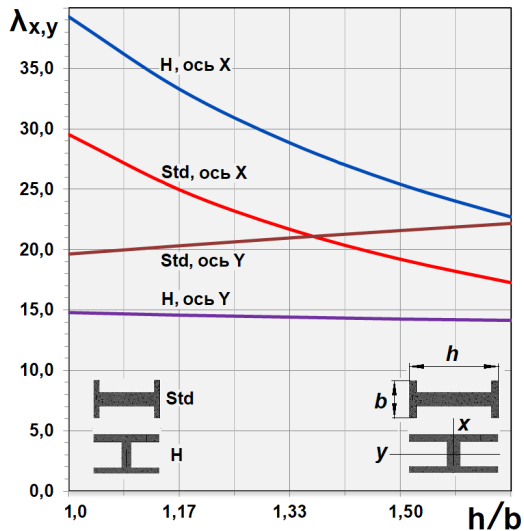
*Даже небольшие следы на жаровом поясе спортивного поршня с 2-х сторон над отверстиями под палец являются, тем не менее, признаком качания поршня в цилиндре из-за изгибных колебаний шатуна при работе на высоких частотах вращения.*



### Оценочный расчет влияния профиля стержня шатуна на частоту собственных колебаний системы «шатун-поршень-палец»

- ❑ балка, защемленная на стороне кривошипа и с грузом (поршень с пальцем), приложенным в центре поршневой головки,
- ❑ в 1-м приближении колебания шатуна рассматривались как поперечные,
- ❑ при поперечных колебаниях момент инерции зависит от геометрических характеристик стержня,
- ❑ резонансная частота вращения зависит не только от типа, но и от размеров профиля стержня.

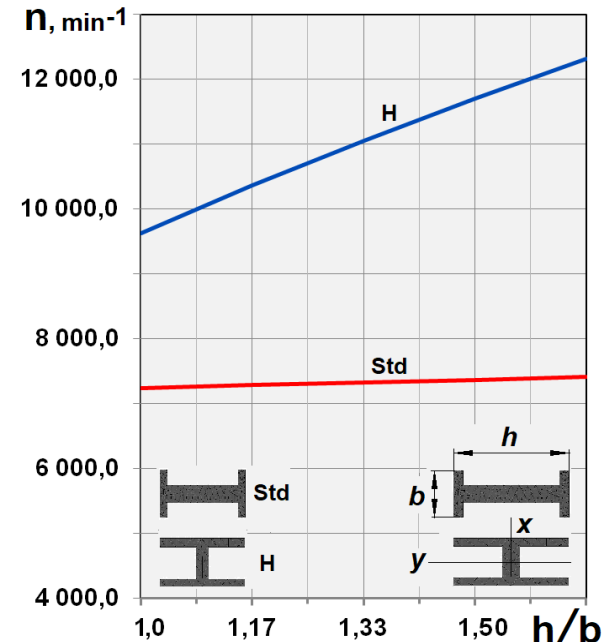
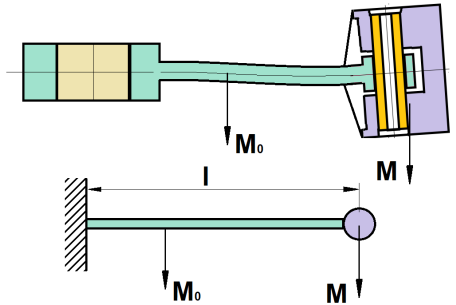
Гибкость  $\lambda = \frac{\mu l}{i}$ ,  $i = \sqrt{I/A}$



$$\omega = \sqrt{3EI_y / [l^3 (M + 0,235 M_0)]}$$

### Результаты:

1. У шатунов со стандартным профилем стержня частота собственных поперечных колебаний оказывается вблизи 7000-7500 об/мин (что может быть причиной роста механических потерь на таких частотах).
2. H-образный стержень сразу повышает частоту собственных колебаний шатуна в 1,5-1,6 раза – до 11000-12000 об/мин.
3. В реальных условиях переход на H-образный шатун убирает касание огневого пояса и цилиндра и дает рост мощностных показателей.



Гибкость H-образного стержня в поперечном направлении (ось y) меньше, чем у стандартного, но в продольном направлении H-образный уступает стандартному, поэтому необходим более широкий H-образный профиль с большим отношением  $h/b$ .



Влияние типа и размеров стержня шатуна на число оборотов, соответствующее собственной частоте поперечных колебаний стержня шатуна: использование H-образного стержня позволяет переместить резонанс на высокие частоты, особенно с увеличением ширины профиля



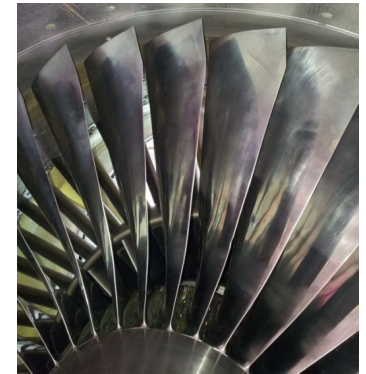


1. Традиционная конструкция шатуна со стержнем двутаврового сечения, по прежнему применяемая в подавляющем большинстве бензиновых ДВС, практически исчерпала резервы быстроходности. При частотах вращения свыше 6000-6500 об/мин обнаруживаются признаки изгибных колебаний шатуна, что приводит к росту механических потерь и ухудшению основных параметров ДВС, особенно, у малолитражных современных двигателей.
2. Возможным решением проблемы является переход на шатуны с Н-образным профилем стержня, обеспечивающим во много раз большую поперечную жесткость и позволяющим, тем самым, уменьшить механические потери и повысить выходные параметры ДВС.
3. Преимущество Н-образного профиля шатуна подтверждается не только теоретически, но и практически – наибольшее преимущество наблюдалось при испытаниях спортивных двигателей, когда Н-образный профиль давал недостижимые для традиционной конструкции показатели быстроходности.
4. Эффект от применения Н-образных шатунов наблюдался только при работе на больших частотах вращения, выше 6000-6500 об/мин, ниже которых никаких изменений в ту или иную сторону выявить не удалось.
5. Дальнейшее уточнение полученных результатов может быть проведено путем моделирования колебаний шатуна с определением влияния геометрических характеристик стержня на амплитуду таких колебаний.



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

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



к.т.н. А.Э.Хрулев  
Международное  
МОТОРНОЕ БЮРО

