

Лабораторная работа № 5

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРХНЕЙ ГОЛОВКИ ШАТУНА С ЗАПРЕССОВАННОЙ ВТУЛКОЙ. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА

Теоретическая часть

В конструкциях автомобильных и тракторных двигателей массовое распространение получили поршневые пальцы плавающего типа. Во время работы палец имеет возможность проворачиваться как в шатунной головке, так и в поршневой. Такой тип пальца позволяет увеличить ресурс двигателя за счет уменьшения износа в контактной паре палец – бобышка. Это связано с уменьшением относительных скоростей скольжения трущихся поверхностей по сравнению с другими способами установки поршневого пальца.

Поршневая головка шатуна рассчитывается на усталостную прочность от действия инерционных и суммарных сил. Кроме того, необходимо проводить проверку напряжений, возникающих в головке от воздействия на нее запрессованной втулки. В данной лабораторной работе будет проведен анализ напряженного состояния верхней головки шатуна с запрессованной втулкой.

Расчет напряжений в поршневой головке шатуна, возникающих от запрессовки в нее бронзовой втулки и от различия коэффициентов линейного расширения материалов, определяют по суммарному натягу в соединении и проводят в следующей последовательности. Сначала определяют величину натяга, мм,

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta + \Delta_t, \quad (5.1)$$

где Δ – натяг посадки бронзовой втулки (наибольшая возможная величина с учетом применяемой посадки), мм; Δ_t – температурный натяг, мм.

Далее температурный натяг

$$\Delta_t = d (\alpha_b - \alpha_r) \Delta T, \quad (5.2)$$

где d – внутренний диаметр головки, мм; $\alpha_b = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ – термический коэффициент расширения бронзовой втулки; $\alpha_r = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ – термический коэффициент расширения стальной головки; $\Delta T = 100 \dots 120 \text{ K}$ – средняя температура подогрева головки и втулки при работе двигателя.

Удельное давление от суммарного натяга по поверхности соприкосновения втулки с головкой определяется по зависимости, МПа,

$$p = \frac{\Delta_{\Sigma}}{d \left[\frac{(d_r^2 + d^2)/(d_r^2 - d^2) + \mu}{E_{ш}} + \frac{(d^2 + d_n^2)/(d^2 - d_n^2) - \mu}{E_b} \right]},$$

где d_r , d и d_n – соответственно наружный и внутренний диаметры головки и внутренний диаметр втулки, мм; μ – коэффициент Пуассона; $E_{ш} = 2,2 \cdot 10^5$ – модуль упругости стального шатуна, МПа; $E_b = 1,15 \cdot 10^5$ – модуль упругости бронзовой втулки, МПа.

В заключение определяются напряжения от суммарного натяга на внешней и внутренней поверхности поршневой головки. При этом используют формулы Ляме

$$\sigma_a^o = p \frac{2d^2}{d_r^2 + d^2} \quad \text{и} \quad \sigma_i^o = p \frac{d_r^2 + d^2}{d_r^2 - d^2}.$$

Величина напряжений σ_a^o и σ_i^o может достигать 100...150 МПа.

Практическая часть

Выполнение работы начинаем с определения расчетной геометрии. Используем модуль *Ansys Design Modeler* или любой другой CAD пакет. Приведем пример создания сборки в *Ansys Design Modeler*.

Создаем трехмерную модель шатуна, а точнее его поршневой головки (рис. 5.1). Создание второго компонента – бронзовой втулки – проводим все в этом же окне. Для того чтобы при вытягивании профиля втулки создать второй компонент, необходимо при выполнении операции *Extrude* выбрать настройку *Add Frozen* вместо *Add Material* (рис. 5.2, 5.3). Радиальная толщина стенки втулки обычно составляет 0,08 – 0,085 от диаметра пальца. Итоговое дерево построения модели будет выглядеть аналогично рис. 5.4.

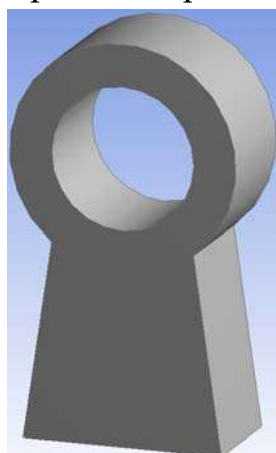


Рис. 5.1. Трехмерная модель шатуна

Details View	
Details of Extrude1	
Extrude	Extrude1
Base Object	Sketch1
Operation	Add Material
Direction Vector	None (Normal)
Direction	Both - Symmetric
Extent Type	Fixed
<input type="checkbox"/> FD1, Depth (>0)	10 mm
As Thin/Surface?	No
Merge Topology?	Yes

Рис. 5.2. Изменение свойств операции выдавливания



Рис. 5.3. Сборка шатуна и втулки



Рис. 5.4. Вид дерева построения сборки

Обратим внимание, что модель верхней части поршневой головки шатуна имеет две плоскости симметрии, что позволяет нам рассматривать наличие контакта. Это упрощение позволит сэкономить расчетное время.

Симметрия модели задается с помощью команды *Tools–Symmetry*. В качестве поверхностей симметрии выбираются базовые плоскости. Дважды выполнив операцию симметрии, получаем модель, изображенную на рис. 5.5.

Завершаем создание расчетной модели и закрываем окно *Design Modeler*. Далее необходимо выбрать материал в соответствии с исходными данными.

Открыв окно *Setup* для настройки исходных данных и проведения расчета, отметим изменения в дереве построения. Появились граничные условия, описывающие симметричные поверхности втулки и шатуна (рис. 5.6).

Дополнительно для ограничения сборки необходимо ввести фиксацию нижней грани. Для этого выделяем нижнюю грань, нажимаем ПКМ и выполняем *Insert – Fixed Support* (Fixed Support).

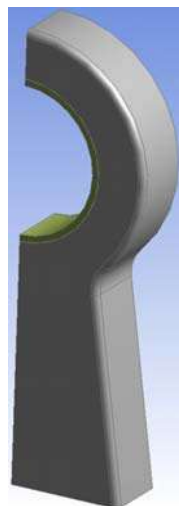


Рис. 5.5. Трехмерная модель сборки с учетом симметрии

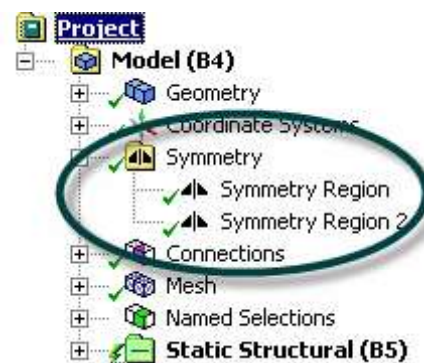


Рис. 5.6. Условия симметричности в дереве построения

Следующий этап состоит в том, чтобы указать, в каком месте модели будут встречаться контактные пары. Необходимо определить контактные и целевые элементы, по которым будет отслеживаться кинематика деформирования.

Различают два класса контактов: жестко-податливый и податливо-податливый. В первом случае жесткость контактирующих поверхностей превышает жесткость контактирующих с ней поверхностей во много раз. Во втором случае оба контактирующих тела демпфируются. Иными словами, их жесткости не имеют существенного различия. Сюда можно отнести запрессовку втулки в поршневую головку шатуна. Для такого вида контакта в зависимости от того, какая поверхность объявлена контактной, а какая целевой, возможно получение различных результатов. В связи с этим следует принимать следующие сведения при назначении поверхностей:

- выпуклая поверхность при контакте с плоскостью или вогнутой поверхностью должна иметь статус целевой поверхности;
- контактная поверхность имеет более мелкое сеточное разбиение;
- из двух поверхностей более жесткая поверхность – целевая;
- при существенном различии размеров поверхностей более малая поверхность должна быть контактной.

Поскольку внешняя поверхность бронзовой втулки имеет выпуклую форму и втулка выполнена из более мягкого материала, принимаем ее поверхность контактной, а внутреннюю цилиндрическую поверхность в поршневой головке – целевой. Выполняем команду *Connection–Insert–Manual Contact Region*. Эта команда позволяет назначить ручную контактную пару.

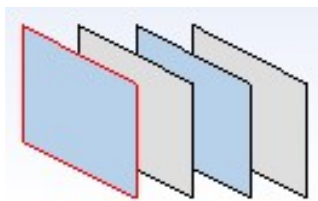


Рис. 5.7. Панель выбора объектов геометрии

При выборе контактных поверхностей, которые скрыты от пользователя за толщиной материала, достаточно удобно использовать выбор объектов с помощью слоев (рис. 5.7). Эта небольшая панель находится в левом нижнем углу графического окна. При переборе слоев ЛКМ (см. рис. 5.7) выбираются различные объекты геометрии. С помощью этой функции произведем выбор контактной втулки и целевой поверхности поршневой головки шатуна.

Далее необходимо настроить опции контактной пары, которые будут моделировать запрессованное состояние втулки в шатун. Эти опции находятся в окне “*Details of Connection*” на панели *Definition* (рис. 5.8).

В строке *Type* (тип контакта) выбираем *Frictionless* (отсутствие трения в контактной паре).

В строке *Behavior* выбираем опцию *Asymmetric* (асимметричный контакт). Асимметричный контакт определяется как контакт, имеющий все контактные элементы на одной поверхности, а все целевые – на другой. В большинстве случаев это наиболее эффективный путь моделирования контакта «поверхность – поверхность». В других случаях возможно использовать опцию *Behavior – Symmetric*. Эта опция сгенерирует два набора контактных пар (каждая поверхность будет являться как контактной, так и целевой). Использование симметричного контакта является эффективным при очень грубой сетке или не явном различии между контактной и целевой поверхностями.

Definition	
Type	Frictionless
Scope Mode	Manual
Behavior	Asymmetric
Trim Contact (Beta)	Program Controlled
Suppressed	No

Рис. 5.8. Настройки типа контакта

Для получения удовлетворительных результатов расчета необходимо особое внимание уделять построению конечно-элементной сетки на поверхности контактной пары. Самый простой и надежный способ проконтролировать размер элементов на поверхности контакта – использовать команду *Mesh- Contact Sizing* (рис. 5.9).

Details of "Contact Sizing" - Contact Sizing	
Scope	
Contact Region	Frictionless - Solid To Solid
Definition	
Frictionless - Solid To Solid	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	0,5 mm

Рис. 5.9. Окно настройки размера КЭ в контактной области

В окне настройки КЭ сетки для контактной поверхности укажем размер элемента, а из списка контактов выберем существующую контактную пару втулка – верхняя головка шатуна. Построим сетку, выполнив команду *Mesh – Generate Mesh* (рис. 5.10).

Далее введем ограничение на перемещение нижней грани шатуна во всех направлениях. Используем это допущение, поскольку нас интересуют только напряжения, возникающие вблизи верхней головки шатуна. После выполнения этого действия считаем, что все исходные данные подготовлены и можем приступить к расчету (*Static Structural – Solve*).

Расчет покажет напряженное состояние поршневой головки при запрессовке втулки при нормальных условиях, но не будет соответствовать реальным условиям эксплуатации двигателя.

Исходные данные необходимо дополнить температурной нагрузкой.

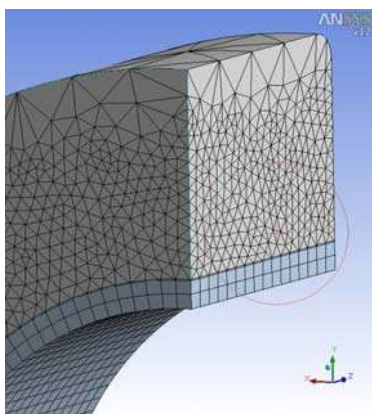


Рис. 5.10. КЭМ сборки втулки и шатуна

Это второе слагаемое в (5.1). Принимаем $\Delta T = 110$ К. Для ввода средней рабочей температуры используем команду *Static Structural – Insert – Thermal Condition*. Необходимо указать компоненты (шатун и втулка), которые находятся при этой температуре. После этого следует перезапустить выполнение расчета.

Анализ результатов расчета должен выявить уровень напряжений, возникающих на внутренней и внешней поверхностях поршневой головки шатуна. Для удобства чтения результатов желательно воспользоваться локальной системой координат (ЛСК). Такой ЛСК может послужить цилиндрическая система координат, расположенная на оси поршневого пальца и обращенная осью Z вдоль нее.

Теперь надо установить влияние натяга на уровень напряжений на внешней и внутренней поверхностях поршневой головки шатуна. Для того чтобы расчетным путем установить такую зависимость, необходимо провести несколько расчетов. Для того чтобы сократить время выполнения однотипных исследований, мы воспользуемся параметрами.

В качестве исходного (входного) параметра принимаем натяг в соединении. В качестве выходных параметров принимаем напряжения на внешней и внутренней поверхностях головки шатуна.


Для создания параметра «Натяг» перейдем в окно моделирования геометрии *Design Modeler* и нажмем ЛКМ иконку с названием  Parameters (параметры). Откроется окно настройки параметров и уравнений.



Рис. 5.11. Вводимые переменные

Введем в окно *Design Parameter* два выражения: $Natyag = 0,1$ и $D_vnutr = 25$ (рис. 5.11). Первый параметр определяет натяг, задаваемый в соединении – 0,1 мм. Второй характеризует внутренний диаметр поршневой головки, равный 25 мм.

Исходные параметры заданы, теперь необходимо описать связи между управляющими и управляемыми параметрами. Перемещаемся в окно *“Parameter/Dimension As-*

segment". В этом окне вводим уравнения, описывающие связи между входными и выходными данными (рис. 5.12).

Здесь величины $XYPlane.D10$ и $XYPlane.D11$ представляют собой внутренний диаметр поршневой головки шатуна и наружный диаметр втулки соответственно.

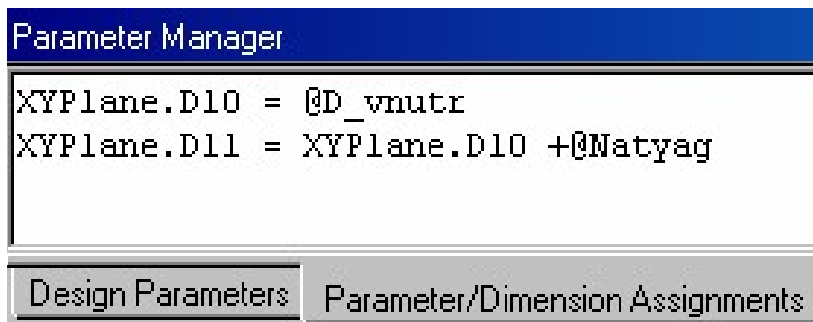


Рис. 5.12. Взаимосвязи параметров

Проверка установленных взаимосвязей может быть выполнена в третьем по счету окне «CHECK» (рис. 5.13). В первой строчке рассчитан новый диаметр втулки с учетом натяга и внутреннего диаметра поршневой головки. В нашем случае он равен 25,1 мм. Закрываем окно *Design Modeler*.

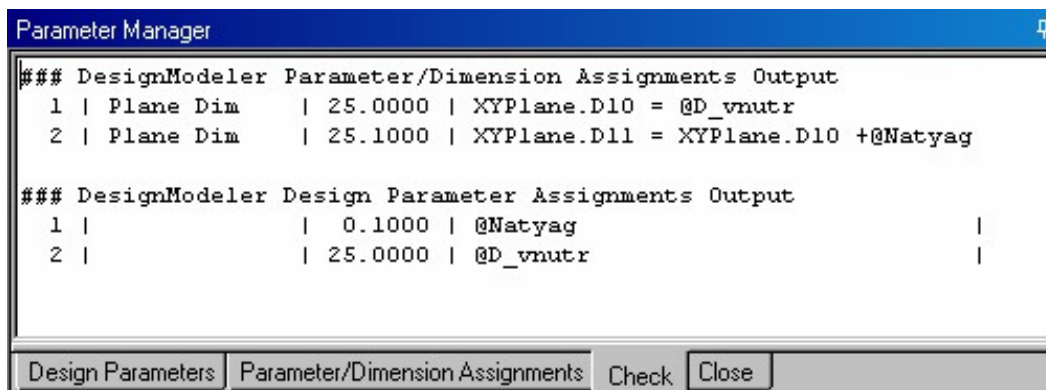



Рис. 5.13. Окно проверки

Для задания напряжений на внешней и внутренней поверхностях поршневой головки шатуна переходим в раздел редактирования данных  **Edit...**.

Выполняем команду *Solution-Insert – Equivalent Stress*, выбрав в строке *Geometry* внешнюю цилиндрическую поверхность поршневой головки. Также отмечаем значок «P» в разделе *Result* для вывода этих значений в качестве параметров (рис. 5.14).

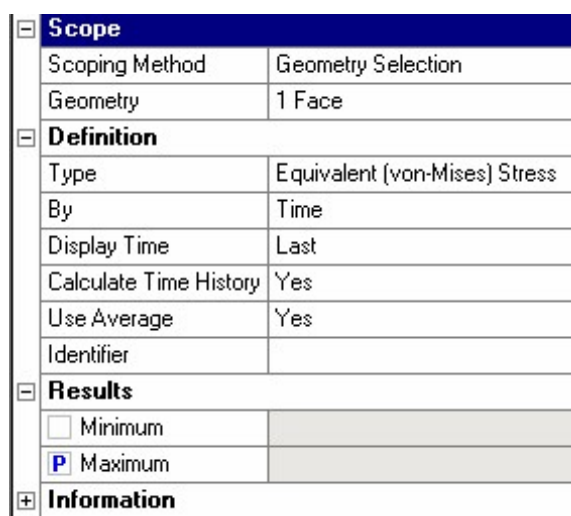


Рис. 5.14. Окно настройки выходных параметров

Аналогичную процедуру проделываем для внешней поверхности поршневой головки шатуна.

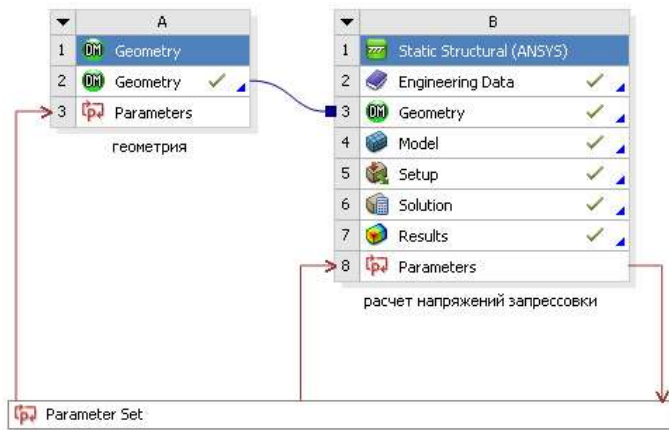


Рис. 5.15. Вид проекта с осуществленной параметрической связью

После создания выходных параметров переходим в главное окно проекта и отмечаем, что в каждом из блоков появилась дополнительная строка, называемая «Parameters». Строки «Parameters» связаны между собой стрелками, которые одновременно показывают, какие параметры являются управляющими, а какие управляемыми (рис. 5.15).

Для того чтобы перейти в окно редактирования параметров, достаточно два раза нажать ЛКМ на блоке «Parameters Set».

После выполнения этого действия будет осуществлен переход в окно задания и редактирования параметров.

Как правило, в левом верхнем углу располагается окно «Outline of All Parameters» со всеми параметрами текущей задачи (рис. 5.16).

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	P1	Natyag	0,1	
4	P2	D_vnutr	25	
*	New input parameter	New name	New expression	
6	Output Parameters			
7	P5	Equivalent Stress 2 Maximum	732,18	MPa
8	P6	Equivalent Stress 3 Maximum	115,95	MPa
*	New output parameter		New expression	
10	Charts			
11	Parameter Parallel Chart 0			
12	Parameter Chart 0			

**Входные
параметры**

**Выходные
параметры**

Рис. 5.16. Окно параметров текущей задачи

Следующим окном, которое позволяет рассчитать корреляцию между параметрами, считается окно «Table of Design Point» (рис. 5.17).

В столбце A обозначены задачи, которые отличаются величинами входных параметров. Номера DP (*Design Point*) присваиваются по порядку, и пользователь не может редактировать эту строку. Следующие столбцы светло-желтого цвета (в нашем случае два входных параметра) являются

редактируемыми. Для добавления дополнительной строки расчета необходимо ввести число в пустую ячейку с каким-либо входным параметром.

Table of Design Points							
▼	A	B	C	D	E	F	G
1	Name ▼	P1 - Natyag ▼	P2 - D_vnutr ▼	P5 - Equivalent Stress 2 Maximum ▼	P6 - Equivalent Stress 3 Maximum ▼	Exported	Note ▼
2				MPa	MPa		
3	Current	0,1	25	732,18	115,95		
4	DP 1	0,08	25	⚡ 586,54	⚡ 93,06	<input type="checkbox"/>	
5	DP 2	0,05	25	⚡ 367,3	⚡ 57,086	<input type="checkbox"/>	
6	DP 3	0,03	25	⚡ 220,63	⚡ 34,121	<input type="checkbox"/>	
7	DP 4	0,01	25	⚡ 73,58	⚡ 11,429	<input type="checkbox"/>	
*						<input type="checkbox"/>	

Рис. 5.17. Окно с входными и выходными параметрами текущей задачи

Столбцы серого цвета показывают выходные параметры. В нашем случае выходными параметрами будут эквивалентные напряжения на внутренней и внешней цилиндрической поверхности поршневой головки шатуна. Величины этих значений появятся в таблице после выполнения расчетов.

Оставшиеся столбцы служат для индивидуальной настройки экспорта и примечаний каждой задачи.

Для вызова на экран этих окон (при их отсутствии) служат команды *View – Outline* и *View – Table*.

Попробуем определить зависимость напряжений на внутренней и внешней цилиндрической поверхности поршневой головки шатуна от величины натяга. Для этого в столбец *B* вводим значения натяга согласно рис. 5.17. Значение внутреннего диаметра не изменяем. Таким образом, мы получили пять расчетных задач, отличающихся величиной натяга. Для того чтобы определить значения величин выходных параметров, выполняем команду *Update all design point* (⚡ Update All Design Points) на главной панели.

После окончания расчета таблица с выходными величинами эквивалентных напряжений будет заполнена. Для удобства визуального восприятия результатов расчета представим их в графическом виде.

Выполняем команду *View – Properties* и *View – Chart*. Перед нами появляются два дополнительных окна, которые позволят нам настроить должным образом наши графические зависимости параметров.

В окне *Properties of Outline* настроим параметры выводимого графика:

- по оси *x* отобразим значение натяга, мм;
- по оси *y* будут отображаться значения напряжений на внутренней и внешней цилиндрической поверхности поршневой головки шатуна. При

этом слева будет находиться шкала для внешних, а справа для внутренних напряжений (рис. 5.18).

Properties of Outline A12: 0		
	A	B
1	Property	Value
2	Parameter Chart: General	
3	Exclude Current Design point	<input checked="" type="checkbox"/>
4	X-Axis (Bottom)	P1 - Natyag
5	X-Axis (Top)	
6	Y-Axis (Left)	P6 - Equivalent Stress 3 Maximum
7	Y-Axis (Right)	P5 - Equivalent Stress 2 Maximum

Рис. 5.18. Окно с входными и выходными параметрами текущей задачи

Для того чтобы настроить обозначение осей, графиков, вспомогательной сетки и т.д., используем контекстное меню, вызываемое через ПКМ. Эти операции схожи с операциями по настройке графиков в приложениях *Microsoft Office*.

Например, чтобы настроить подписи осей, используем команду *ПКМ – Edit Properties – Title* и указываем название оси.

Окончательный вид графика зависимости напряжений в головке шатуна от величины натяга представлен на рис. 5.19.

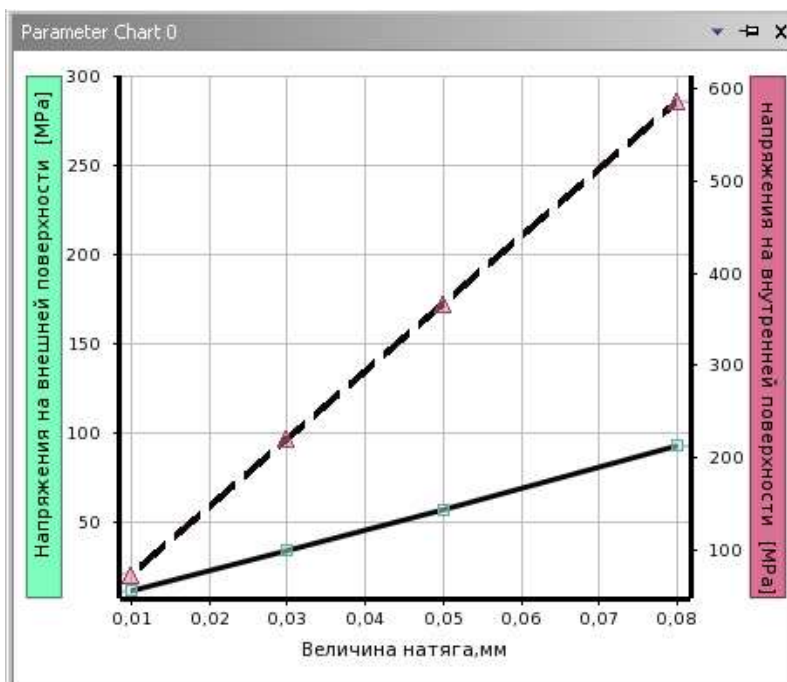


Рис. 5.19. График зависимости напряжений в головке шатуна от величины натяга

При задании нелинейных свойств материала подобный расчет может показать немного другую картину (рис. 5.20).

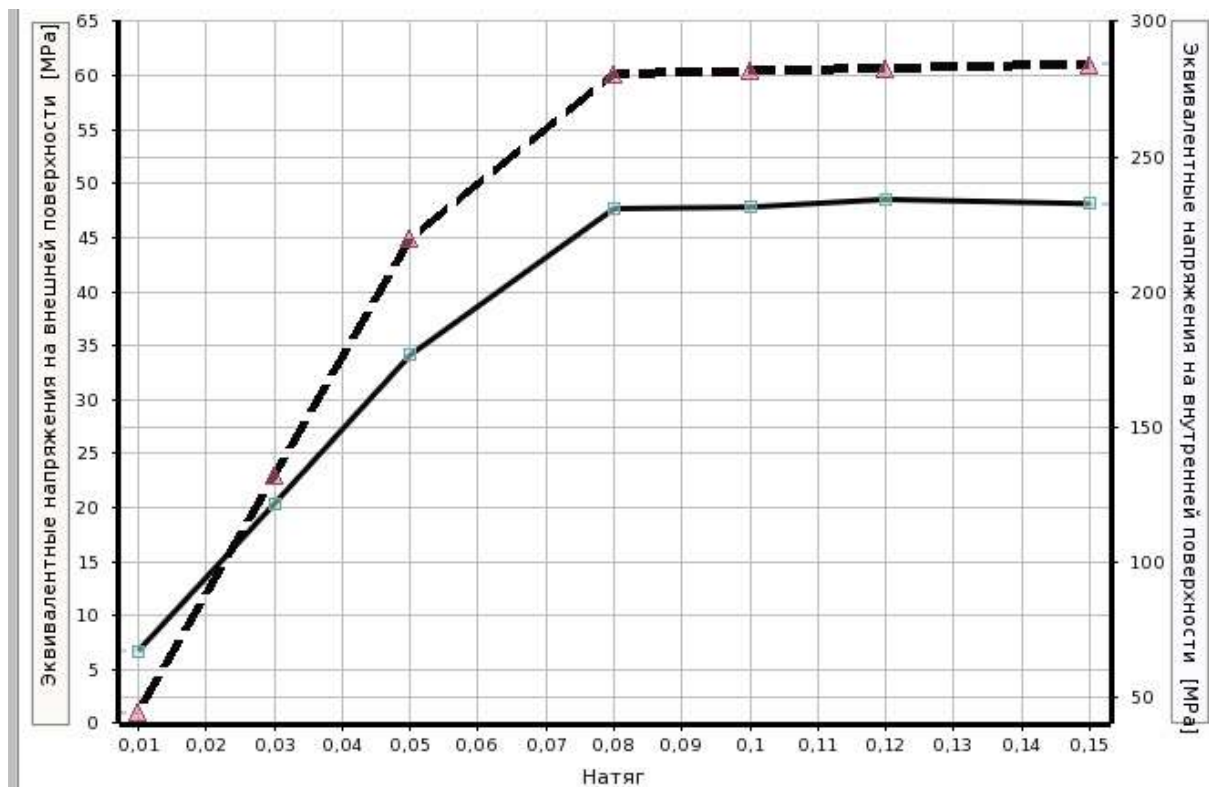


Рис. 5.20. Окно с входными и выходными параметрами при задании нелинейных свойств материалов

Вопросы для самопроверки и практические задания

1. Покажите, каким образом осуществляется создание сборки в *Design Modeler*?
2. Для чего и каким образом задается симметрия модели?
3. Объясните различие между симметричным и асимметричным контактом.
4. Как осуществляется контроль размера элементов на контактной поверхности?
5. Каким образом задаются входные и выходные параметры?
6. Для чего необходимо использовать параметрические задачи?
7. Как провести верификацию управляющих уравнений?
8. Какая команда запускает на расчет все задачи параметрического исследования?
9. Какие команды позволяют настроить расчетные графики?