

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
(СГАУ)

ВИРТУАЛЬНАЯ СБОРКА ГТД

Электронные методические указания
к лабораторным работам

Работа выполнена по мероприятию блока 1
«Совершенствование образовательной деятельности» Программы
развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка
образовательных стандартов СГАУ по специальности 160700.65 –
Проектирование авиационных и ракетных двигателей и
направлению подготовки бакалавров 160700.62 – Двигатели
летательных аппаратов со сквозной документацией и создание
исследовательских лабораторных работ и прогрессивных
технологий лекционных заданий»
Соглашение № 1/4 от 03.06.2013 г.

САМАРА 2013

УДК621.717(075)+621.431.75(075)

ББК34.6я7+39.55я7

В 526

Авторы - составители: **Смирнов Геннадий Владиславович**
Курбатов Валерий Павлович
Проничев Николай Дмитриевич

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Самохвалов

Компьютерная верстка: Н.В. Николаева

Редакторская обработка: Н.В. Николаева

Виртуальная сборка ГТД [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к лаб. работам / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост.: Г.В. Смирнов, В.П. Курбатов, Н.Д. Проничев – Электрон. текстовые и граф. дан. (1,13 Мбайт). - Самара, 2013. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Методические указания предназначены для студентов факультета «Двигатели летательных аппаратов»: бакалавров специальности 160700.62 – Двигатели летательных аппаратов (ФГОС-3), изучающих дисциплины: «Информационные технологии в механообрабатывающем производстве», «Проектирование производственных систем» в 8 семестре, и специалистов направления 160700.65 – Проектирование авиационных и ракетных двигателей (ФГОС–3), изучающих дисциплины: «Инновационные технологии производства АД и ЭУ» в 9 и А семестрах, «Виртуальная сборка АД и ЭУ» в А семестре. В методических указаниях рассмотрены способы моделирования нагрузок и контроль усилий затяжки при производстве ДЛА, а также приведена методика проведения экспериментов и обработки результатов исследований.

Разработано на кафедре производства двигателей летательных аппаратов.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	5
2 МЕТОДИКА РАБОТЫ С ПРОГРАММОЙ ANSYS ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ РЕЗЬБЫ	6
2.1 Порядок построения конечно-элементной модели резьбы	6
2.2. Порядок проведения расчетов	7
2.3. Представление результатов моделирования	8
3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	10
3.1. Цель и задачи лабораторного эксперимента	10
3.2. Проведение эксперимента и обработка результатов	10
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	16
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	21
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	25

Введение

Интенсивная информатизация всех сфер деятельности открыла новые возможности по созданию передовых технологий, позволяющих повысить качество аэрокосмической техники и снизить затраты на её производство. Разработка информационных моделей технологических процессов сборки двигателей является наиболее сложной задачей, т.е. требует совместного рассмотрения 3D-моделей изделий, всех комплектующих деталей и сборочных единиц, а также различных моделей формирования большого числа сборочных параметров, которые должны быть выдержаны при сборке с заданной точностью, а их величина определяется совокупностью процессов, имеющих различную природу.

При создании моделей виртуальной сборки двигателей в производстве могут решаться задачи разного уровня:

1. Оценка собираемости изделия, инструментодоступности.
2. Расчет размеров компенсаторов, распорных втулок и т.п.
3. Оптимизация состава сборочного комплекта в условиях неполной взаимозаменяемости.
4. Расчет размеров сопрягаемых деталей в условиях выпуска изделий в многономенклатурном производстве при реализации комплектной обработки.
5. Проверка условий обеспечения заданных требований по точности сборочных параметров на основе использования компьютерных баз, полученных при контроле деталей по их 3D-моделям.

На первом уровне виртуальная сборка может проводиться при проектной разработке технологического процесса на этапе анализа технологичности изделия.

На втором уровне задача решается при реализации конкретного технологического процесса на основе расчета сборочной размерной цепи при наличии данных по размерам деталей в принятой комплектации сборочной единицы.

На третьем уровне при виртуальной сборке необходимо разработать модель оптимизации сборочного комплекта деталей по точности сборочных параметров на основе анализа размеров деталей изготовленных в производстве.

На четвертом уровне создания моделей виртуальной сборки решаются проблемы обеспечения точности сборочных параметров при организации производства в соответствии с принципами комплектной обработки. В этих условиях комплектация должна проводиться в процессе изготовления деталей, т.е. одна или несколько деталей из комплекта должны быть изготовлены с точностью, которая определена на основе виртуальной сборки.

Пятый уровень создания моделей виртуальной сборки является наиболее общим и сложным для реализации. Он предполагает учет всех факторов имеющих различную физическую природу и влияющих на точность большого числа сборочных параметров, модель должна анализироваться на основе многопараметрической оптимизации.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Практика эксплуатации двигателей летательных аппаратов и других машин показывает, что одной из основных причин разрушения резьбовых соединений является значительное отклонение усилия затяжки болтов, винтов и шпилек от оптимального значения, обеспечивающего их нормальную работу. Это вызвано тем, что создание необходимого усилия затяжки резьбового соединения связано с трудностью контроля этого усилия при сборке. Поэтому возникает необходимость в оценке точностных и других технологических характеристик применяемых способов контроля усилия затяжки резьбовых соединений. Это позволит более обоснованно подходить к выбору того или иного способа контроля исходя из конструктивно-технологических особенностей резьбового соединения.

В работе рассматривается методика моделирования в среде Ansys версии 5.7 и выше с использованием APDL макроса резьбового соединения.

Модель позволяет построить однозаходную метрическую резьбу практически любого диаметра и шага.

Можно моделировать различные виды нагрузок на болт, как в отдельности, так и в произвольной комбинации:

- усилие затяжки;
- момент затяжки (момент на ключе);
- удлинение болта или его отклонение от оси.

Можно регулировать густоту сетки конечных элементов по элементам самой резьбы и базового цилиндра.

Можно задавать различные характеристики материала болта:

- плотность материала (в $\text{кг}/\text{м}^3$);
- коэффициент Пуассона;
- модуль упругости (модуль Юнга).

Результатом расчета в среде Ansys является картина распределения напряжений и смещений при упругом деформировании в рамках модели.

2 МЕТОДИКА РАБОТЫ С ПРОГРАММОЙ ANSYS ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ РЕЗЬБЫ

2.1 Порядок построения конечно-элементной модели резьбы

Для запуска программы-макроса из Ansys 5.7 переходим <File> - <read input from> - <расположение файла с макросом>

Программа автоматически построит модель, пригодную для расчёта.

Для изменения параметров построения резьбы и прикладываемой нагрузки необходимо изменить подпрограмму-макрос в любом текстовом редакторе. Текст макроса представлен в Приложении 1. Порядок ввода исходных данных в п. 3.2. Пример практической реализации методики моделирования приведен в приложении 3 (Видеопособие).

В тексте программы цветом отмечены места изменения параметров.

При введении параметров резьбы следует обратить внимание на:

1. размерность единиц для задания геометрии резьбы (все в мм);
2. условие целого числа витков резьбы($\lfloor r$ должно быть целым числом);
3. размерность прикладываемых нагрузок

ВНИМАНИЕ! СОХРАНИТЬ ИЗМЕНЁННЫЙ МАКРОС!

При указании папки с макросом следует иметь в виду, что путь НЕ должен содержать русских букв. Это связано с особенностями программы Ansys. Путь должен быть указан английскими буквами.

В результате выполнения программы в окне Ansys Graphics появится изображение резьбы с сеткой конечных элементов. Например, M20x4 (рисунок 1).

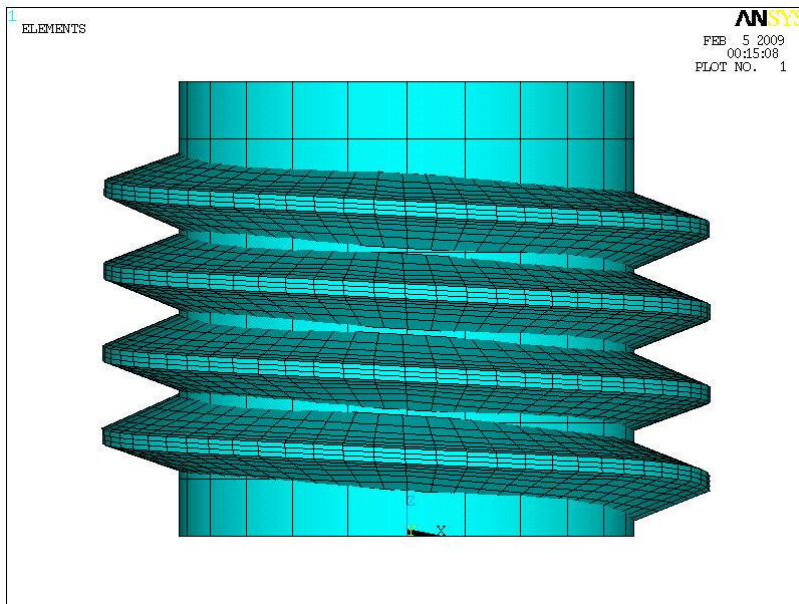


Рисунок 1 - Изображение готовой модели

2.2 Порядок проведения расчетов

Далее модель необходимо запустить на расчёт. Для этого в меню в левой части экрана выбираем вкладку SOLUTION – Currents LS – ОК. На предупреждение нажимаем ОК (Да).

Об успешном выполнении расчёта сообщает жёлтое окно с текстом «Solution is done». После выполнения расчёта нажимаем close и закрываем ТЕКСТОВОЕ окно.

В зависимости от того, что необходимо показать далее (какой вид напряжений или какое-либо направление деформаций), выбираем в Ansys Main Menu – General postprocessor – plot results – nodal solution. В появившемся окне Dof solution дают перемещения, а следующая вкладка Stress – напряжения (рисунок 2). Направления осей следующие:

OX – радиальная

OY – радиальная

OZ – осевая

Иногда может возникнуть проблема, состоящая в том, что программа при запуске на расчёт или при построении будет выдавать ошибку. Эта проблема связана либо с некорректным заданием резьбы, либо с тем, что получается очень большое количество витков. В таком случае следует повторить построение, уменьшив число витков на 1.

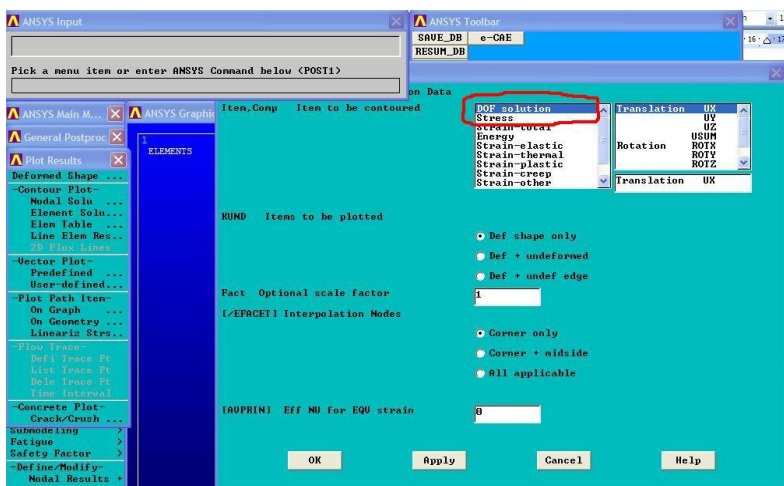


Рисунок 2 - Меню выбора полученных результатов

2.3 Представление результатов моделирования

В результате появится картинка с распределением напряжений или смещений, в зависимости от того, что потребовалось (рисунок 3).

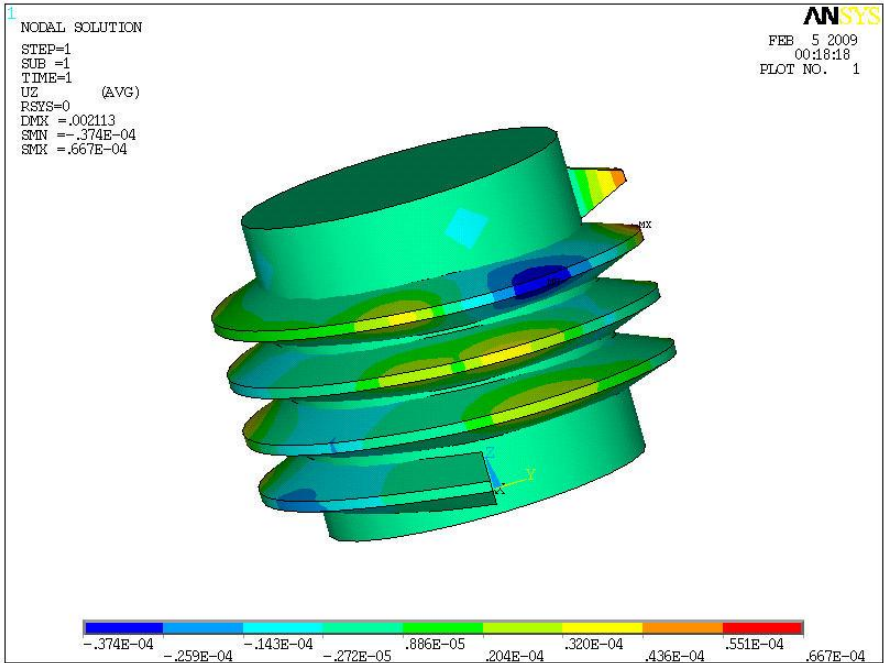


Рисунок 3 - Результаты расчёта модели резьбы (вертикальные перемещения)

В Приложении 3 представлен видеофайл «Пример использования AVI, который может быть воспроизведен стандартным проигрывателем Windows Media Player. Ролик позволяет посмотреть, как выполняются все описанные выше операции.

3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1 Цель и задачи лабораторного эксперимента

При выполнении эксперимента производится затяжка гайки динамометрическим ключом через равные интервалы 5, 10, 15 и

20 кН. Для каждого значения усилия затяжки $Q_{z(o)}$ определяется момент затяжки $M_{зам}$, удлинение болта Δl_o и угол $\varphi_{зам}$. Все полученные данные заносятся в таблицу отчёта.

К указанным выше величинам добавляется величина расчёта удлинения болта $\Delta l_{РАСЧ}$, которая вычисляется с помощью конечноэлементной-модели, выполненной в программной среде Ansys. В рамках модели производится четырёхкратный расчёт удлинения болта с помощью полуавтоматической подпрограммы.

В программе воспроизведён лабораторный эксперимент. По заданным пользователем параметрам строится КЭ-модель испытуемого болта с резьбой M12x1.5, длина болта – 83мм, материал – сталь 30ХГСА.

При выполнении лабораторной работы рекомендуется провести 4 расчёта с помощью программы для тех же усилий затяжки. Программа составлена таким образом, что для одного расчёта требуется ввести только величину усилия затяжки. Результатом выполнения программы будут 2 картины с распределениями смещений по всему болту и по его исследуемой части, в которой в лабораторном эксперименте находится непосредственно индикатор индикаторных часов.

3.2 Проведение эксперимента и обработка результатов

Методика проведения расчёта в среде Ansys 5.7.

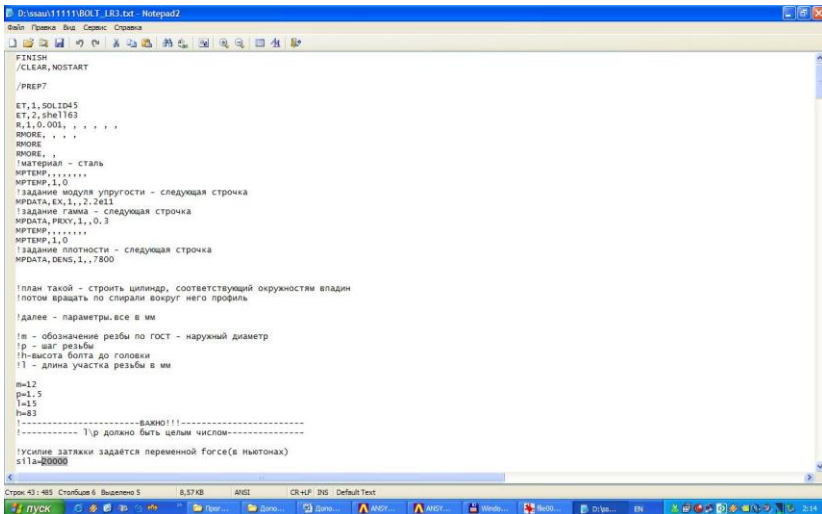
Программа для расчета представляет собой программу-макрос, написанную на языке APDL, который является внутренним языком программирования Ansys. Она выполнена в виде текстового файла с названием BOLT_LR3.txt.

Расчёты производится в следующей последовательности:

1. Запускается программа Ansys 5.7. Пуск – Все программы – Ansys 5.7 – Interactive.
2. В строке Working directory устанавливается рабочая директория. В дальнейшем в неё будут записываться все результаты экспериментов. Нажимаем кнопку Run.
3. Копируем текстовый файл BOLT_LR3.txt в установленную в предыдущем пункте папку, если его там ещё нет.
4. В **скопированном** файле устанавливаем требуемую величину нагружения (рисунок 4).

В выделенной строке устанавливаем величину нагрузки. При выполнении первого расчёта заменяем число в файле на 5000 (это соответствует 5кН), при последующих расчётах число меняется на 10000, 15000 и 20000. И **ОБЯЗАТЕЛЬНО сохраняем файл** под своим же именем в той же папке.

Все процедуры, связанные с проведением компьютерных исследований приведены в Приложении 3 (Видеопособие).



```
FINISH
/CLEAR,NOSTART
/PRER7
ET,1,SOLID65
ET,2,shell183
R,1,0,0,001,.,.,.
BPOKE,.,.
BPOKE,.,.
BPOKE,.,.
!материал - сталь
MATERIAL,.,.
MTEMP,.,.
!задание модуля упругости - следующая строка
MPDATA,EX,1,,2.2e11
!задание гамма - следующая строка
MPDATA,PRXY,1,,0.3
MTEMP,.,.
MTEMP,.,.
!задание плотности - следующая строка
MPDATA,DENS,1,,7800

!план такой - строить цилиндр, соответствующий окружностям впадин
!потом вращать по спирали вокруг него профиль

!далее - параметры, все в мм

!m - обозначение резьбы по ГОСТ - наружный диаметр
!r - шаг резьбы
!h-высота болта до головки
!l - длина участка резьбы в мм

m=12
r=1.5
h=15
l=83
!-----ВАЖНО!!!!-----
!----- }r должно быть целым числом-----

!Усилие затяжки задается переменной force(в ньютонах)
s11a=20000
```

Рисунок 4 - Пример заполнения величины нагружения

5. В окне Ansys в верхнем меню выбираем File – Read input from и в появившемся окне находим файл BOLT_LR3.txt (рисунок 5). Программа начнёт построение и расчёт.

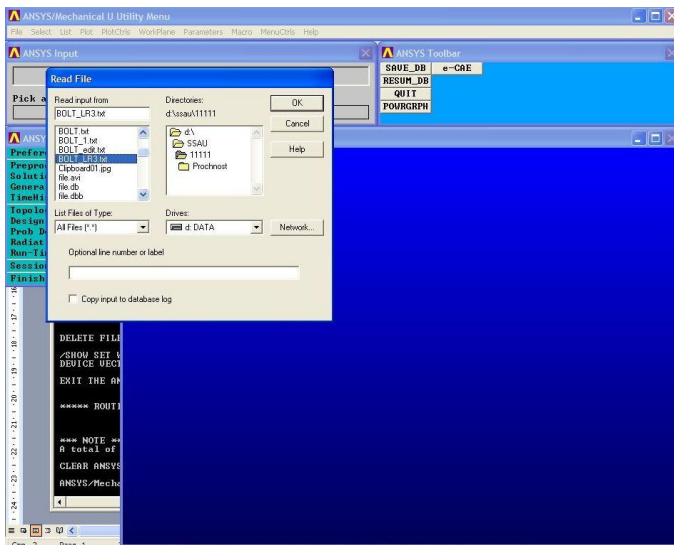


Рисунок 5 - Окно Ansys, меню File - Read input from

6. В процессе выполнения программа выдаёт окно с предупреждением – в нём необходимо нажать ОК.
7. Результатом успешного выполнения расчёта является окно (рисунок 6).
8. Нажимаем кнопку Close. В созданной в п.2 рабочей директории появились 2 новых файла с именами File000.jpg и File001.jpg. Если в папке уже содержались файлы с такими именами, то для дальнейшего анализа нужны 2 файла с наибольшими номерами.
9. Открываем эти новые файлы. В файле с меньшим номером показана картина распределения смещений по всему болту (рисунок 7).

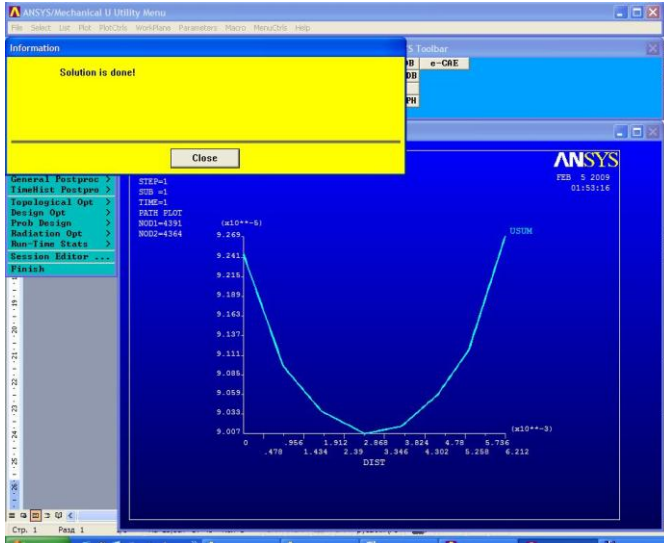


Рисунок 6 - Окно результата успешного выполнения расчёта

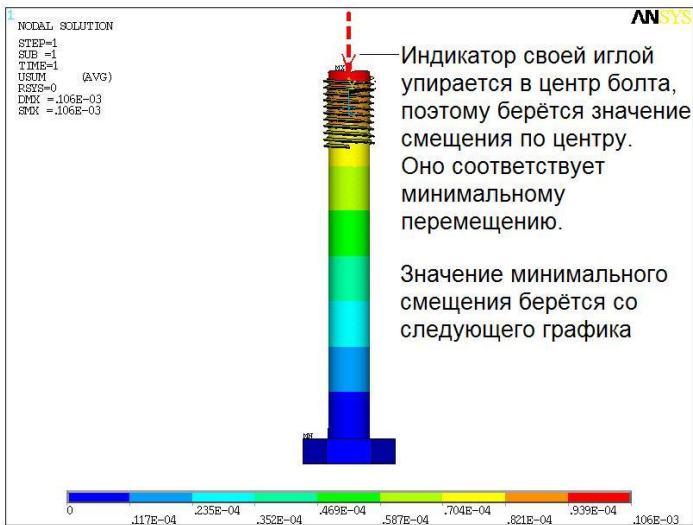


Рисунок 7 - Распределение смещений по всему болту

10. В файле с большим номером показано распределение смещений по торцу болта, где расположен индикатор - на предыдущей картинке он отмечен пунктирной линией (рисунком 8).

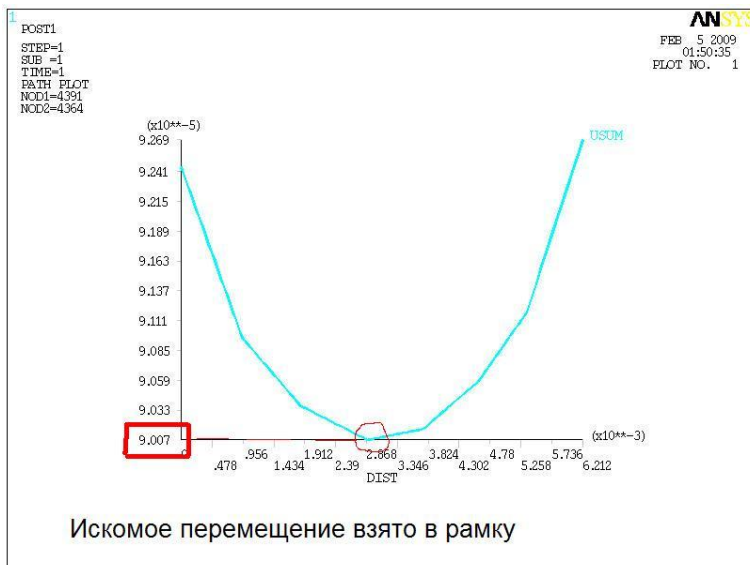


Рисунок 8 - Искомое перемещение

11. С данной картинке необходимо записать значение смещения в минимальной точке, которая находится примерно посередине графика (на предыдущей картинке отмечена красной линией) и занести в пункт таблицы $\Delta l_{бРАСЧ}$.

При этом необходимо учитывать, что значение берётся с вертикальной оси и умножается на 10^{-2} степени, чтобы получить величину в мм. На указанной выше картинке величина смещения составляет 0.09007мм.

12. Закрываем просмотр картинок.

13. Приступаем к следующему расчёту – меняем нагрузку на болт в файле BOLT_LR3.txt (как показано в п.4) на величину нагружения в следующем эксперименте и повторяем все операции.
14. В результате в окончательной таблице должны быть представлены 4 значения удлинений болта, взятых с полученных графиков.
15. После выполнения эксперимента на установке сравниваются экспериментальные данные и данные, полученные в результате расчётов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

FINISH

/CLEAR,NOSTART

/PREP7

ET,1,SOLID45

ET,2,shell63

R,1,0.001, , , , ,

RMORE, , , ,

RMORE

RMORE, ,

!материал - сталь

MPTEMP, , , , , , , ,

MPTEMP,1,0

!задание модуля упругости - следующая строчка

MPDATA,EX,1,,2e11

!задание гамма - следующая строчка

MPDATA,PRXY,1,,0.3

MPTEMP, , , , , , , ,

MPTEMP,1,0

!задание плотности - следующая строчка

MPDATA,DENS,1,,7800

!!далее – параметры все в мм

!m - обозначение резьбы по ГОСТ - наружный диаметр

!p - шаг резьбы

!l - длина участка резьбы в мм

!h-высота болта до головки

m=12

p=2

l=12

h=2

!-----ВНИМАНИЕ!-----

!----- l/p должно быть целым числом, это число равно числу
полных витков---

!Усилие затяжки задаётся переменной force(в Ньютонах)

Force=1000

!Момент затяжки задаётся переменной MOMENT (в Н/м)
MOMENT=3000

!удлинение болта задаётся переменной extension(в мм)
extension=0

k,1,0,0,0

k,2,0,0,0.001*1

!точки оси резьбы

!считаем, что резьба оканчивается полным профилем. с него и начинаем построение

!точки профиля с учётом внутреннего диаметра резьбы - отталкиваемся от него

k,3,0.001*m/2-5/8*p*0.001,0,1/8*p*0.001+0

k,4,0.001*m/2,0,1/8*p*0.001+0.001*p*0.25

k,5,0.001*m/2,0,1/8*p*0.001+0.001*p*(0.25+1/8)

k,6,0.001*m/2-5/8*p*0.001,0,1/8*p*0.001+0.001*(0.5+1/8)*p

k,7,0.001*m/2-5/8*p*0.001,0,0

k,8,0.001*m/2-5/8*p*0.001,0,2/8*p*0.001+0.001*(0.5+1/8)*p

!k-500 - базовая для спирали

k,500,0.001*m/2-5/8*p*0.001,0,2/8*p*0.001+0.00000

!будем строить сплайн по точкам спирали, расположенным на четверти окружности с шагом по высоте

!i=счетчик цикла, nk -последний номер точки... определяется автоматом

nk=2*1/p+1

plusminus=1

*Do,i,1,NK+1+2

plusminus=-1*plusminus

k,2*i+500,plusminus*(0.001*m/2-

5/8*p*0.001),0,(4/8*p*0.001+4/8*p*0.001*i)/1.5

k,1+2*(i-1)+500,0,plusminus*(0.001*m/2-

5/8*p*0.001),(2/8*p*0.001+4/8*p*0.001*i)/1.5

*ENDDO

```
!501 +x -z
!503 -x -z
!505 -x +z
!507 +x +z
A,3,4,5,6
k,499,kx(503),ky(503),kz(503)-p*0.001
k,498,kx(502),ky(502),kz(502)-p*0.001
k,497,kx(501),ky(501),kz(501)-p*0.001
k,496,kx(500),ky(500),kz(500)-p*0.001
FLST,2,2*nk+2+1+8,3
*Do,i,1,2*NK+2+1+8
FITEM,2,500+i-1-4
*enddo
SPLINE,P51X
LDELE,5
LDELE,6
LDELE,7
LDELE,8
LDELE,9+4*1/p+4
LDELE,9+4*1/p+4+1
LDELE,9+4*1/p+4+2
LDELE,9+4*1/p+4+3
FLST,8,9+4*1/p+3-9,4
*Do,i,1,9+4*1/p+3-9
FITEM,8,9+i-1
*enddo
VDRAG, 1, , , , ,P51X
CYL4,0,0,kx(500), , , ,h*0.001

NUMMRG,ALL,,,,LOW
FLST,2,19,6,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-19
VADD,P51X
ETDEL,2
```

```
ETDEL,1
ET,1,SOLID45
VPLOT
MODMSH,STAT
SHPP,ON
SHPP,ON,ASPECT
SHPP,ON,PARA
SHPP,ON,MAXANG
SHPP,ON,JACRAT
SHPP,ON,WARP
SHPP,ON,ANGD
/AUTO, 1
/REP
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , all
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
VSWEEP,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!FLST,2,4*(1/p+1)-1,5,ORDE,4*(1/p+1)-1
!*Do,i,1,2*(1/p+1)-1
!FITEM,2,4+10*(i-1)
!FITEM,2,9+10*(i-1)
!*enddo
!FITEM,2,4+10*(i-1+1)
!/GO
!DA,P51X,UZ,+0
ALLSEL,ALL
ASEL,S, , , (3+4*1/p)*5+1+2
NSLA,S
NPLOT
/GO
```

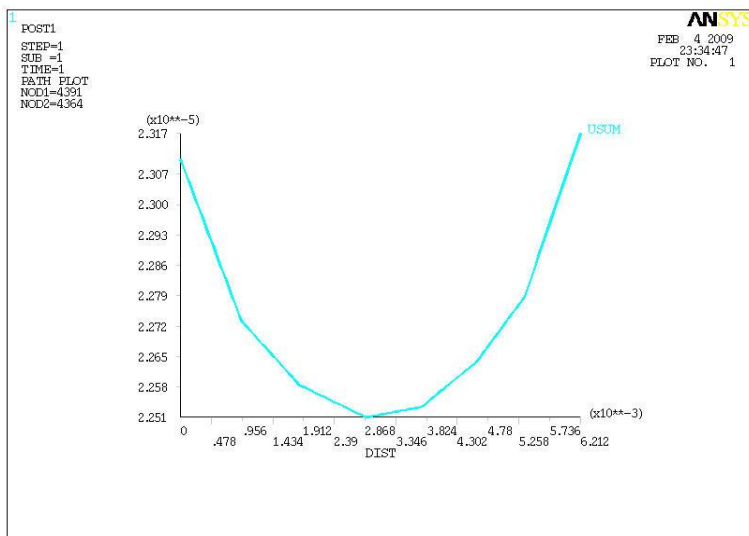
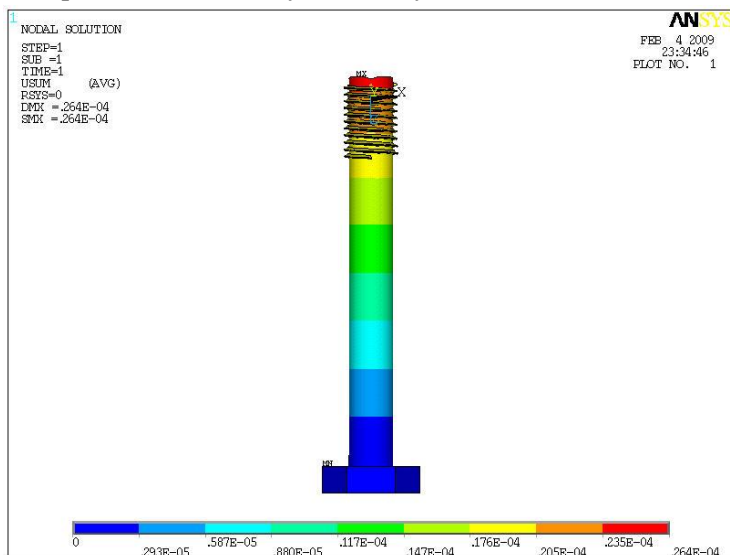
Окончание прил.1

```
F,all,FZ,Force/96
ALLSEL,ALL
FK,4*(3+4*1/p)+12+1,FY,+Moment/(2*kx(500))/2
FK,4*(3+4*1/p)+12+3,FY,-Moment/(2*kx(500))/2
FK,4*(3+4*1/p)+12+2,FX,-Moment/(2*kx(500))/2
FK,4*(3+4*1/p)+12+4,FX,+Moment/(2*kx(500))/2
DA,(3+4*1/p)*5+1+2,UZ, extension*0.001
/REPLO
CPINTF,ALL,0.001*p/20,
DL,4, ,ALL,
EPLOT
/VIEW, 1 ,,-1
/ANG, 1
/REP,FAST
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

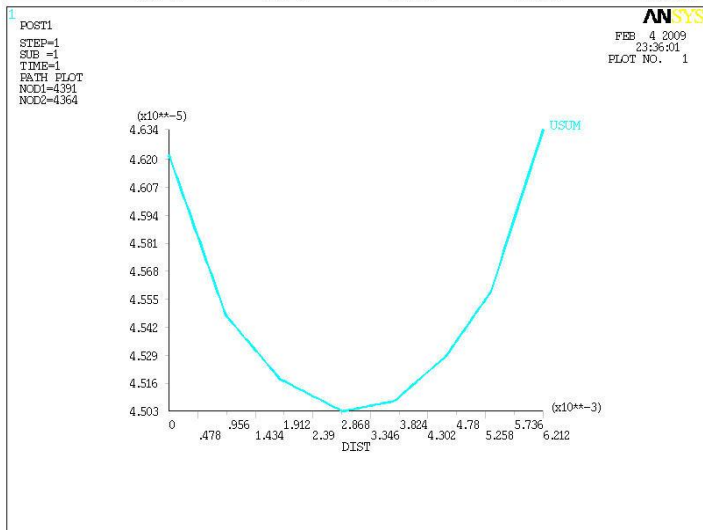
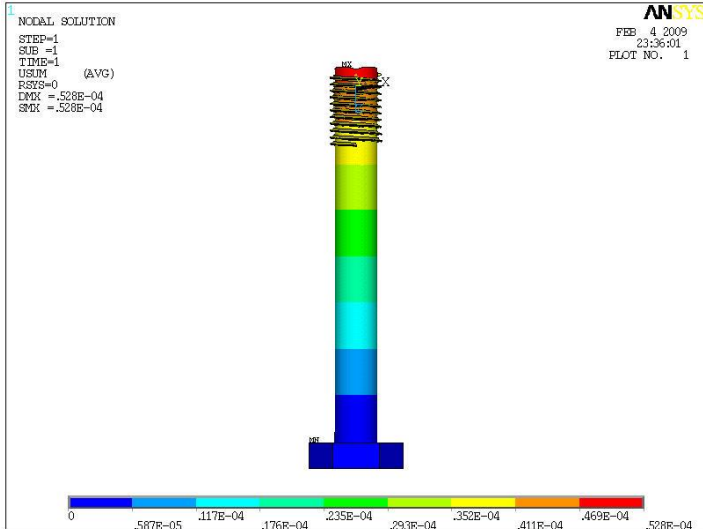
Пример расчета.

При силе в 5кН получим следующее:



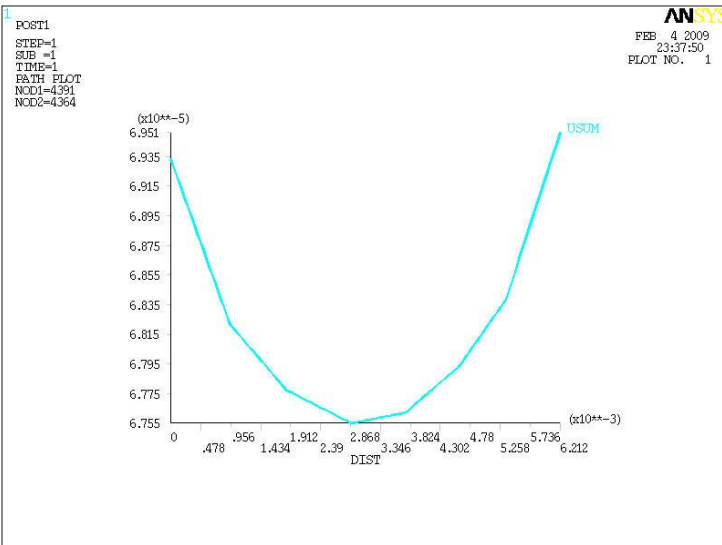
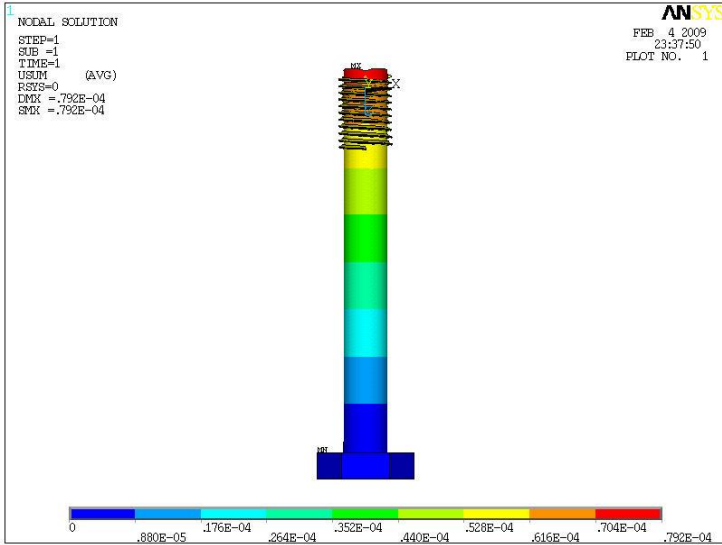
Величина удлинения составляет 0.002251мм

При силе 10кН получим следующее:



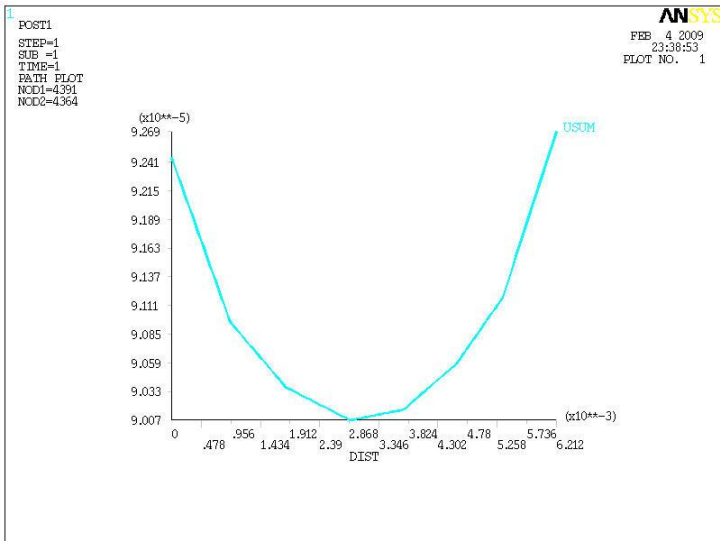
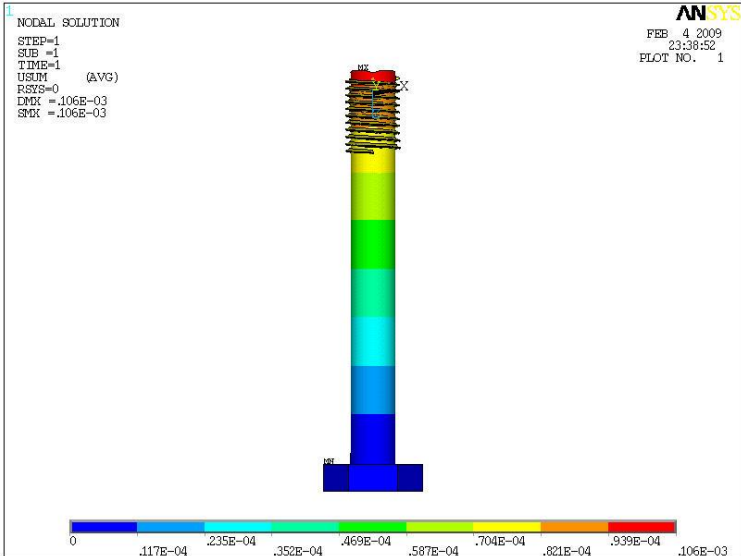
Величина удлинения составляет 0.04503мм

При силе в 15 кН получим следующее:



Величина удлинения составляет 0.06755мм

При силе в 20кН получим следующее:



Величина удлинения составляет 0.09007мм

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Видеопособие