

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

С.А. БУКАТЫЙ, А.С. БУКАТЫЙ, А.Л. ВОДОЛАГИН

РАСЧЁТ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЖЁСТКОСТЕЙ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 13.03.03 Энергетическое машиностроение, 15.03.01 Машиностроение, 15.03.03 Прикладная механика, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 24.03.01 Технология транспортных процессов, 24.03.04, 24.04.04 Авиастроение, 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов, 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей, 24.05.04 Двигатели летательных аппаратов, 24.05.07 Самолёто- и вертолётостроение, 25.03.01 Техническая эксплуатация, летательных аппаратов и двигателей, 27.03.02 Управление качеством

САМАРА
Издательство Самарского университета
2022

УДК 539(075)
ББК 30.121я7
Б906

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Г. В. Смирнов,
заместитель технического директора
ПАО «ОДК-Кузнецов» С. Ф. Кротов

Букатый, Алексей Станиславович

Б906 **Расчёт статически неопределимых сложных систем методом эквивалентных жёсткостей:** учебное пособие / *С.А. Букатый, А.С. Букатый, А.Л. Водолагин.* – Самара: Издательство Самарского университета, 2022. – 76 с.

ISBN 978-5-7883-1835-6

Содержатся теоретические основы решения сложных статически неопределимых систем газотурбинного двигателя (ГТД) методом эквивалентных жёсткостей. Показано применение метода для расчёта ротора компрессора низкого давления двигателя семейства Д-30 с использованием пакета MathCAD и комплекса ANSYS. Приведены варианты заданий для самостоятельной работы студентов по расчёту абсолютных деформаций и эквивалентных жёсткостей элементов ГТД методом конечных элементов. В приложении пособия содержатся необходимые справочные данные по использованию комплекса ANSYS, а также таблицы механических характеристик материалов.

Предназначено для студентов авиационных и других машиностроительных специальностей всех форм обучения, изучающих курс «Сопротивление материалов».

Подготовлено на кафедре сопротивления материалов Самарского университета.

УДК 539(075)
ББК 30.121я7

ISBN 978-5-7883-1835-6

© Самарский университет, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. Расчёт статически неопределимых сложных систем методом эквивалентных жёсткостей при силовом и температурном воздействиях	6
1.1. Метод эквивалентных жёсткостей и его применение для расчёта сложных СНС.....	8
1.2. Методика расчёта изменения осевой силы N_0 при нагревании ротора.....	10
1.3. Методика расчёта изменения осевой силы N_0 от действия газодинамических сил.....	11
2. Пример расчёта осевой силы методом эквивалентных жёсткостей	12
3. Методика конечно-элементного расчёта в комплексе ANSYS	15
3.1. Выбор типа элементов	16
3.2. Задание свойств материала.....	17
3.3. Создание геометрической модели в комплексе ANSYS ...	18
3.3.1. Импорт модели	19
3.3.2. Твёрдотельное моделирование	22
3.3.3. Создание модели в интерактивном режиме работы .	23
3.4. Создание конечно-элементной модели	23
3.4.1. Создание произвольной сетки (автоматически).....	24
3.4.2. Создание упорядоченной сетки	24
3.4.3. Создание контактных пар.....	28
3.5. Задание граничных условий	31
3.6. Выбор типа расчёта и запуск на расчёт.....	32
3.7. Просмотр результатов расчёта и их анализ	32

4. Разработка модели компрессора низкого давления двигателя Д-30К и расчёт абсолютных деформаций элементов ротора	33
4.1. Имя задачи и директории, установка фильтров меню	34
4.2. Выбор типа элементов	35
4.3. Свойства материала.....	35
4.4. Создание модели ротора	37
4.5. Расчёт напряженно-деформированного состояния ротора	45
5. Варианты заданий для самостоятельной работы	56
Приложение 1	61
Приложение 2	63
Приложение 3	71
Библиографический список	75

ВВЕДЕНИЕ

В данном пособии в качестве сложной статически неопределимой системы будем рассматривать расчёт ротора компрессора низкого давления (КНД), двигателя семейства Д30 (рис. 1.1). При сборке диски ротора стягиваются болтом с заданным начальным усилием N_0 . В результате диски, опора и болт ротора образуют сложную статически неопределимую систему (СНС), работающую на изгиб с растяжением-сжатием. При запуске и последующей работе двигателя под действием температуры T и газодинамических сил P происходит перераспределение сил и изменение усилия N_0 , зависящее от величин T , P , температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материалов и жёсткости составляющих элементов ротора и болта.

При выборе параметров ротора с целью исследования его температурно-силового режима работы и оптимизации напряжённо-деформированного состояния (НДС) требуются многократные расчёты. Вследствие сложности конструкции ротора полный расчёт с необходимой точностью методом конечных элементов (КЭ) сложный и становится очень трудоёмким. Поэтому в данной работе предлагается смешанный метод. КЭ-расчёт проводится только один раз с целью определения эквивалентной жёсткости ротора и других элементов. Далее используются простые расчётные схемы в виде сплошных цилиндров с эквивалентными жёсткостями, работающих только на растяжение-сжатие. Расчёты проводят на основе классического подхода – раскрытие статической неопределимости системы с использованием уравнений равновесия и условий совместности деформаций элементов ротора и болта.

Изложенный в пособии метод [1, 2] и методика его реализации справедливы и для расчёта ротора компрессора высокого давления, а также для любых аналогичных по работе сложных СНС.

1. РАСЧЁТ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЖЁСТКОСТЕЙ ПРИ СИЛОВОМ И ТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

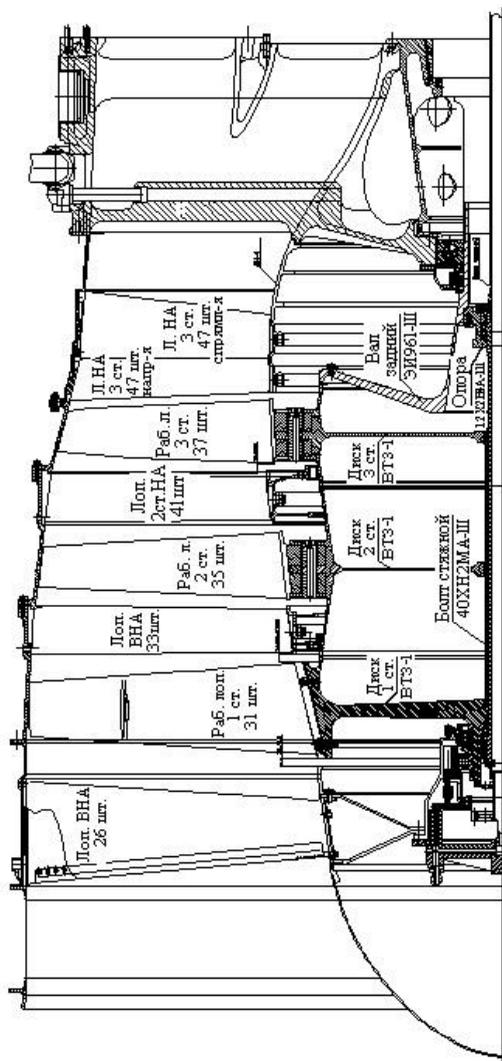


Рис. 1.1 Схема ротора КНД в сборе

При сборке и последующей работе ГТД указанные болт и опора испытывают только растяжение, а остальные элементы ротора КНД (или КВД) находятся в условиях сложного сопротивления «изгиб с растяжением-сжатием». Решение многовариантных оптимизационных статически неопределимых задач методом КЭ очень трудоёмко. Поэтому в данной работе предлагается смешанный метод, в котором используются КЭ-модели для сложных элементов, работающих одновременно на изгиб и растяжение-сжатие, и расчётные схемы в виде полых или сплошных цилиндров для простых деталей – стяжного болта и опоры, работающих только на растяжение-сжатие. При этом для определения эквивалентных жёсткостей составляющих его элементов предлагается осуществлять однократный КЭ-расчёт ротора без болта под действием постоянной осевой сжимающей нагрузки как статически определимой системы. Для ротора КНД, например, в число таких элементов входят диски, задний вал и опора. Для упрощения расчётов в ряде случаев деформациями некоторых элементов, размеры которых значительно меньше, а жёсткость значительно больше жёсткости остальных элементов, можно пренебречь.

В соответствии с принципом независимости действия сил дальнейший расчёт основан на классическом подходе, использующем условия равновесия и совместности деформаций ротора и осевых элементов – стяжного болта КНД или вала КВД. Получаемые при этом выражения, в которых деформации ротора учитываются на основе эквивалентной жёсткости, позволяют легко и быстро вычислять искомые силы от температурных и газодинамических воздействий с применением пакетов MathCAD или Excel. После завершения оптимизационного расчёта и определения окончательного усилия N_0 можно продолжить уточнённые расчёты НДС элементов ротора в условиях, соответствующих статической определимости.

1.1. Метод эквивалентных жёсткостей и его применение для расчёта сложных СНС

Учитывая только элементы, работающие на изгиб с растяжением-сжатием, схему ротора КНД можно представить в следующем виде (рис. 1.2). Границы участков l_i определяются по точкам приложения сосредоточенных сил, равных равнодействующим газодинамических сил, действующих на лопатки дисков.

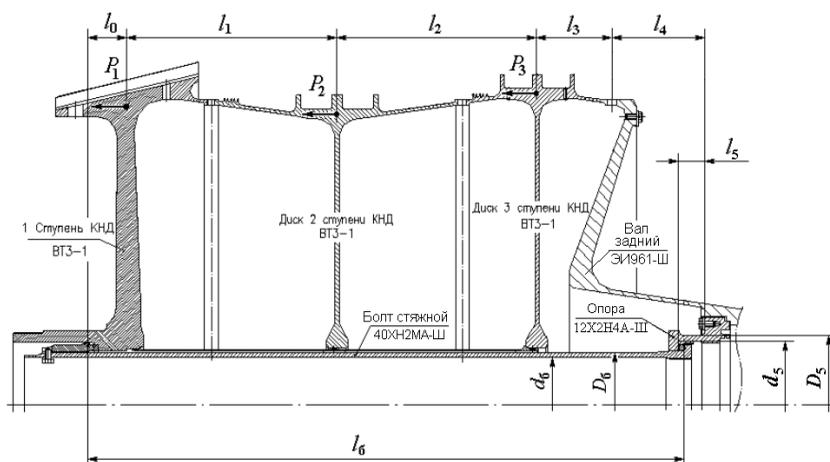


Рис. 1.2. Схема элементов ротора КНД

Расчёт стяжного болта и опоры, испытывающих только растяжение, можно сделать аналитическим методом. Удлинение болта или опоры длиной l , растянутых силой N , представим в следующем общем виде

$$\Delta l = \frac{N \cdot l}{E \cdot A} = \frac{N \cdot l}{G}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала; A – площадь поперечного сечения; $E \cdot A$ – жёсткость на растяжение или сжатие.

Из (1) следует выражение для эквивалентной жёсткости на растяжение-сжатие G , которое применимо к любым деталям или участкам деталей длиной l

$$G = \frac{N \cdot l}{\Delta l}, \quad (2)$$

где Δl – деформация удлинения элемента конструкции, определяемая расчётом или экспериментально.

Для простых деталей, например стержней или валов с постоянным поперечным сечением A и подвергающихся только растяжению или сжатию, эквивалентная жёсткость равна фактической $G = E \cdot A$, как в случае (1). Для сложных деталей или конструкций, например дисков или вала заднего, составляющих ротор и испытывающих растяжение-сжатие с изгибом, необходимо сначала для каждого участка длиной l_i определить методом КЭ или экспериментально абсолютную осевую деформацию Δl_i от действия некоторой фиксированной силы N . Тогда эквивалентная жёсткость i -го участка в соответствии с (2) определяется выражением

$$G_i = \frac{N \cdot l_i}{\Delta l_i}. \quad (3)$$

В нашем случае расчёт удлинений участков ротора Δl_i ($i = 1 \dots 4$) в силу сложности их геометрии будем проводить методом КЭ. Жёсткости опоры¹ и болта обозначим соответственно

$$G_5 = E_5 \cdot A_5, \quad G_6 = E_6 \cdot A_6, \quad (4)$$

где кольцевые площади поперечных сечений болта и опоры определяются выражениями

$$A = \frac{\pi D^2}{4} (1 - \gamma^2), \quad \gamma = \frac{d}{D}; \quad (5)$$

¹ В силу малой длины и большой жёсткости опоры деформации её изгиба от внецентренного действия осевой нагрузки здесь не учитываются. В противном случае её деформации и эквивалентную жёсткость необходимо определять тоже методом КЭ.

d и D – внутренний и наружный диаметры сечения.

В соответствии с принципом независимости действия сил расчёт КНД от воздействия температуры и газодинамических сил, действующих на диски, можно осуществлять по отдельности.

1.2. Методика расчёта изменения осевой силы N_0 при нагревании ротора

Обозначим величину изменения начального сжимающего осевого усилия N_0 при нагревании ΔN_t . Из условий равновесия элементов ротора получаем следующие расчётные схемы ротора и стяжного болта с опорой (рис. 1.3). В соответствии с условием совместности деформаций уравнение перемещений ротора $\Delta l_{\text{рот,t}}$ и болта с опорой $\Delta l_{\text{б-оп,t}}$ имеет вид

$$\Delta l_{\text{рот,t}} = \Delta l_{\text{б-оп,t}}, \quad (6)$$

где

$$\Delta l_{\text{рот,t}} = -\Delta N_t \cdot \sum_{i=0}^4 \frac{l_i}{G_i} + \sum_{i=0}^4 \alpha_i \cdot \Delta t_i \cdot l_i, \quad (7)$$

$$\Delta l_{\text{б-оп,t}} = \Delta N_t \cdot \sum_{i=5}^6 \frac{l_i}{G_i} + \sum_{i=5}^6 \alpha_i \cdot \Delta t_i \cdot l_i, \quad (8)$$

α_i и Δt_i – ТКЛР материалов и изменение температуры дисков и заднего вала² ротора, болта и опоры.

Решив уравнение (6) с учётом (7 и 8), получаем следующую величину ΔN_t

$$\Delta N_t = \frac{\sum_{i=0}^4 \alpha_i \cdot \Delta t_i \cdot l_i - \sum_{i=5}^6 \alpha_i \cdot \Delta t_i \cdot l_i}{\sum_{i=0}^6 \frac{l_i}{G_i}}. \quad (9)$$

² Вследствие разности температур заднего вала по наружному и внутреннему диаметрам в первом приближении следует принимать в качестве расчётного их среднее арифметическое значение.



Рис. 1.3.

Если получаем $\Delta N_t > 0$ (т. е. положительная величина), то действительные направления ΔN_t совпадают с указанными на расчётной схеме (рис. 1.3). Тогда сжимающая ротор сила N равна

$$N = N_0 + \Delta N_t. \quad (10)$$

1.3. Методика расчёта изменения осевой силы N_0 от действия газодинамических сил

Газодинамические силы P_j получим, умножив силу p_j , действующую на одну лопатку, на количество лопаток в диске n_j

$$P_j = p_j \cdot n_j. \quad (11)$$

Силы P_j приводят к изменению осевой силы стяжного болта на величину ΔN_P . В этом случае расчётная схема болта с опорой остаётся прежней (рис. 1.3) при замене силы ΔN_t на ΔN_P , а расчётная схема ротора имеет вид (рис. 1.4).

По аналогии с (6) уравнение перемещений запишем в виде

$$\Delta l_{\text{рот,Р}} = \Delta l_{6\text{-оп,Р}}, \quad (12)$$

где

$$\Delta l_{\text{рот,Р}} = -\Delta N_P \cdot \sum_{i=0}^4 \frac{l_i}{G_i} + \sum_{j=1}^3 P_j \cdot \sum_{i=j}^4 \frac{l_i}{G_i}, \quad (13)$$

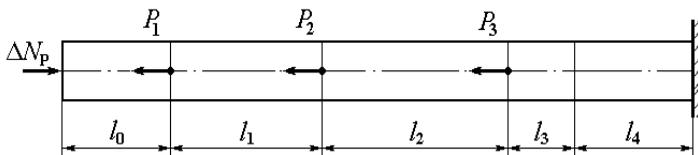


Рис. 1.4. Расчётная схема ротора

$$\Delta l_{6-оп,р} = \Delta N_p \cdot \sum_{i=5}^6 \frac{l_i}{G_i}. \quad (14)$$

Тогда величина ΔN_p будет равна

$$\Delta N_p = \frac{\sum_{j=1}^3 P_j \cdot \sum_{i=j}^4 \frac{l_i}{G_i}}{\sum_{i=0}^6 \frac{l_i}{G_i}}. \quad (15)$$

При ΔN_t и $\Delta N_p > 0$ в окончательном виде сжимающая сила N , действующая на ротор, равна

$$N = N_0 + \Delta N_t + \Delta N_p. \quad (16)$$

В полученных выражениях (9) и (15) пределы изменения индексов i и j зависят от общего количества элементов – i и количества ступеней – j , составляющих ротор КНД.

Данный метод может быть использован также для расчёта осевых усилий в вале ротора КВД и других аналогичных СНС.

2. ПРИМЕР РАСЧЁТА ОСЕВОЙ СИЛЫ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЖЁСТКОСТЕЙ

В соответствии с выражением (3) определение эквивалентных жёсткостей осуществляется в результате расчётов на основе КЭ модели элементов ротора – дисков и заднего вала ГТД Д30-КП, работающих на растяжение-сжатие с изгибом (рис. 2.1). Разработка данной модели и порядок проведения необходимых расчётов приведены в разделе 4, необходимые для этого начальные сведе-

ния по созданию конечно-элементных моделей содержатся в [3] и разделе 3.

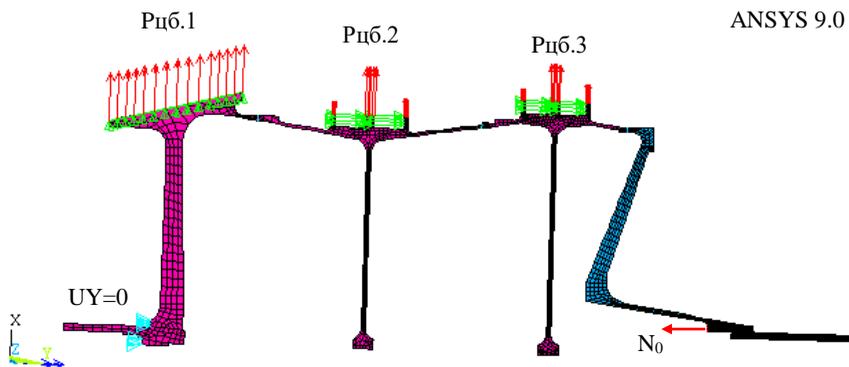


Рис. 2.1. Конечно элементная модель ротора КНД

При создании модели были использованы элементы типа Plane 42. Размеры участков ротора l_i и результаты расчёта деформаций Δl_i и эквивалентных жёсткостей G_i при действии заданной силы N приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Расчёт эквивалентных жёсткостей элементов ротора КНД

№ участка	Длина участка $l_i \cdot 10^3, \text{ м}$	Деформации участков при $N = 154,508 \text{ Кн}$ $\Delta l_i \cdot 10^3, \text{ м}$	Эквивалентная жёсткость $G_i, \text{ Нм/м}$
0	27,7	0,842	$5,083 \cdot 10^6$
1	213,7	0,007	$4,717 \cdot 10^9$
2	204,1	0,030	$1,051 \cdot 10^9$
3	79,9	0,088	$1,403 \cdot 10^8$
4	94,5	0,440	$3,318 \cdot 10^7$

Программа расчёта в системе MathCAD v.14 перераспределения сил в роторе и стяжном болте приведена в Приложении 1.

Точность расчёта зависит от точности определения эквивалентных жёсткостей, которая, в свою очередь, определяется точностью КЭ расчёта деформаций Δl_i .

Исходные данные для стяжного болта и опоры приведены в табл. 2.2, для дисков и заднего вала ротора КНД приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.2. Исходные данные для стяжного болта и опоры

Параметры	L , м	d , м	D , м	$G \cdot 10^{-6}$, Нм/м	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	Δt , К
Стяжной болт	0,6	0,036	0,0453	1,134	1,91	11,7	100/70
Опора	0,0255	0,069	0,081	277,1	1,96	11,0	100/70

Таблица 2.3. Исходные данные для дисков и заднего вала ротора КНД

№ ступени/ участка	n_j , шт	p_j , Н	P_j , Н	Длина участка $l_i \cdot 10^3$, м	G_i , Нм/м	$\alpha_i \cdot 10^6$, K^{-1}	Δt_i , К
0	–	–	–	27,7	$5,083 \cdot 10^6$	9,2	73
1	31	815,9	25293	213,7	$4,717 \cdot 10^9$	9,2	73
2	35	437,8	15323	204,1	$1,051 \cdot 10^9$	9,5	120
3	37	4	17179	79,9	$1,403 \cdot 10^8$	9,5	130
4	–	–	–	94,5	$3,318 \cdot 10^7$	11,7	144

Необходимые для расчётов физические свойства материалов: 40ХН2МА-Ш и 12Х2Н4А-Ш (для стяжного болта и опоры), ЭИ961-Ш (для заднего вала) и для ВТ3-1 (для дисков ротора) взяты из справочника по авиационным материалам [4]. Результаты расчётов приведены в табл. 2.4. Из табл. 2.4 видно, что температура стяжного болта имеет большое значение, т. к. её изменение всего на 30 К приводит не только к существенному изменению величины температурной составляющей ΔN_t , но и к смене её знака.

Таблица 2.4. Результаты расчётов перераспределения осевого усилия

Усилие	При изменении температуры стяжного болта $\Delta t = 100 \text{ K}$	При изменении температуры стяжного болта $\Delta t = 70 \text{ K}$
N_0 , КН	154,508	154,508
ΔN_t , КН	- 5,340	9,196
ΔN_p , КН	14,255	14,255
N , КН	163,423	177,959

3. МЕТОДИКА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО РАСЧЁТА В КОМПЛЕКСЕ ANSYS

Типы файлов и основные команды комплекса ANSYS приведены в Приложении 2. В общем случае создание и расчёт конечно-элементной модели проводится в несколько этапов:

1 этап. Подготовка модели (Preprocessing)

- выбор типа элементов и их опций, задание параметров элементов;
- задание свойств материала;
- создание геометрической модели;
- создание конечно-элементной модели.

2 этап. Решение (Solving)

- задание граничных условий;
- запуск на расчёт.

3 этап. Анализ результатов (Postprocessing)

- вызов главного постпроцессора и чтение результатов;
- анализ деформированного состояния модели;
- анализ напряжений, перемещений, деформаций.

3.1. Выбор типа элементов

Для создания плоских и объемных конечно-элементных моделей могут быть использованы различные типы элементов, например, плоский элемент PLANE42 или объемный элемент SOLID45 (рис. 3.1 и 3.2).

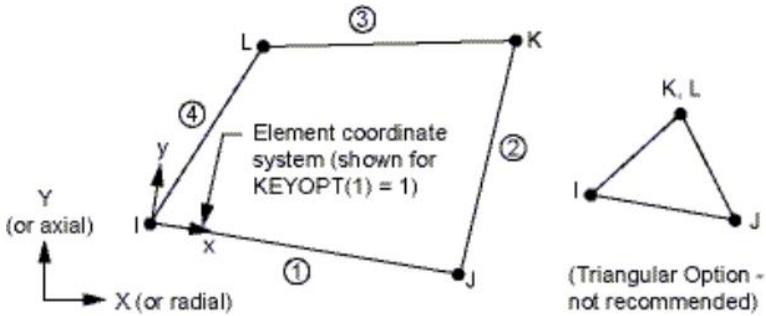


Рис. 3.1. Элемент PLANE42

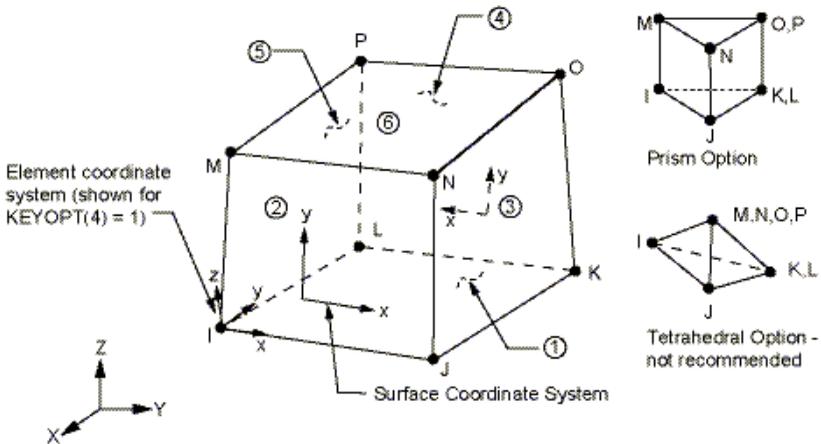


Рис. 3.2. Элемент SOLID45

Как вспомогательный элемент при создании объёмных моделей может быть использован SHELL63 (рис. 3.3).

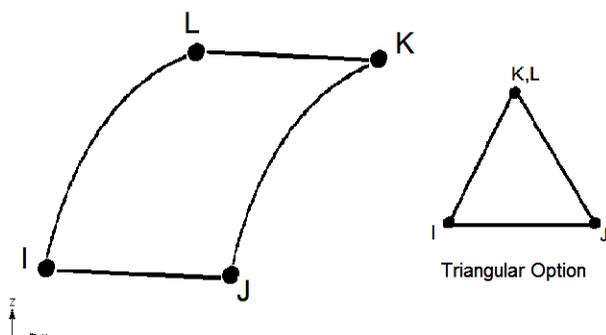


Рис. 3.1. Элемент PLANE42

3.2. Задание свойств материала

Свойства материала задаются, используя справочные данные по материалам. Для примера в таблицах Приложения 3 приведены свойства некоторых материалов.

Выбираем материал в зависимости от максимальной рабочей температуры детали. Например, для температур до 300–400 °С можно использовать титановый сплав, а жаропрочная сталь используется до температур 500–600 °С.

Для задания свойств материал воспользуемся командой:

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models

В открывшемся окне последовательно щелкнуть два раза по кнопкам Structural, Linear, Elastic, Isotropic.

Задать EX (модуль упругости) в зависимости от температуры (команда Add Temperature) и PRXY (коэффициент Пуассона).

Плотность материала задать, выбрав DENSITY.

Задать кривые растяжения (зависимость напряжения от деформации), используя следующую команду:

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Model > Structural > Nonlinear > Inelastic > Rate Independent > Isotropic Hardening Plasticity > Mises Plasticity > Multilinear

Используя команды Add Temperature и Add Point, определяем требуемое количество точек на кривых деформирования.

Изобразить полученные зависимости на экране можно, используя команду Graph на панели инструментов.

Пример кривой растяжения материала приведён на рис. 3.4.

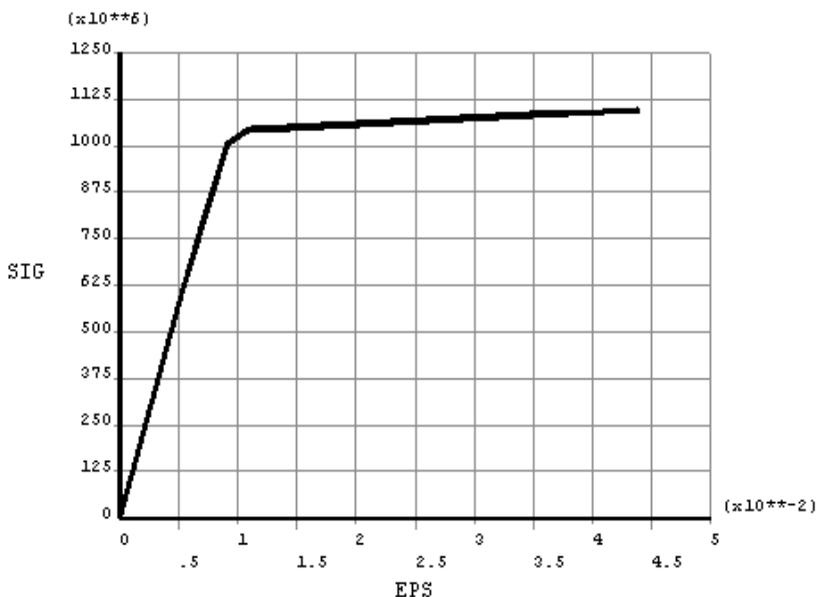


Рис. 3.4. Кривая растяжения материала

3.3. Создание геометрической модели в комплексе ANSYS

В комплексе ANSYS существуют три разных способа построения геометрической модели: импорт модели, предварительно построенной другой программой; твердотельное моделирование и

непосредственное создание модели в интерактивном режиме работы с программой. Можно выбрать любой из этих методов или использовать их комбинации для построения расчетной модели.

3.3.1. Импорт модели

Комплекс ANSYS позволяет наносить сетку конечных элементов на модель, импортированную из другой программы (CAD-программы), а также имеет возможность менять геометрию модели с целью упрощения расчета. Использование автоматических средств позволяет улучшить модель за счет устранения ненужных зазоров, перекрытий или взаимных внедрений ее частей, а также выполнить слияние объектов и создание объёмов. Это дает возможность получить значительно более простую расчётную модель путем её «подчистки» и получения приемлемого варианта. Процедуры упрощения позволяют наилучшим образом подготовить модель для нанесения сетки конечных элементов за счёт удаления отверстий, полостей и выпуклостей, исключения мелких подробностей (рис. 3.5).

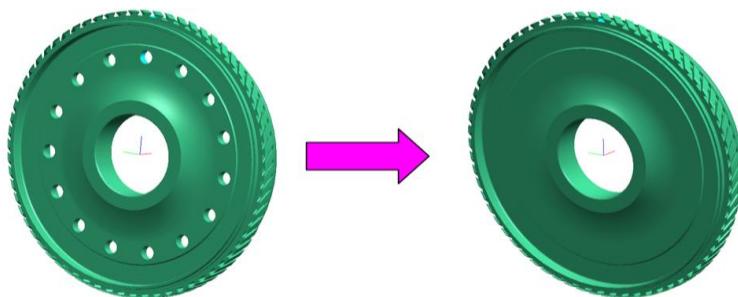


Рис. 3.5. Упрощение модели диска

При импортировании геометрии в формате IGES пользователь имеет возможность управлять значениями допусков на слияние

объектов модели, выявлять «проблемные» области и возможные ошибки.

Рассмотрим для примера перенос геометрических данных в комплекс ANSYS из системы проектирования UNIGRAPHICS (UG):

В системе UG с помощью команды Export создается файл формата Parasolid:

File > Export > Parasolid

Можно также загрузить в ANSYS геометрическую модель с использованием файла UG. Но при этом могут экспортироваться лишние элементы, использовавшиеся в UG как вспомогательные для построения модели.

Модель детали импортируется в комплекс ANSYS с помощью команды Import:

Utility Menu > File > Import

Выбрать через Import формат PARASOLID.

Задать директорию импортируемого файла.

Выбрать файл (расширение *.x_t – для PARASOLID).

После импорта геометрии необходимо проверить несколько основных размеров детали и ее положение в пространстве:

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Check Geom

Utility Menu > List > Keypoint (Lines)

При необходимости геометрическую модель масштабируем по требуемым осям в глобальной системе координат:

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Scale > Volumes (Areas, Lines)

Далее необходимо выбрать масштабируемые объекты и назначить масштабные коэффициенты по осям X, Y, Z (рис. 3.6).

Если деталь разрезалась в UG на объемы, то импортированная в ANSYS геометрическая модель будет иметь двойные точки и линии, которые являются не связанными между собой (т.е. в месте разреза будут две одинаковые поверхности, принадлежащие раз-

ным объемам). Перед построением конечно-элементной сетки необходимо это устранить и объединить точки.

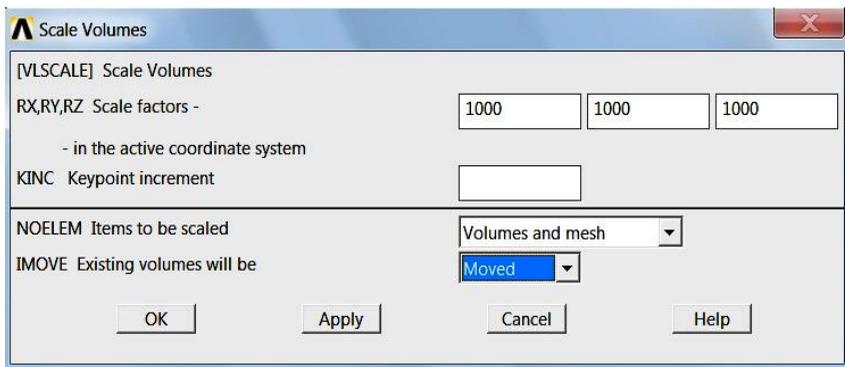


Рис. 3.6. Задание масштабных коэффициентов

Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrl's > Merge Items

Далее в окне Merge Items выбрать All или Keypoints (точки), назначить при необходимости диапазон совпадения (range of coincidence) и допуск слияния (solid model tolerance) точек модели (рис. 3.7).

После этого желательно выполнить компрессию номеров объектов – нумерация точек, линий, поверхностей и объемов будет сквозная, пропадут не использованные номера:

Main Menu > Preprocessor > Numbering Ctrl's > Compress Numbers

В окне Label выбрать all и нажать ОК (рис. 3.8).

Для удобства дальнейшей работы можно изменить визуальное отображение модели, заменив скелетное изображение на тонированное:

Utility Menu > PlotCtrl's > Style > Solid Model Facets

В единственном окне выбрать Normal Faceting и нажать ОК.

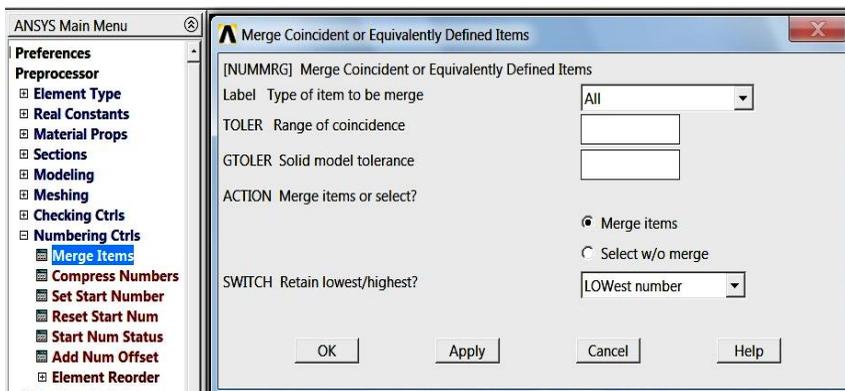


Рис. 3.7. Объединение двойных точек

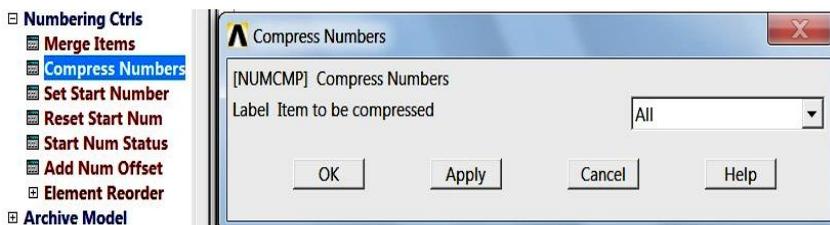


Рис. 3.8. Компрессия номеров

3.3.2. Твердотельное моделирование

В комплексе ANSYS доступны следующие два способа моделирования: нисходящий и восходящий [3]. В первом случае пользователь указывает только самый высокий порядок сложности объектов модели. Используемые обычно объекты (такие, как сферы, конусы и призмы, т. е. формы, которые называются геометрическими примитивами) могут быть созданы за одно обращение к меню. Например, пользователь определяет объёмный примитив, а программа автоматически находит связанные с ним поверхности, линии и ключевые точки. Примитивы позволяют непосредственно указывать геометрические формы.

В комплексе ANSYS можно легко и быстро определить в двумерном случае такие формы, как окружности и прямоугольники, или параллелепипеды, сферы, конусы и цилиндры – в трехмерном. После того как геометрические объекты указаны, к ним можно применять операции булевой алгебры (сложение, вычитание, пересечение, деление, склеивание и объединение геометрических объектов).

3.3.3. Создание модели в интерактивном режиме работы

В этом случае чаще всего применяется так называемое «восходящее моделирование». При восходящем моделировании пользователь строит модель, начиная с объектов самого низкого порядка. Сначала задаются ключевые точки, затем по точкам строятся связанные с ними линии, из линий и точек создаются поверхности, на последнем этапе из поверхностей сшиваются объёмы – именно в таком порядке.

Независимо от используемого способа построения модели имеется возможность применять операции булевой алгебры для объединения наборов данных и за счёт этого как бы создавать «скульптуру» модели.

Еще одним эффективным методом построения модели в комплексе ANSYS является построение некоторой поверхности с помощью так называемого метода «обтягивания каркаса». С помощью этого метода можно задать некоторый набор поперечных сечений, а затем дать программе команду построить поверхность, которая будет точно соответствовать указанным сечениям.

3.4. Создание конечно-элементной модели

Существует два вида конечно-элементных сеток: произвольная (свободная) и упорядоченная (регулярная).

3.4.1. Создание произвольной сетки (автоматически)

Комплекс ANSYS имеет в своем составе генераторы произвольной сетки, с помощью которых сетка может наноситься непосредственно на модель достаточно сложной геометрии без необходимости строить сетку для отдельных частей и затем собирать их в единую модель. Произвольная сетка строится из треугольных, четырехугольных и четырехгранных элементов.

При произвольном построении сетки реализован алгоритм разумного выбора размеров конечного элемента, позволяющий строить сетку элементов с учетом кривизны поверхности модели и наилучшего отображения ее реальной геометрии. Кроме того, можно выбрать мелкую или крупную сетку элементов, указав в качестве управляющего параметра любое число из диапазона от единицы до десяти.

3.4.2. Создание упорядоченной сетки

Построение упорядоченной сетки требует предварительного разбиения модели на отдельные составные части с простой геометрией, а затем - выбора таких атрибутов элемента и соответствующих команд управления качеством сетки, чтобы можно было построить конечно-элементную модель с упорядоченной сеткой. Создаваемая комплексом ANSYS упорядоченная сетка может состоять из шестигранных и четырехугольных элементов.

В качестве дополнительного способа построения упорядоченной сетки на некоторой поверхности используется деление противоположных граничных линий этой поверхности таким образом, чтобы можно было осуществить переход от одного размера сетки к другому. Построение упорядоченной сетки переменного размера возможно только для поверхностей, ограниченных четырьмя линиями. При большем числе ограничивающих линий можно выполнить операцию их конкатенации Main Menu > Preprocessor > Meshing > Concatenate > Lines (Areas)

Создание упорядоченной сетки конечных элементов возможно на поверхностях и объемах, которые имеют на противоположных гранях равное число линий и элементов. Использование операции конкатенации позволяет «условно» преобразовать, например, поверхность, состоящую из пяти линий в поверхность из четырех линий, в этом случае возможно создание регулярной сетки элементов на этой поверхности (рис. 3.9). Термин «условно» означает, что истинная геометрия модели при этом не перестраивается.

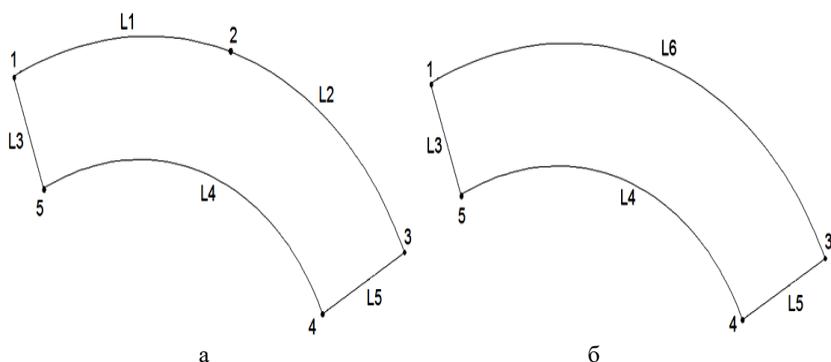


Рис. 3.9. Поверхность: а – до конкатенации; б – после конкатенации

При построении сетки возможно указание общего размера элемента, деление граничной линии, указание размеров в окрестности заданных геометрических точек, коэффициентов растяжения или сжатия вдали от границ, задание ограничения на кривизну и возможность задания «жёстких» точек (т. е. задание точного положения узла вместе с размерами сетки в такой точке).

При создании конечно-элементной модели необходимо учитывать следующее:

- упорядоченная (регулярная) сетка является более предпочтительной, чем свободная;
- в модели нежелательно иметь элементы, у которых одна сторона элемента много больше другой;

- перо лопатки рекомендуется по толщине разбивать минимум на три элемента (для корректного учета изгибных напряжений);
- на дуге в 90° (например, в радиусах перехода) должно быть минимум 6 элементов, оптимально – один элемент на дуге в 10° ;
- конечный элемент должен иметь форму параллелепипеда (гексаэдра), у которого минимум два линейных размера близки друг другу (рекомендуемое соотношение длин граней элемента 1,5...2) и отсутствуют очень острые ($<30^\circ$) и очень тупые ($>150^\circ$) углы (в идеале куб);
- объёмы со свободной сеткой (free, тетраэдрические элементы) создаются после объёмов с регулярной сеткой (sweep, mapped, гексаэдрические элементы).

На рис. 3.10 показаны виды упорядоченной (регулярной) и свободной сетки конечных элементов. Как видно из рис. 3.10 регулярная сетка отличается от свободной сетки наличием одинакового

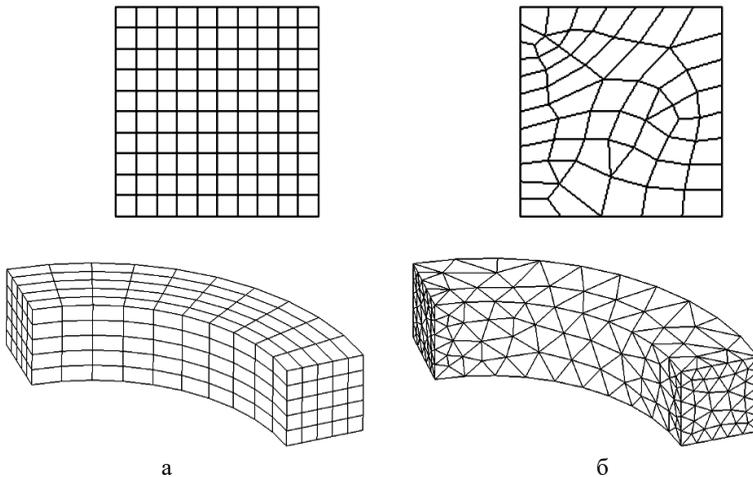


Рис. 3.10. Виды сеток конечных элементов: а – регулярная; б – свободная

числа элементов на противоположных гранях разбиваемых поверхностей. Объём на рис. 3.10, разбитый регулярно, содержит 250 элементов, а разбитый свободной сеткой – 700 элементов, количество узлов в модели со свободной сеткой также больше. Соответственно число решаемых комплексом ANSYS уравнений в несколько раз больше для модели со свободной сеткой, что увеличивает время решения задачи и объём файла с результатами расчета.

На рис. 3.11 показаны различные формы конечных элементов. В идеале форма элемента должна представлять собой четырехугольник с равными сторонами, что можно получить, используя регулярную сетку элементов. Не рекомендуется использовать в модели элементы, у которых одна сторона много больше другой, или элементы, имеющие острые или тупые углы. Такие элементы могут быть созданы автоматически при использовании свободной сетки. В таких элементах могут быть получены результаты расчета с большими погрешностями, что приведет к ошибкам при анализе напряженно-деформированного состояния конструкции.

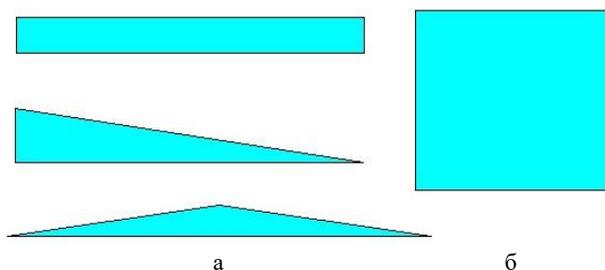


Рис. 3.11. Форма конечных элементов
а – нежелательная; б – рекомендуемая

На рис. 3.12 показаны варианты разбивки радиуса в модели. Видно, что разбивка радиуса на малое число элементов приводит к искажению геометрии модели – ломаному радиусу.

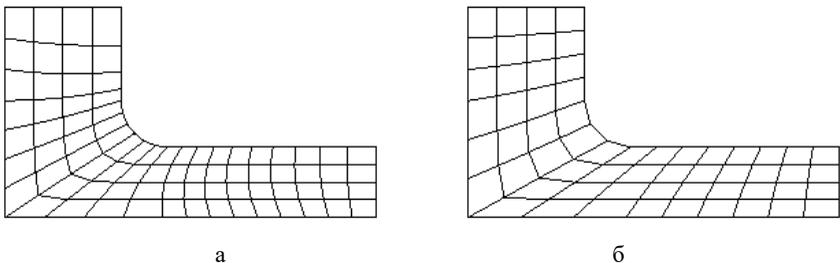


Рис. 3.12. Количество элементов на радиус:
а – 6 элементов; б – 3 элемента

Кроме того, радиус является концентратором напряжений и желательно в таких местах иметь мелкую сетку конечных элементов для уменьшения погрешности расчета.

3.4.3. Создание контактных пар

В случае необходимости между контактирующими деталями можно задать контактные пары. Контактные пары создаются по поверхностям контакта для учёта взаимодействия между деталями.

Для создания контактных пар включаем панель Contact Manager, нажимая правую от командной строки иконку. Появляется окно (рис. 3.13).

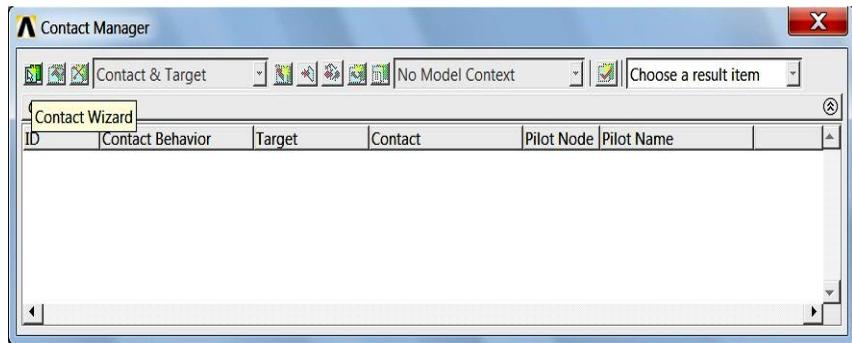


Рис. 3.13. Панель создания контактных пар

На панели нажимаем кнопку Contact Wizard, расположенную в верхнем левом углу. Задавать контактные пары необходимо по поверхностям (Areas), нужный флажок стоит по умолчанию (рис. 3.14).

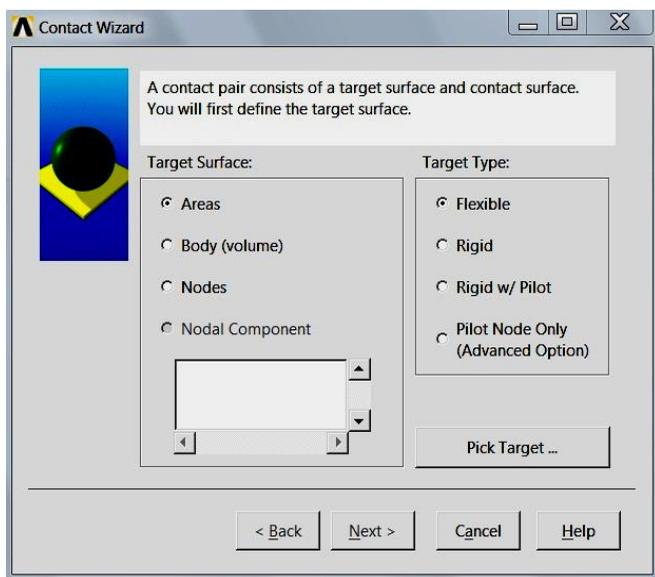


Рис. 3.14. Панель выбора объектов

Нажимаем кнопку Pick Target и выбираем одну из контактирующих поверхностей на детали, ждем ОК. В окне Contact Wizard нажимаем Next, после этого окно изменяется, в нем нажимаем кнопку Pick Contact, и выбираем ответную контактную поверхность другой детали. Нажимаем Next, в изменившемся окне оставляем все по умолчанию (можно задать в опциях вид контакта, можно сделать это потом).

Нажимаем опцию Optional settings (рис. 3.15), в открывшемся окне можно задать контактным парам разные свойства, «скольжение», контакт без проникновения, «сварка» и т.д. По умолчанию

стоит Standart. При необходимости имитации неразъемного соединения можно использовать опцию «сварка», заменив Standart на Bonded (always) (рис. 3.16). Далее нажать ОК.

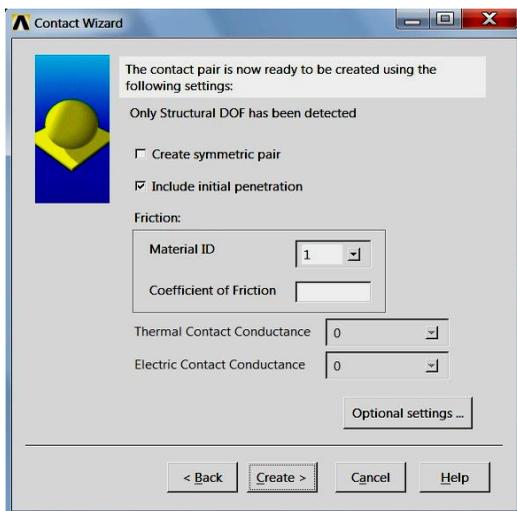


Рис. 3.15. Панель выбора опций контакта

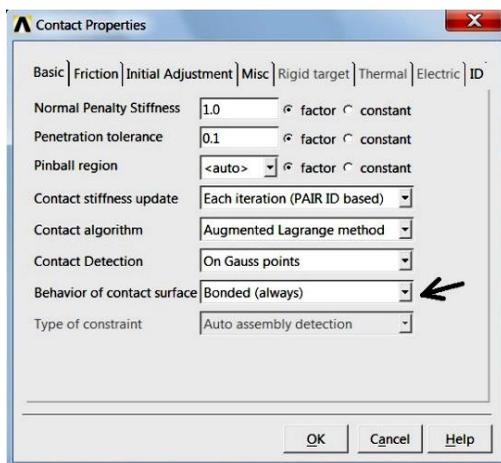


Рис. 3.16. Панель задания опций

Нажимаем Create, на экране изображаются контактные элементы. В открывшемся окне нажимаем Finish.

3.5. Задание граничных условий

Перед расчётом модели необходимо задать граничные условия (рис. 3.17).

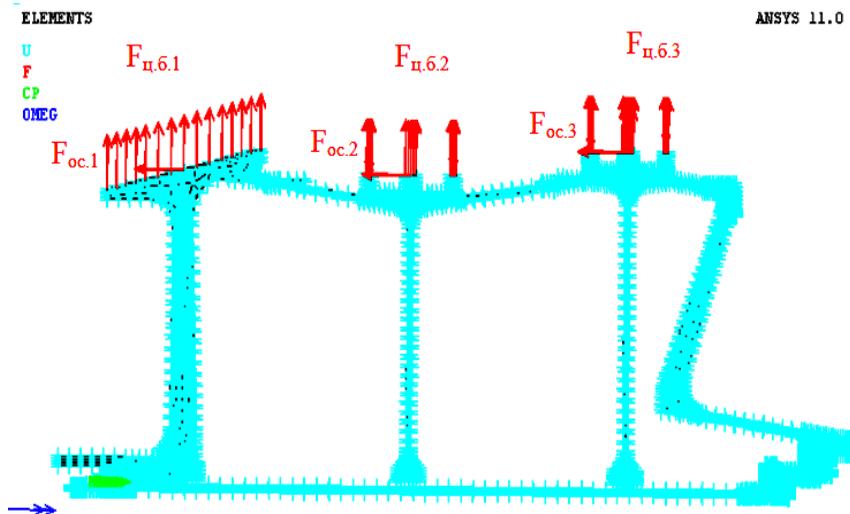


Рис. 3.17. Пример задания граничных условий на модели

Задать величину перемещений можно командой:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply >
>Structural > Displacement > On Lines (On Nodes)

Угловая скорость задаётся с использованием команды:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply >
>Structural > Inertia > Angular Velocity > Global

Контурная нагрузка от лопаток задаётся с помощью команды:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply >
>Structural > Force/Moment > On Nodes

Задать температуру на деталях можно командой:

Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Settings >
>Uniform Temp

Пример задания граничных условий на расчётной модели показан на рис. 3.17.

3.6. Выбор типа расчёта и запуск на расчёт

Выбрать тип анализа можно командой:

Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis

Для запуска расчета воспользуемся командой:

Main Menu > Solution > Solve > Current LS

Нажать ОК для запуска программы на счёт, предварительно проанализировав сообщение в белом информационном окне.

После проведения расчёта комплекс ANSYS выдаст на экран сообщение: Solution is done! (расчёт окончен).

3.7. Просмотр результатов расчёта и их анализ

Результатом выполненного расчёта является напряженно-деформированное состояние (НДС) модели. Для просмотра результатов статического анализа служит главный постпроцессор. Распределение перемещений, напряжений, деформаций, температур выводится на экран с помощью команды:

Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot >
> Nodal Solu

По полученным результатам можно определить места концентрации напряжений и деформаций, определить их величину, рассчитать коэффициенты запаса прочности, сравнить их с регламентируемыми значениями и т.д.

4. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КОМПРЕССОРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ Д-30К И РАСЧЁТ АБСОЛЮТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ РОТОРА

В данном разделе рассматривается определение абсолютных деформаций элементов ротора компрессора НД двигателей семейства Д-30К, представленного на рис. 4.1. Моделирование конечными элементами осуществляется в системе ANSYS v.11.0.

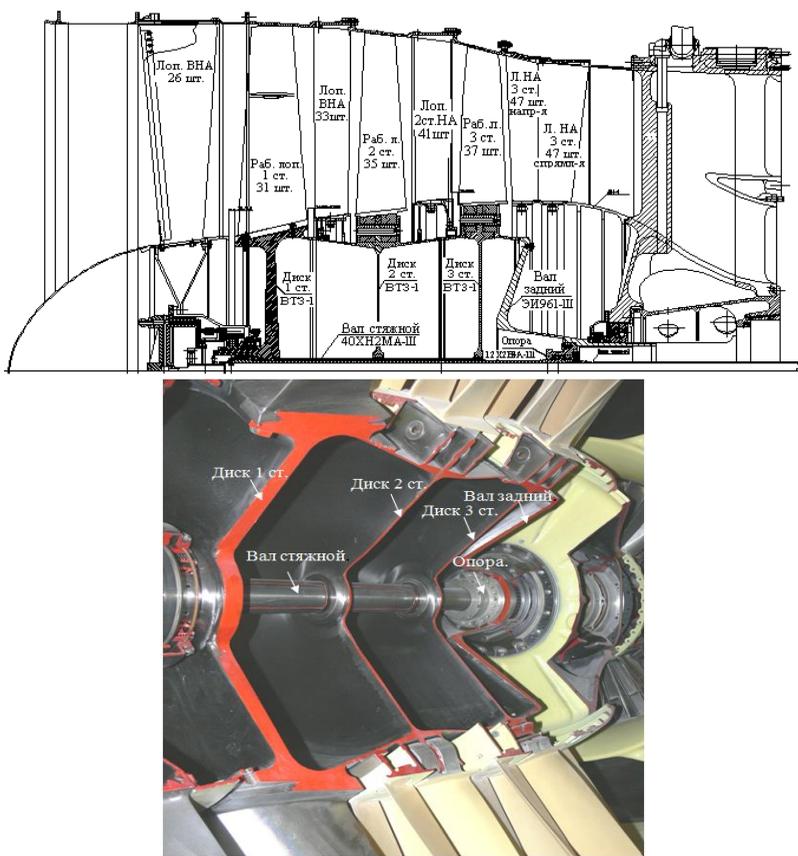


Рис. 4.1. Схема и фотография вырезанного сектора ротора КНД

Процесс решения задачи состоит из следующих этапов:

1. Имя задачи и директории, установка фильтров меню.
2. Выбор типа элементов.
3. Свойства материала.
4. Создание твердотельной модели ротора и конечно-элементного разбиения.
5. Определение граничных условий, проведение расчетов и просмотр результатов.

4.1. Имя задачи и директории, установка фильтров меню

После данной операции все файлы, созданные ANSYS в процессе работы, будут иметь указанное имя и помещены в указанную директорию.

4.1.1. Имя задачи:

U_M: File → Change jobname

Ввести любое имя задачи в FILNAM.

С помощью «мыши» установить флажок в поле New log and error files (создаются новые файлы с журналами регистрации команд и ошибок). Нажать ОК.

4.1.2. Имя директории:

U_M: File → Change Directory

Выделить рабочую директорию. Нажать ОК.

4.1.3. Установка фильтров меню.

Данная операция позволяет исключить из всех меню ANSYS пункты, не относящиеся к типу анализа решаемой задачи.

4.1.4. M_M: preferences

Установить флажок в поле с меткой Structural. ОК, (выбрали прочностной расчёт).

4.2. Выбор типа элементов

Тип элемента, помимо прочего, определяет количество степеней свободы (перемещения и/или углы вращения), форму элемента (одномерный, четырехугольный, тетраэдральный и др.) и размерность. Для построения модели ротора необходимо использование двух типов элементов: Solid 4 и Plane 42. Элемент Solid 45 является основным при построении модели ротора. Элемент Plane 42 используется для построения плоского сечения ротора в плоскости OXY.

Объемная конечно-элементная модель получается вытягиванием полученной модели сечения вдоль направляющей линии.

4.2.1. M_M: preprocessor → Element type → Add / edit / delete

Нажать Add (добавить новый тип элемента).

Выбрать пункт Structural Solid в библиотеке элементов.

Выбрать Brick 8 node 45 в правом окне. ОК.

Нажать Add (добавить новый тип элемент).

Выбрать Structural Solid в библиотеке элементов (левое окно).

Выбрать Quad 4 node 42 (правое окно). ОК.

Close (закрыть окно Element Types).

4.3. Свойства материала

Задаются четыре набора свойств материалов по количеству используемых в деталях ротора материалов.

4.3.1. M_M: Preprocessor → Material Props → Material Models

В правой части открывшегося окна последовательно щелкнуть два раза по пунктам Structural, Linear, Elastic, Isotropic. Нажать Add Temperature (добавление значений температур). Ввести 20 и 300 в ячейки строки Temperatures (температуры) (рис. 4.2).

Ввести 20000 и 17500 в ячейки строки EX (модуль упругости).

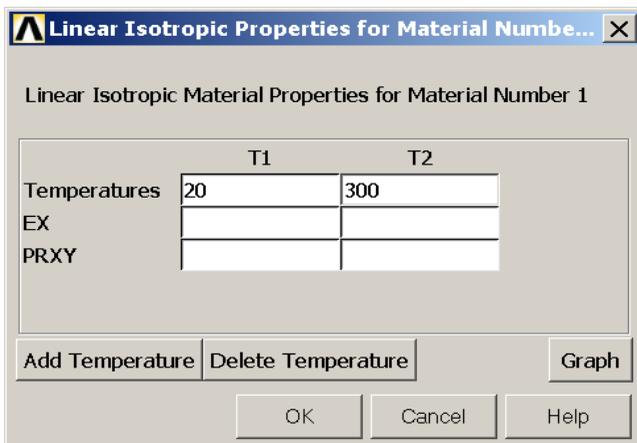


Рис. 4.2.

Ввести 0.3, 0.3 в ячейки строки PRXY (коэфф. Пуассона). ОК.
Щелкнуть два раза по пункту Density.

Ввести 7.8E-6 в DENS (плотность материала). ОК.

Последовательно щелкнуть два раза по пунктам Thermal Expansion, Secant Coefficient, Isotropic.

Нажать Add Temperature (добавление значений температур).

Ввести 20 и 300 в ячейки строки Temperatures (температуры).

Ввести 1.13E-5 и 1.16E-5 в ячейки строки ALPX (коэффициент термического линейного расширения).

Последовательно щелкнуть два раза по пунктам Thermal, Conductivity, Isotropic.

Нажать Add Temperature (добавление значений температур).

Ввести 20 и 300 в ячейки строки Temperatures (температуры).

Ввести 0.0209 и 0.0256 в ячейки строки KXX (коэффициент теплопроводности).

Последовательно щелкнуть два раза по пунктам Nonlinear, Inelastic, Rate Independent, Kinematic Hardening Plasticity, Mises Plasticity, Multilinear (Fixed table). В открывшемся окне ввести

данные (значения относительных деформаций и соответствующие им значения напряжений при заданных температурах) для построения диаграмм растяжения (рис. 4.3).

В п. 4.3.1. заданы свойства материала ВТЗ-1 дисков 1, 2, 3 степени КНД.

По аналогичному алгоритму задаются свойства материалов остальных деталей, входящих в математическую модель.

Закрыть окно ввода свойств материалов.

Все введенные данные находятся в оперативной памяти компьютера, для их сохранения в базовом файле с расширением .db на инструментальной панели следует выбрать:

T_B: Save_db

4.4. Создание модели ротора

Вначале в плоскости OXY изображается верхняя часть сечения ротора. Затем полученные поверхности разбиваются на элементы Plane 42. Объемная конечно-элементная модель получается вытягиванием плоской модели сечения вдоль направляющей линии.

4.4.1. Создание ключевых точек:

M_M: Preprocessor → Modeling → Create → Keypoints →
→ In Active CS

Вводим значения координат X и Y для точек, определяющих профиль сечения деталей.

Чтобы точки с указанными координатами были созданы, следует нажать Apply (тогда точки будут созданы, но окно Create Keypoints in Active Coordinate System не закроется, либо нажать ОК – в этом случае создание точек будет завершено).

4.4.2. Соединение ключевых точек линиями:

M_M: Preprocessor → Modeling → Create → Lines → Lines →
→ In Active Coord

Последовательно выбираем с помощью «мыши» пары точек, которые необходимо соединить прямой линией. ОК.

Построены линии, определяемые ключевыми точками.

4.4.3. Построение линий, ориентация которых определена в чертеже углом наклона, а также линий скругления рассмотрим на примере цилиндрической оболочки в ободной части диска 2-й ступени (рис. 4.4).

4.4.4. Для построения линий, заданных углом наклона, используется вспомогательная локальная система координат, повернутая относительно имеющейся глобальной системы.

Создаём локальную систему координат, повернутую относительно глобальной на угол $8^{\circ}5'$:

U_M: WorkPlane → Local Coordinate Systems →
→ Create Local CS → At Specified Loc

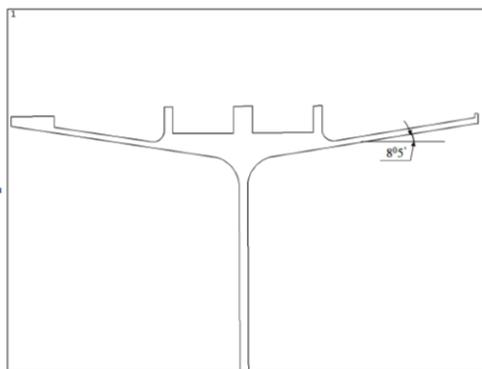


Рис. 4.4.

Указываем «мышью» любое место на рабочем экране, ОК.

В поле THXY вводим значение угла поворота плоскости XY относительно оси Z, переведя минуты в доли градуса (рис. 4.5).

Положительное значение вводимого угла соответствует повороту плоскости XY относительно оси Z против часовой стрелки.

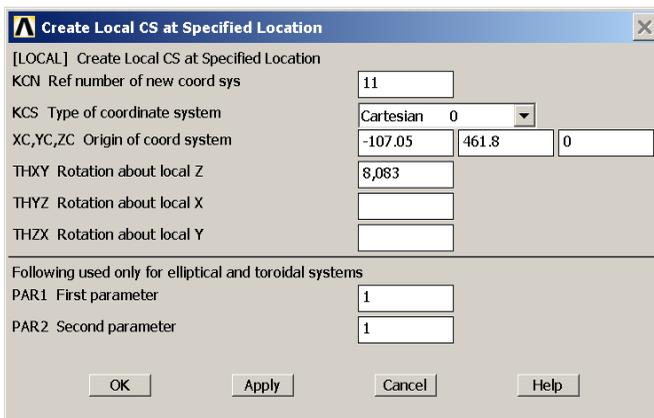


Рис. 4.5.

После создания локальной системы координат она автоматически активируется, т.е. последующие построения ведутся с учетом ориентации её осей. Номер активной системы отображается в нижней строке окна программы (рис. 4.6).

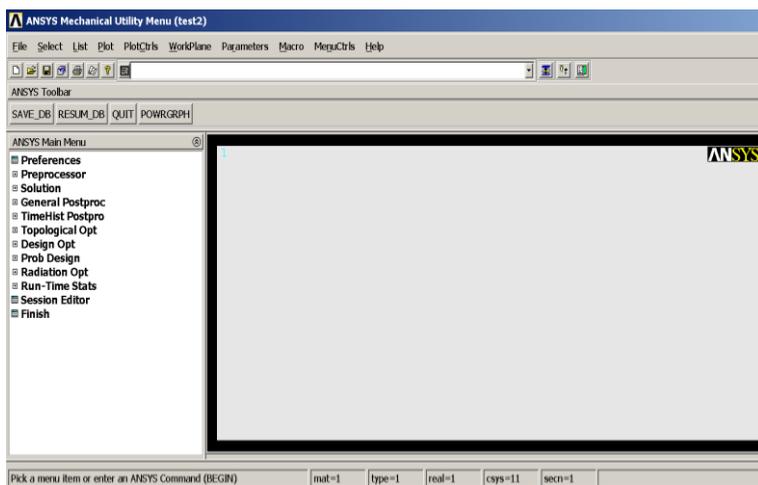


Рис. 4.6

Копируем ключевую точку, являющуюся началом строящейся линии, на произвольное расстояние вдоль одной из осей (параллельной будущей линии) локальной системы координат:

М_М: Preprocessor → Modeling → Copy → Keypoints

«Мышь» выбираем ключевую точку, ОК, вводим расстояние, на которое копируется ключевая точка, ОК.

Соединяем линией исходную и полученную её копированием точки:

М_М: Preprocessor → Modeling → Create → Lines → Lines → In Active Coord

Если построенная линия не пересекает смежную с ней линию, то её необходимо продлить (рис. 4.7):

М_М: Preprocessor → Modeling → Operate → Extend Lines

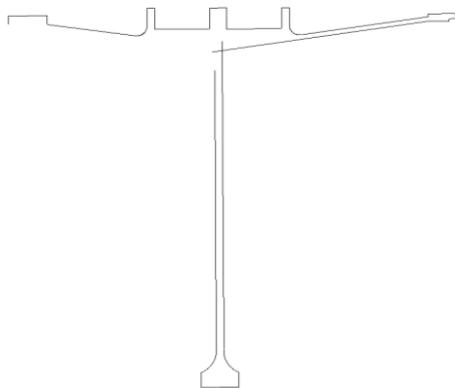


Рис. 4.7.

Выбираем линию, которая будет удлиняться, ОК, указываем точку на конце выбранной линии, ОК. В поле DIST вводится приращение длины линии, ОК.

Для обрезки концов линий, выходящих за виртуальную точку их пересечения, используем команду:

M_M: Preprocessor → Modeling → Operate →
→ Boolean → Divide → Line by Line

Указываем сначала одну из пересекаемых линий, ОК, затем вторую из пересекаемых линий, ОК. В результате выполнения данной команды линия, выбранная первой, будет поделена точкой пересечения на две новые, а линия указанная второй – удалена.

Лишнюю линию, полученную в результате деления исходной, необходимо удалить командой:

M_M: Preprocessor → Modeling → Delete → Line and Below
Указываем удаляемую линию, ОК.

Для восстановления одной из пересекаемых линий, которая была автоматически удалена, используем команду построения линии по двум ключевым точкам.

4.4.5. Построение скругления между линиями:

M_M: Preprocessor → Modeling → Create → Lines → Line Fillet
Последовательно указываем две линии, ОК, в поле RAD вводим значение радиуса.

Возвращаемся в глобальную систему координат:

U_M: WorkPlane → Change Active CS to → Global Cartesian

После выполнения команды в нижней строке окна программы будет отображаться – csys = 0.

4.4.6. Создание поверхностей по ограничивающим их линиям:

M_M: Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Arbitrary → By Lines

Последовательно выбираем линии, описывающие замкнутый контур сечения деталей, ОК.

Для получения конечных элементов правильной (четырёхугольной) формы, что увеличивает точность решения задачи, необходимо построенные поверхности разделить на несколько более простых близких к четырёхугольной форме. Чтобы разделить

исходную поверхность на части, следует использовать линии, которые разрежут её. Для построения линий используются имеющиеся ключевые точки, а также вспомогательные точки, создаваемые с помощью команды:

М_М: Preprocessor → Modeling → Create → Keypoints→On line

Выбираем линию, ОК, указываем приблизительное место на линии, где требуется создать точку, ОК.

Построение вспомогательных линий для разрезки исходных поверхностей:

М_М: Preprocessor → Modeling → Create → Lines→Lines →
→ In Active Coord

Деление поверхностей на части с помощью вспомогательных линий.

М_М: Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans →
→ Divide → Area by Line

Выбираем исходную поверхность, ОК, выбираем линии, пересекающие поверхность, ОК.

Получены поверхности простой формы. Результат выполнения команд по п. 4.4.1. – 4.4.4. приведен на рис. 4.8.

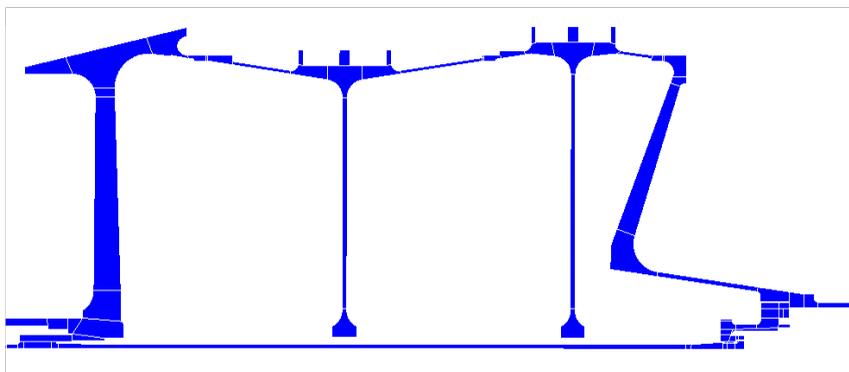


Рис. 4.8.

4.4.7. Задание типа конечных элементов:

M_M: Preprocessor → Meshing → Mesh Attributes → All Areas
Выбрать для опции Type значение PLANE42, ОК.

Заданы параметры для нанесения конечно-элементной сетки на поверхности.

4.4.8. Разбиение на конечные элементы.

Отображение панели инструментов для нанесения конечно-элементной сетки:

M_M: Preprocessor → Meshing → Mesh Tool

На панели Mesh Tool установить флажок в поле с меткой Smart Size, установить уровень 5 на опции Fine – Coarse, указать Areas для Mesh, Quad для Shape, Free для Mesher.

Нажать Mesh.

На появившейся панели нажать Pick All.

На созданные поверхности нанесена конечно-элементная сетка из элементов Plane42.

4.4.9. Создание объемной модели ротора.

Для построения направляющей линии, вдоль которой будет вытягиваться плоское сечение ротора, создаём 2 точки, лежащие на оси его вращения:

M_M: Preprocessor → Modeling → Create → Keypoints → In Active CS

Ввести:

а) 0 для X,

б) 0 для Y,

Apply.

Ввести:

а) 100 для X,

б) 0 для Y, ОК.

Строим направляющую линию поворотом ключевой точки относительно оси вращения:

M_M: Preprocessor → Modeling → Operate → Extrude →

→ Keypoints → About Axis

Указываем любую точку с контура сечения ротора, ОК, затем указываем две точки, лежащие на оси вращения ротора, ОК. В поле ARC ввести значение угла поворота ключевой точки относительно оси вращения. ОК. Из условия циклической симметрии модели угол поворота назначается меньшим 360° . Необходимость построения объемной модели обусловлена наличием в модели множества контактных взаимодействий, которые в плоской модели не всегда корректно работают. Чем больше величина рассматриваемого угла, тем больше площадь контактного взаимодействия фрагментов деталей и, очевидно, легче будет сводиться контактная задача. Выбор величины угла поворота в данном случае является компромиссным решением между получением приемлемой степени дискретизации конечно-элементной сетки и возможностями ПК.

Для назначения плотности конечно-элементной сетки будущей объемной модели необходимо для направляющей линии задать желаемое количество элементов:

M_M: Preprocessor → Meshing → SizeCtrls → ManualSize →
→ Line → Picked Lines

Выбираем направляющую линию, ОК, в строке NDIV указываем количество элементов.

Перед операцией вытягивания сечений вдоль линии необходимо задать атрибуты объемных фигур:

M: Preprocessor → Modeling → Operate → Extrude →
→ Elem Ext Opts

На панели выбрать: SOLID45 для опции TYPE, для Change default MAT выбрать номер материала, соответствующий получаемой протягиванием детали. ОК.

Вытягиваем поверхности, образующие плоское сечение ротора, вдоль линии:

M_M: Preprocessor → Modeling → Operate → Extrude →
→ Area → Along Lines

Выбираем все поверхности, нажав на панели Pick All, затем «мышью» выбираем направляющую линию. ОК. Создана объемная конечно-элементная модель ротора (рис. 4.9).

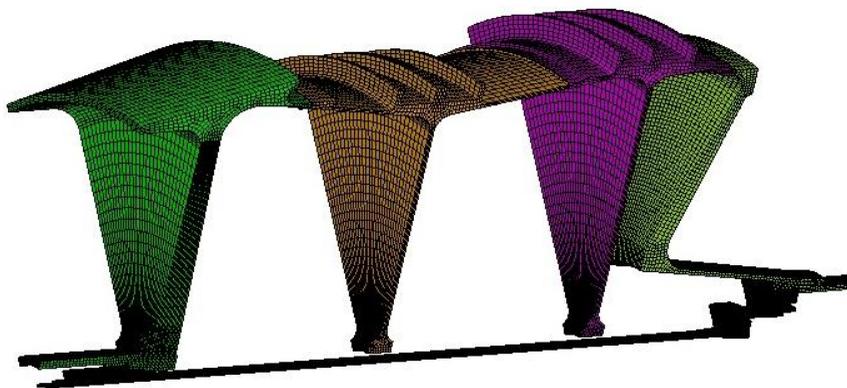


Рис. 4.9

4.5. Расчёт напряженно-деформированного состояния ротора

Выполняется за несколько шагов нагружения, имитирующих последовательность его нагружения в реальных условиях работы.

1 – 2 шага – воспроизведение монтажных напряжений и деформаций в результате стяжки ротора.

При сборке стяжка ротора осуществляется на специальном прессе с упором в поверхности буртов на цапфах диска 1ступени КНД 40-01-577 и заднего вала 40-01-114. Рабочая затяжка ротора замеряется по вытяжке стяжного вала на величину $1 \pm 0,03$ мм. Для чего в мат. модели на первом шаге к опорному буртику цапфы диска 1ступени КНД 40-01-577 прикладывается сосредоточенная осевая нагрузка, имитирующая давление пресса. Стяжной вал при этом находится в свободном состоянии.

4.5.1. Перед наложением ограничений и нагрузок необходимо перевести все узлы модели в цилиндрическую систему координат, предварительно активировав её:

U_M: WorkPlane → Change Active CS to → Specified Coord Sys

В поле KCN вводим «6» (номер цилиндрической системы координат с осью вращения OX).

M_M: Preprocessor → Modeling → Move/Modify →

→ Rotate Node CS → To Active CS

Жмём Pick All. Все узлы переведены в цилиндрическую систему координат

Селектируем поверхность опорного бурта на цапфе диска 1-й ступени: U_M: Select → Entities

В первом сверху выпадающем списке выбираем пункт Areas. ОК. «Мышь» выбираем требуемую поверхность (рис. 4.10). ОК.

Селектируем узлы, связанные с выбранной поверхностью:

U_M: Select → Entities

В первом сверху выпадающем списке выбираем пункт Nodes. В ниже расположенном выпадающем списке выбираем пункт Attached to (выбор компонентов, связанных с другими компонентами). Установить флажок в поле с меткой Areas,all. ОК.

Прикладываем сосредоточенную нагрузку к выбранным узлам:

Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Structural → Force/Moment → On Nodes Нажимаем Pick All

В первом сверху выпадающем списке выбираем направление действия приложенной нагрузки FZ. В поле VALUE вводим значение нагрузки в кг. Значение осевой нагрузки на первом шаге нагружения подбирается путем последовательных итераций из условия обеспечения максимально допустимого удлинения стержневого вала на 1,03 мм по результатам расчета второго шага нагружения (см. п. 4.5.2). Значение нагрузки, приходящееся на один узел, определяется из следующей зависимости:

$$F_{\text{узла}} = (F_{\text{ос}} \cdot \alpha) / (360 \cdot N_{\text{узлов}}),$$

где $F_{\text{ос}}$ - осевая сила, стягивающая ротор; α – угловая величина рассматриваемого сектора; $N_{\text{узлов}}$ – количество узлов на поверхности приложения нагрузки.

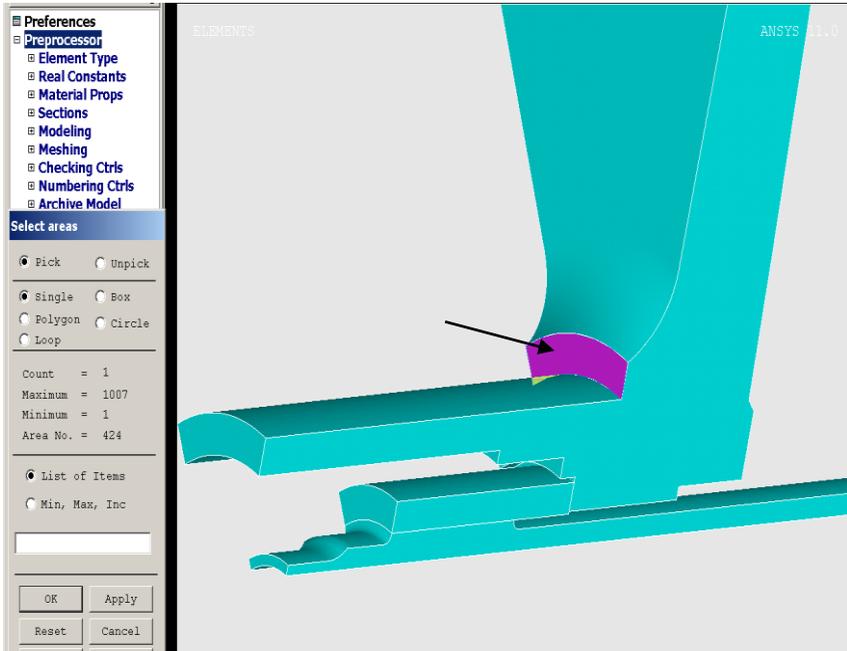


Рис. 4.10.

Для снятия статической неопределенности в данной расчётной схеме исключаем окружные перемещения узлов, расположенных на меридиональных поверхностях, ограничивающих рассматриваемый сектор, а также осевые перемещения узлов на задней торцевой поверхности опоры стяжного вала 40-01-4267.

Для наложения ограничения на перемещения узлов селективируем необходимые узлы по ранее применённому алгоритму.

Затем используем команду:

Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Structural →

→ Displacement

Нажимаем Pick All. В первом сверху выпадающем списке выбираем направление действия ограничения. ОК.

Задаем ограничение температуры:

M_M → Solution → Define Loads → Settings → Uniform Temp

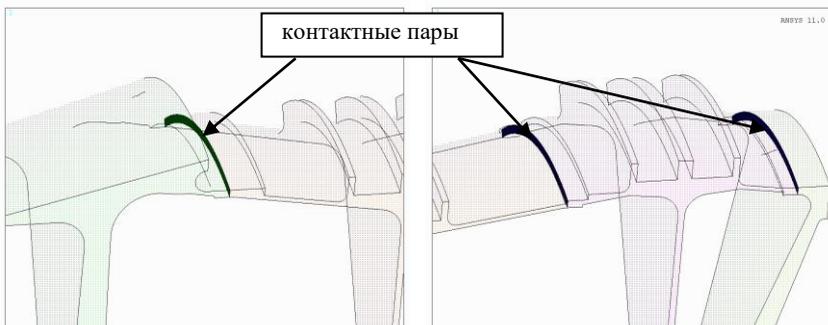
В открывшемся окне вводим значение «20» (температура всех элементов модели $T=20^{\circ}\text{C}$). Контактное взаимодействие между деталями моделируется контактными элементами типа «поверхность-поверхность». Схема контактных взаимодействий между сопряженными деталями приведена на рис. 4.11.

Пример задания контактных пар:

M_M: Preprocessor → Modeling → Create → Contact Pair

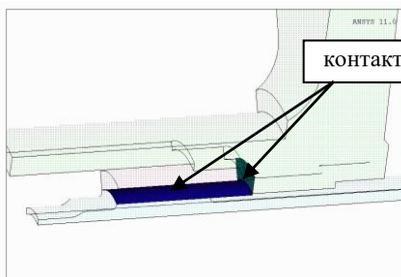
В открывшемся окне Contact Manager жмем кнопку Contact Wizard, далее жмем кнопку Pick Target. «Мышь» указываем контактную поверхность (поверхности) на одной из взаимодействующих деталей, Apply, жмем кнопку Next, жмем кнопку Pick Contact, указываем контактную поверхность (поверхности) на ответной детали. Далее последовательно жмем кнопки Next, Create, Finish. Контактная пара создана.

При создании контактных пар между диском 1-й ст. и гайкой, а также опорой стяжного вала и задним валом, необходимо переопределение значений параметров, выставленных «по умолчанию». Для чего после назначения контактных поверхностей (Pick Target и Pick Contact) жмем кнопку Next, далее Optional settings. В нижнем выпадающем списке выбираем Bonded (always) (имитация сварного соединения).

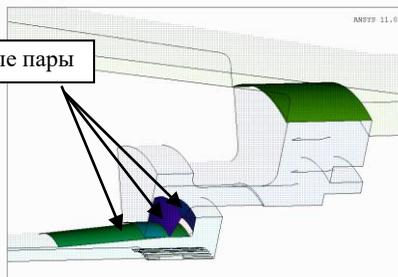


а – Контактная пара:
диск 1-й ступени – диск 2-й ступени

б – Контактные пары:
диск 2-й ступени – диск 3-й ст.
и диск 3-й ст. – задний вал



в – Контактные пары:
гайка – диск 1-й ступени и
гайка – стяжной вал



г – Контактные пары:
опора стяжного вала – задний вал;
опора стяжного вала – сферическая шайба;
сферическая шайба – опорный торец вала;
опора, шайба – цилиндрический участок

Рис. 4.11.

Результаты задания ограничений и нагрузок 1-го шага представлены на рис. 4.12.

Сохраним граничные условия 1-го шага в отдельном файле:

M_M → Preprocessor → Loads → Loads Step Opts →
→ Write LS File

В открывшемся окне вводим «1» (нагрузки первого шага нагружения).

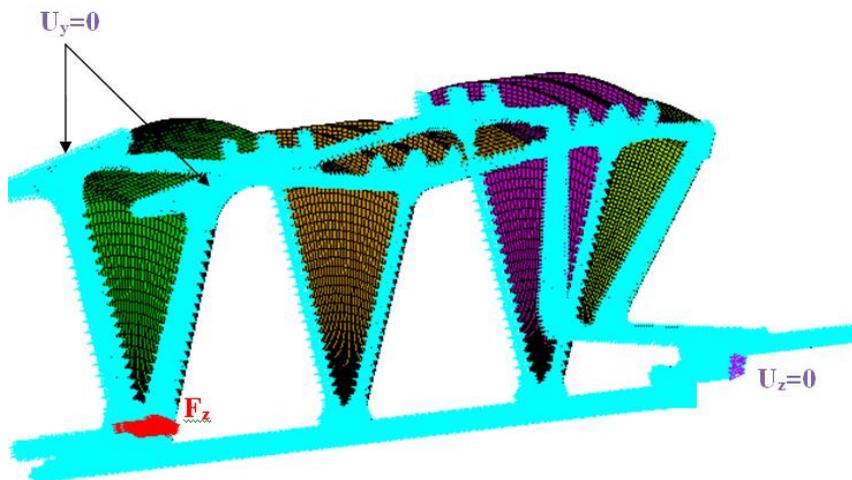


Рис. 4.12.

Запуск на расчет:

M_M → Solution → Solve → Current LS (текущий шаг нагрузки).

Нажать ОК для запуска программы на счет, предварительно проанализировав сообщение в белом информационном окне.

На всплывающих окнах с предупреждениями нажать Yes.

Нажать Close в окне с надписью Solution is done! (расчёт окончен!).

4.5.2. На втором шаге нагружения на узлы резьбового участка гайки 40-01-088 и противолежачие им, по итогам первого шага нагружения, узлы резьбового участка стяжного вала накладывається условие совместности осевых перемещений посредством CP-связей для имитации резьбового соединения.

Для идентификации узлов, подлежащих наложению CP-связей, необходимо просмотреть результаты расчета первого шага нагружения:

M_M: General Postproc → Plot Results → Nodal Solu

В открывшемся окне отметить DOF Solution- Z-Component of displacement, нажать ОК.

Чтобы результаты расчета отображались с наложенной конечно-элементной сеткой выполнить команду:

U_M: PlotCtrls→Style→Edge Options

Во втором ниспадающем списке выбрать Edge Only/All. В нижнем списке выбрать Replot. Нажать ОК.

Включить нумерацию узлов:

U_M: Plot Ctrls→Numbering

Установить флажок в поле с меткой Node и нажать ОК.

Зафиксировать ряды противоположащих узлов на гайке и стяжном валу.

Для удобства задания CP-связей селектируем соответствующие ряды узлов через поверхности, с которыми они связаны.

Наложение CP-связей:

M_M→ Preprocessor → Coupling/ Ceqn→Couple DOFs → Define Coupled DOFs

Указываем два соединяемых CP-связью узла, жмём Apply. В поле NSET вводим next, в поле Lab выбираем UZ, Apply. Повторяем для других связываемых узлов.

Снимаем осевую нагрузку:

M_M → Preprocessor → Loads → Define Loads → Delete → Structural → Force/Moment → On Nodes, нажимаем Pick All, ОК.

Заданы граничные условия второго шага нагружения (рис. 4.13).

Сохраним граничные условия второго шага нагружения в отдельном файле:

M_M → Preprocessor → Loads → Loads Step Opts →
→ Write LS File

В открывшемся окне вводим «2».

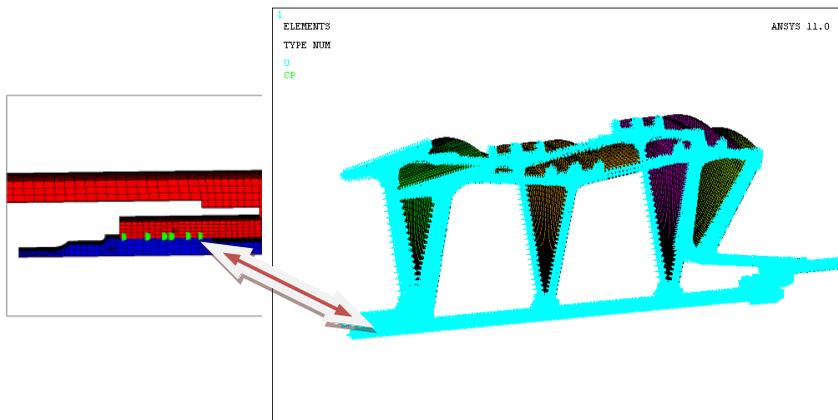


Рис. 4.13.

Перед запуском пошагового расчета (1-го и 2-го шагов) необходимо выполнить процедуру удаления текущих граничных условий (во избежание смешивания нагрузок 1-го и 2-го шагов).

Удаляем ограничения и нагрузки:

M_M → Preprocessor → Loads → Define Loads → Delete → All Load Data → All Load & Opts

Нажать ОК.

Удаляем CP-связи:

Preprocessor → Coupling/ Ceqn → Del Coupled Sets. В поле NSET1 набрать All, нажать ОК.

Запуск на расчет:

M_M → Solution → Solve → From LS Files. В поле LSMIN ввести «1», в поле LSMAX ввести «2». ОК.

Просмотр результатов расчета:

M_M: General Postproc → Plot Results → Nodal Solu

В открывшемся окне отметить DOF Solution- Z-Component of displacement, нажать ОК.

Оценка вытяжки стяжного вала:

M_M: General Postproc → Query Results → Subgrid Solu

В выпадающих списках открывшегося окна выбрать DOF solution и UZ, нажать ОК. В открывшемся окне установить флажок в поле с меткой generate 3D Anno (вывод аннотации), указать курсором два узла на противоположных торцах стяжного вала и нажать ОК. Результат выполнения команды представлен на рис. 4.14.

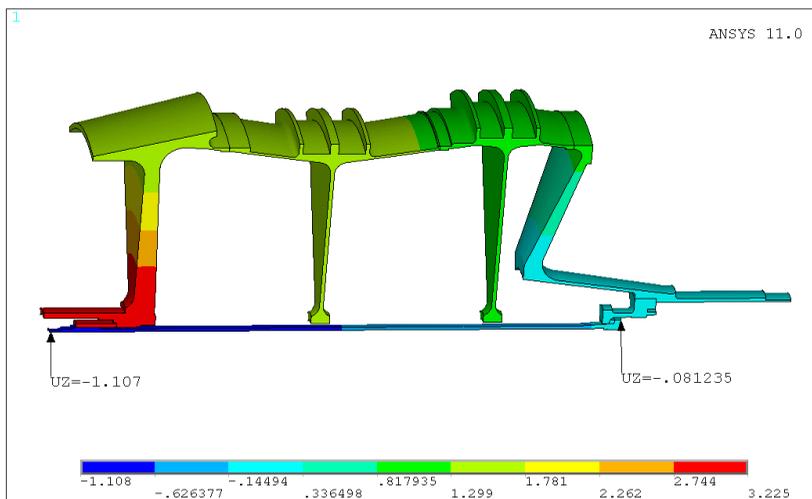


Рис. 4.14.

Разность в отображаемых осевых перемещениях противоположных торцов вала является искомой вытяжкой вала. Для удаления аннотации используем команды:

U_M: PlotCtrls→Annotation→ Delete Annotation

U_M: Plot→Replot

Изменяя величину осевой нагрузки на первом шаге нагружения, повторяем двухшаговый расчёт, пока не получим вытяжку стяжного вала: $1 \pm 0,03$ мм. После удовлетворения указанному условию переходим к заданию нагрузок третьего шага нагружения, соответствующих наиболее нагруженному режиму работы двигателя – взлётному.

4.5.3. Назначаем температуру деталей, соответствующую взлетному режиму. Рассмотрим наиболее простой случай назначения температуры- без учета радиальных и осевых градиентов. Селектируем узлы, принадлежащие какой-либо одной детали.

Далее используем команду:

M_M→Preprocessor→Loads→Define

Loads→Apply→Structural→Temperature→Uniform Temp

В открывшемся окне вводим значение температуры единое для всей детали. Повторяем процедуру назначения температуры для остальных деталей.

Далее к дискам необходимо приложить контурную нагрузку от рабочих лопаток и осевую нагрузку от перепада давления на ступенях. Для чего используем процедуры селектирования узлов и приложения сосредоточенных нагрузок. Значение силы, приходящейся на один узел, определяется таким же образом, как в случае задания осевой нагрузки на первом шаге нагружения. Сосредоточенная нагрузка должна равномерно распределяться по поверхности ободной части дисков, что обеспечивается на этапе построения твердотельной модели.

Далее задаем частоту вращения ротора:

M_M → Preprocessor → Loads → DefineLoads → Apply →
→ Structural → Inertia → Global

В верхней строке открывшегося окна вводим значение частоты вращения в рад/сек, определенное по следующей зависимости:

$\omega = (\pi \cdot n) / (30 \cdot 100)$, где n- частота вращения в об/мин.

Результаты задания граничных условий шага 3 представлены на рис. 4.15.

Сохраним граничные условия 3-го шага нагружения :

M_M → Preprocessor → Loads → Loads Step Opts →
→ Write LS File

В открывшемся окне вводим «3».

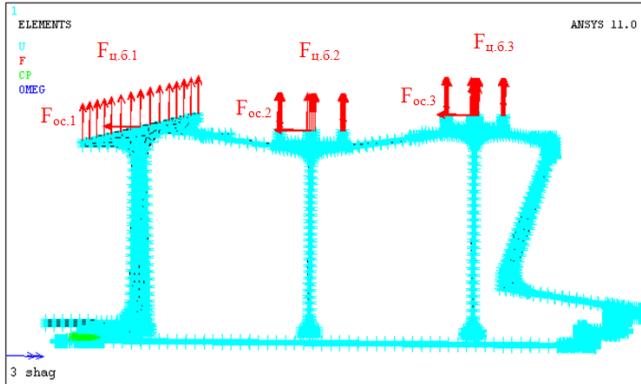


Рис. 4.15.

Перед запуском на расчет снова удаляем все граничные условия (включая CP-связи).

Запуск на расчет: M_M → Solution → Solve → From LS Files

В поле LSMIN ввести «1», в поле LSMAX ввести «3».OK.

Результаты расчёта суммарных (монтажных + эксплуатационных) абсолютных деформаций деталей ротора КНД представлены на рис. 4.16.

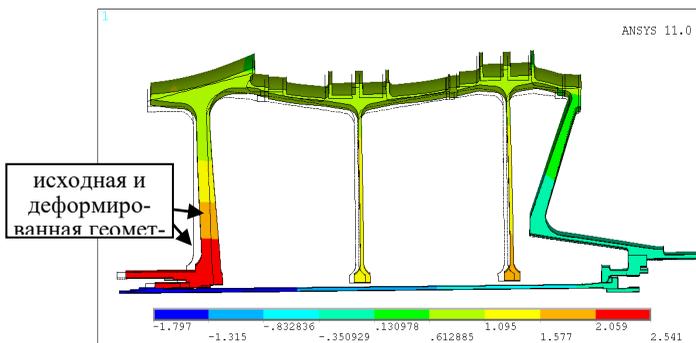


Рис. 4.16.

Для снятия значений абсолютных деформаций с узлов КЭ модели пользуемся ранее приведённой процедурой:

M_M: General Postproc → Query Results → Subgrid Solu.

5. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

РАСЧЁТ АБСОЛЮТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОМПЛЕКСЕ ANSYS

Цель работы: определить абсолютные деформации элементов конструкции ГТД.

В заданиях представлены диски ротора низкого давления газотурбинного двигателя, стянутые между собой стяжным болтом, а также диски ротора высокого давления, посаженные на шлицевой вал и стянутые в пакет с помощью гаек.

По указанию преподавателя выбирается вариант геометрической модели, построенной в системе проектирования AutoCad. Варианты геометрических моделей элементов газотурбинного двигателя Д30 показаны на рис. 5.1.

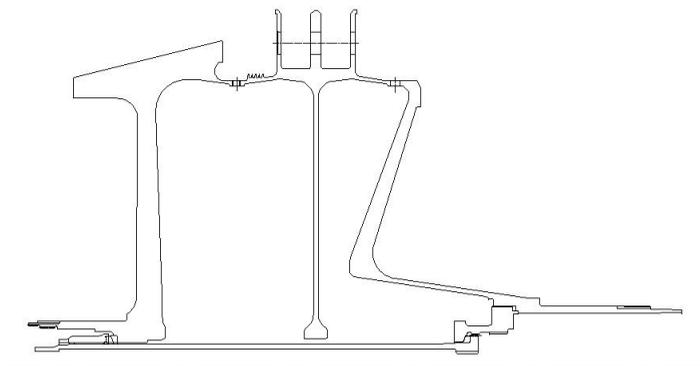
Требуется создать конечно-элементную модель на основе заданной геометрической модели, задать граничные условия и нагрузки, провести расчёт, определить абсолютные деформации и эквивалентные жёсткости элементов конструкции. Раскрыть статическую неопределимость СНС.

Варианты заданий представлены в табл. 5.1. Обозначения: P – стягивающая нагрузка, кН; UX – перемещения вдоль оси двигателя, мм; n – частота вращения ротора, об/мин.

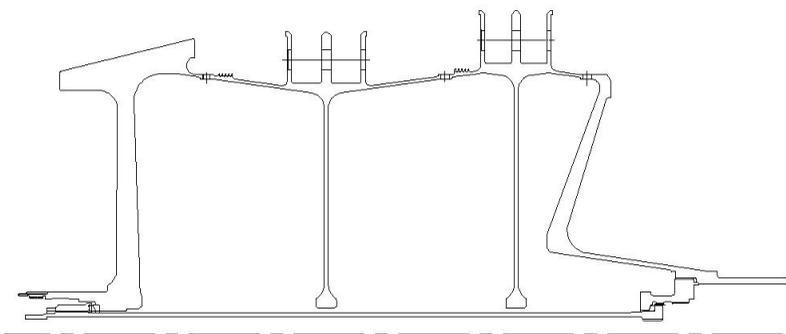
Выбор свойств материалов для своего варианта осуществляется по указанию преподавателя с использованием таблиц приложения или справочника по материалам [4].

Таблица 5.1. Варианты заданий для самостоятельной работы

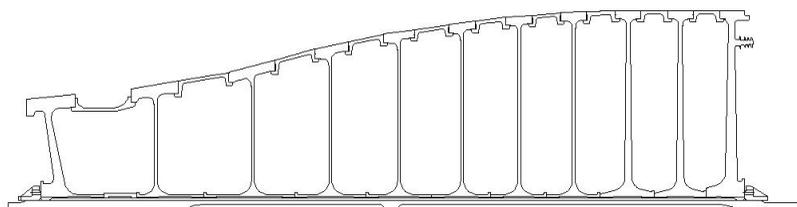
Параметр	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
UX	1	1,5	1,2	2	2,1	2,3	2,5	1,8	1,6	1,7
n	5000	1200	4500	7500	6000	6500	4200	10000	11500	1050
P	20	40	20	40	60	20	40	60	20	40
$t, ^\circ C$	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500



Вариант 1

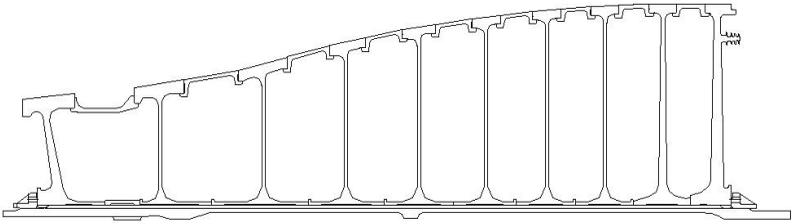


Вариант 2

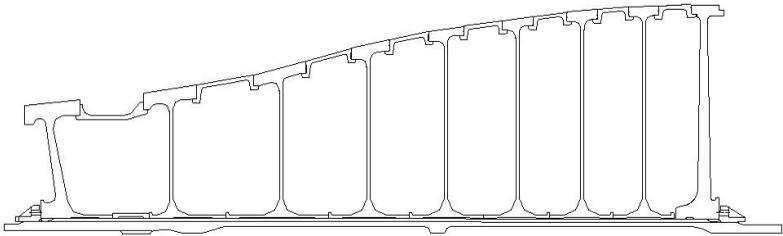


Вариант 3

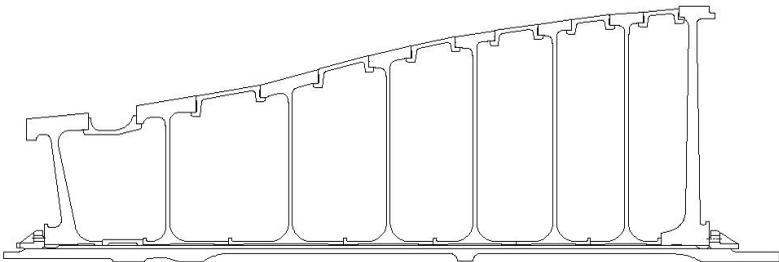
Рис. 5.1. Варианты заданий (см. также с. 59, 60 и 61)



Вариант 4

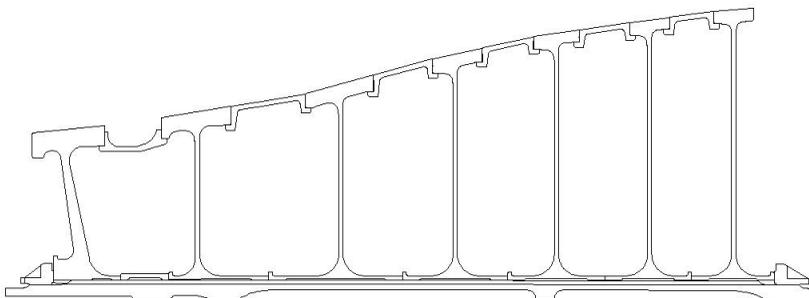


Вариант 5

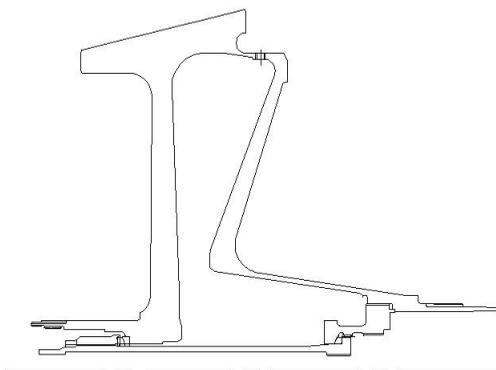


Вариант 6

Рис. 5.1. Продолжение

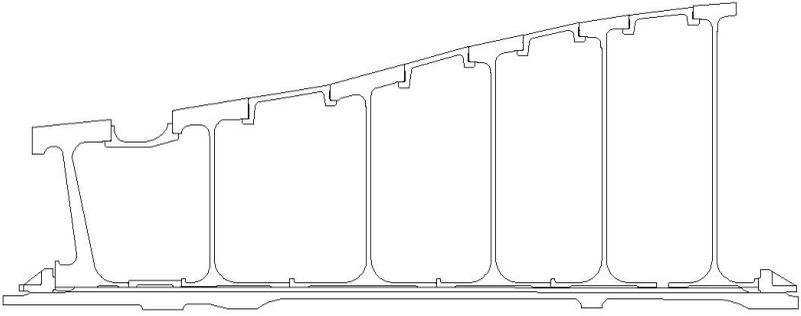


Вариант 7

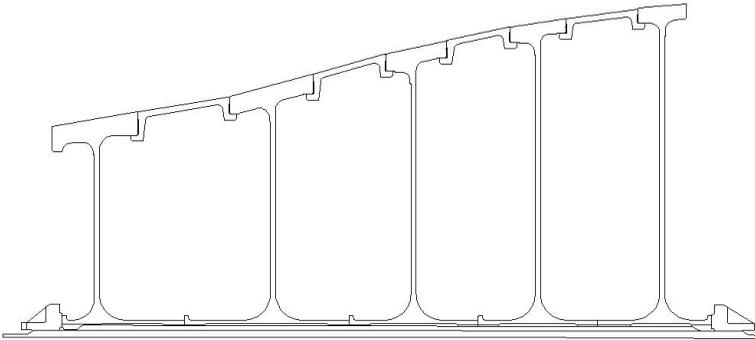


Вариант 8

Рис. 5.1. Продолжение



Вариант 9



Вариант 10

Рис. 5.1. Окончание

Программа расчёта Стяжного вала компрессора ГТД в системе Mathcad v.14.00 Исходные данные

Начальное усилие, Н

$$\underline{N}_0 := 154508$$

Длина элементов в схеме ротора КНД, м

$$l_0 := 0.0277 \quad l_1 := 0.2137 \quad l_2 := 0.2041 \quad l_3 := 0.0799 \quad l_4 := 0.0945 \quad l_5 := 0.0255 \quad l_6 := 0.6$$

Удлинения элементов в схеме ротора КНД, м

$$\Delta l_0 := 0.000842 \quad \Delta l_1 := 0.000007 \quad \Delta l_2 := 0.000003 \quad \Delta l_3 := 0.000088 \quad \Delta l_4 := 0.00044$$

Температурные коэффициенты линейного расширения материала элементов, K^{-1}

$$\alpha_0 := 9.2 \cdot 10^{-6} \quad \alpha_1 := 9.2 \cdot 10^{-6} \quad \alpha_2 := 9.5 \cdot 10^{-6} \quad \alpha_3 := 9.5 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_4 := 11.7 \cdot 10^{-6} \quad \alpha_5 := 11.0 \cdot 10^{-6} \quad \alpha_6 := 11.7 \cdot 10^{-6}$$

Температура элементов, $^{\circ}C$

$$\Delta t_0 := 73 \quad \Delta t_1 := 73 \quad \Delta t_2 := 120 \quad \Delta t_3 := 130 \quad \Delta t_4 := 144 \quad \Delta t_5 := 100 \quad \Delta t_6 := 100$$

Газодинамические силы, Н

$$P_1 := 25293 \quad P_2 := 15323 \quad P_3 := 17179$$

Размеры: наружный и внутренний диаметры стяжного болта и опоры, м

$$D_5 := 0.081 \quad d_5 := 0.069 \quad D_6 := 0.0453 \quad d_6 := 0.036$$

Модуль упругости материала стяжного болта и опоры, Па

$$E_5 := 1.96 \cdot 10^{11} \quad E_6 := 1.91 \cdot 10^{11}$$

Нагрузка для расчёта деформаций Δl_i и определения эквивалентных жёсткостей, Н

$$NG := 154508$$

Расчёт эквивалентной жёсткости на растяжение-сжатие с 0 по 4-го элементов, Н

$$i := 0, 1 \dots 4 \quad \underline{G}_i := NG \cdot \frac{l_i}{\Delta l_i} \quad G_i =$$

$5.083 \cdot 10^6$
$4.717 \cdot 10^9$
$1.051 \cdot 10^9$
$1.403 \cdot 10^8$
$3.318 \cdot 10^7$

Расчёт площади поперечного сечения 5 и 6-го элементов, м²

$$i := 5..6$$

$$F_{i*} := \left[\frac{\pi}{4} \cdot \left[(D_i)^2 - (d_i)^2 \right] \right]$$

$$F_i =$$

0.0014137

0.0005938

Расчёт эквивалентной жёсткости на растяжение-сжатие 5 и 6-го элементов, Н

$$G_i := E_i \cdot F_i$$

$$G_i =$$

2.771·10 ⁸

1.134·10 ⁸

Расчёт изменения осевой силы при нагревании, Н

$$\Delta N_t := \frac{\sum_{i=0}^4 (\alpha_i \cdot \Delta t_i \cdot l_i) - \sum_{i=5}^6 (\alpha_i \cdot \Delta t_i \cdot l_i)}{\sum_{i=0}^6 \frac{l_i}{G_i}} = -5339.6$$

Расчёт изменения осевой силы от газодинамических сил, Н

$$\Delta N_p := \frac{\sum_{j=1}^3 \left(P_j \cdot \sum_{i=j}^4 \frac{l_i}{G_i} \right)}{\sum_{i=0}^6 \frac{l_i}{G_i}} = 14255.2$$

Расчёт результирующей осевой силы, действующей в роторе и стяжном болте, Н

$$N := N_0 + \Delta N_t + \Delta N_p = 163423.7$$

ТИПЫ ФАЙЛОВ И ОСНОВНЫЕ КОМАНДЫ КОМПЛЕКСА ANSYS

Типы основных файлов, создаваемых и используемых комплексом ANSYS:

*.db – файл базы данных программы, содержит всю информацию о геометрической и конечно-элементной моделях, нагрузки. характеристики материалов, типы выбранных элементов и другие данные. В него можно записать и результаты расчета, но при этом размер файла увеличивается.

*.dbb – предыдущая сохраненная версия файла базы данных.

*.log – файл протокола, хранящий историю работы в виде ANSYS-команд, т. е. полная запись программы (текстовый файл) на всех этапах решения задачи (препроцессор, решение, постпроцессор);

*.emat – файл матрицы элементов;

*.err - файл ошибок, содержит все ошибки и предупреждения, выданные программой в процессе решения;

*.rst – файл, содержащий результаты прочностного анализа;

*.rth – файл, содержащий результаты теплового анализа;

*.USER_MPL – файл, в котором хранятся заданные пользователем свойства материала.

Основные команды комплекса ANSYS

Меню утилит: Utility Menu = U_M

Основное меню: Main Menu = M_M

Сохранение базы данных: U_M > File > Save as

Восстановление базы данных: U_M > File > Resume from

Определение заголовка: Utility Menu > File > Change Title

Определение координатной системы. По умолчанию, используется декартова система координат. Вы можете установить другую координатную систему, задав расположение и угол наклона:

Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems >
> Create Local CS > At Specified Loc

Доступны следующие типы координатных систем: декартова, цилиндрическая (круговая или эллиптическая), сферическая (или сфероидальная) и тороидальная.

Выбор типа элементов: M_M > Preprocessor > Element type >
> Add

Задание реальных констант: M_M > Preprocessor >
> Real constants > Add

Задание свойств материала: M_M > Preprocessor >
> Material Props > Material Models

Создание геометрической модели в интерактивном режиме работы:

Создание прямоугольника в любом месте рабочей плоскости по соответствующим координатам его углов: Main Menu >
> Preprocessor > Create > Rectangle > By Dimensions

Создание прямоугольника по координатам угловой точки и размерам прямоугольника (ширина, высота): Main Menu >
> Preprocessor > Create > Rectangle > By 2 Corners

Создание прямоугольника по координатам центра и размерам прямоугольника (ширина, высота): Main Menu > Preprocessor >
> Create > Rectangle > By Centr & Cornr

Создание круга (или кругового сегмента) заданного радиуса с центром в начале координат: Main Menu > Preprocessor > Create >
> Circle > By Dimensions

Создание круга (или кругового сегмента) заданного радиуса (или ширины) с центром в заданной точке рабочей плоскости:

Main Menu > Preprocessor > Create > Circle > Annulus

Main Menu > Preprocessor > Create > Circle > Partial Annulus

Main Menu > Preprocessor > Create > Circle > Solid Circle

Создание круга (или кругового сегмента) по координатам конца диаметра:

Main Menu > Preprocessor > Create > Circle > By End Points

Одним из способов построения модели является первоначальное задание координат точек, линий, поверхностей, объемов. Это - так называемое моделирование «снизу-вверх».

Точки (keypoints).

Ключевые точки, определяемые внутри текущей системы координат, являются наипростейшим элементом моделирования «снизу-вверх». По этим точкам в дальнейшем можно построить необходимые линии, поверхности или объемы.

Создание точки по ее координатам:

Main Menu > Preprocessor > Create > Keypoints > In Active CS

Main Menu > Preprocessor > Create > Keypoints >
> On Working Plane

Создание точки на существующей линии:

Main Menu > Preprocessor > Create > Keypoints > On Line

Main Menu > Preprocessor > Create > Key points >
> On Line w/Ratio

Показать на экране точки можно так:

Utility Menu > Plot > Keypoints

Utility Menu > Plot > Specified Entities > Keypoints

Выбрать ключевые точки можно следующим образом:

Utility Menu > Select > Entities

Для удаления точек (не связанных с сеткой конечных элементов), можно воспользоваться командой:

Main Menu > Preprocessor > Delete > Keypoints

Линии (lines).

Линии используются, в основном, для обозначения границ моделей. Так же, как и ключевые точки, они определяются в текущей системе координат. На практике это означает, что линия, созданная по двум точкам, например, в цилиндрической системе координат, будет криволинейной.

Создание линии по двум ключевым точкам:

Main Menu > Preprocessor > Create > Lines > In Active Coord

Создание дуги окружности по трем ключевым точкам (или по двум ключевым и радиусу):

Main Menu > Preprocessor > Create > Arcs > Through 3 KPs

Создание окружности:

Main Menu > Preprocessor > Create > Arcs > By Cent & Radius

Main Menu > Preprocessor > Create > Arcs > Full Circle

Создание прямой линии под заданным углом к другой прямой:

Main Menu > Preprocessor > Create > Lines > At Angle to Line

Main Menu > Preprocessor > Create > Lines > Normal to Line

Деление линии на несколько коротких отрезков:

Main Menu > Preprocessor > Operate > Divide > Line into 2 Ln's

Main Menu > Preprocessor > Operate > Divide > Line into N Ln's

Main Menu > Preprocessor > Operate > Divide > Lines w/Options

Объединение двух линий:

Main Menu > Preprocessor > Operate > Add > Lines

Показ линий на экране монитора:

Utility Menu > Plot > Lines

Utility Menu > Plot > Specified Entities > Lines

Выбрать линии: Utility Menu > Select > Entries

Удаление линий:

Main Menu > Preprocessor > Delete > Line and Below

Main Menu > Preprocessor > Delete > Lines Only

Поверхности (Areas).

Плоские поверхности используются для создания двумерных моделей (например, пластин или осесимметричных тел).

Создание поверхности по точкам:

Main Menu > Preprocessor > Create > Areas >
> Arbitrary > Through KPs

Создание поверхности линиями периметра

Main Menu > Preprocessor > Create > Areas > Arbitrary >
> By Lines

Создание поверхности вращением линии вокруг оси:

Main Menu > Preprocessor > Operate > Extrude /Sweep >
> About Axis

Создание скругления пересечением двух поверхностей:

Main Menu > Preprocessor > Create > Areas > Area Fillet

Создание поверхности копированием существующих поверхностей:

Main Menu > Preprocessor > Copy > Areas

Main Menu > Preprocessor > Move / Modify > Areas

Создание новой поверхности путем симметричного отображения существующей поверхности:

Main Menu > Preprocessor > Reflect > Areas

Отображение на экране созданных поверхностей:

Utility Menu > Plot > Areas

Utility Menu > Plot > Specified Entities > Areas

Удаление поверхностей, не разбитых сеткой конечных элементов:

Main Menu > Preprocessor > Delete > Area and Below

Main Menu > Preprocessor > Delete > Areas Only.

Объемы (Volumes).

Объемы используются для создания трехмерных моделей.

Создание объемов по точкам:

Main Menu > Preprocessor > Create > Volumes > Arbitrary >
> Through KPs

Создание объемов по поверхностям:

Main Menu > Preprocessor > Create > Volumes > Arbitrary >
> By Areas

Отображение на экране созданных объемов:

Utility Menu > Plot > Volumes

Utility Menu > Plot > Specified Entities > Volumes

Удаление объемов, не разбитых сеткой конечных элементов:

Main Menu > Preprocessor > Delete > Volume and Below

Main Menu > Preprocessor > Delete > Volumes Only.

Создание сетки конечных элементов на линии:

M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines

Создание регулярной сетки конечных элементов на поверхности:
сти:

M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped >
> 3 or 4 sided

M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped >
> By Corners

Создание свободной сетки конечных элементов на поверхности:
сти:

M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Free

Создание регулярной сетки конечных элементов на объеме:

M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volumes > Mapped >
> 4 to 6 sided

Создание свободной сетки конечных элементов на объеме:

M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volumes > Free

Удаление сетки конечных элементов:

M_M > Preprocessor > Meshing > Clear > Lines (Areas, Volumes)
umes)

Задание ограничений перемещений:

M_M > Solution > Define Loads > Apply > Structural >
> Displacement > On Lines (Areas и т.д.)

Задание давления:

M_M > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure

Задание температуры:

M_M > Solution > Define Loads > Apply > Structural >
> Temperature

Задание сил:

M_M > Solution > Define Loads > Apply > Structural >
> Force/Moment

Задание угловой скорости:

M_M > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Inertia >
> Angular Velocity

Удаление граничных условий:

M_M > Solution > Define Loads > Delete > Structural >
> Displacement (Temperature, Force/Moment и т.д.)

Выбор типа анализа:

M_M > Solution > Analysis Type > New Analysis

Запуск расчета:

M_M > Solution > Solve > Current LS

Анализ результатов расчета:

M_M > General Postproc

Активация результатов расчета:

M_M > General Postproc > Read Results

Просмотр результатов расчета:

Деформированного состояния:

M_M > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape

Распределения по цветовым контурам:

M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot >
> Nodal Solu (Element Solu)

Вывод результатов расчета в виде списков:

M_M > General Postproc > List Results > Nodal Solution (Element Solution и т.д.)

Анимация результатов расчета:

U_M > Plot Ctrl > Animate > Mode Shape

Выход из программы: ANSYS Toolbar > Quit

При выполнении процедуры выхода можно сохранить данные в различном объеме: геометрия, граничные условия (save Geom + Loads); геометрия, граничные условия, параметры расчета (save Geom + Loads+Solu); геометрия, граничные условия, параметры расчета, результаты расчета (save Everything); ничего (No Save!).

СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ
(из справочника по материалам [4])

Конструкционная сталь

Таблица 3.1. Данные для построения кривых растяжения

T1 = 20°C		T2 = 300°C		T3 = 600°C		T4 = 800°C	
STRAIN	STRESS	STRAIN	STRESS	STRAIN	STRESS	STRAIN	STRESS
0,00148	278,3	0,00122	198,3	0,00127	178,2	0,00109	99,5
0,00348	280,0	0,00322	200,0	0,00327	180,0	0,00309	100,0
0,41	620,0	0,31	460,0	0,25	400,0	0,35	180,0

Здесь STRAIN – деформация, STRESS – напряжение, МПа.

Таблица 3.2. Свойства конструкционной стали

Характеристики	20°C	300°C	600°C	800°C
Модуль упругости E _x , МПа	188000	162540	140310	91280
Коэффициент Пуассона, PRXY	0,3	0,3	0,3	0,3
Плотность, DENS, кг/м ³	8053	8053	8053	8053
Предел прочности σ _в , МПа	620	460	400	180
Относительное удлинение δ, %	15	17	18	20

Жаропрочный никелевый сплав

Таблица 3.3. Данные для построения кривых растяжения

T1 = 20°C		T2 = 600°C	
STRAIN	STRESS	STRAIN	STRESS
0,003	600,0	0,003	495,0
0,005	730,0	0,005	652,5
0,007	795,0	0,007	725,0
0,009	834,0	0,009	756,0
0,04	950,0	0,04	885,0

Здесь STRAIN – деформация, STRESS – напряжение, МПа.

Таблица 3.4. Свойства жаропрочного никелевого сплава

Характеристики	t = 20°C	400°C	600°C
Модуль упругости E _x , МПа	200000	182000	165000
Коэффициент Пуассона, PRXY	0,3	0,3	0,3
Плотность, DENS, кг/м ³	8320	8320	8320
Предел прочности σ _в , МПа	950	900	885
Относительное удлинение δ, %	22	22	24

Титановый сплав

Таблица 3.5. Данные для построения кривых растяжения

T1 = 20°C		T2 = 200°C		T3 = 300°C		T4 = 400°C	
STRAIN	STRESS	STRAIN	STRESS	STRAIN	STRESS	STRAIN	STRESS
0,005	575,0	0,005	555,0	0,005	540,0	0,005	500,0
0,007	805,0	0,007	770,0	0,007	635,0	0,007	600,0
0,009	1000, 0	0,009	817,0	0,009	675,0	0,009	643,5
0,011	1040, 0	0,011	844,0	0,011	696,0	0,011	669,0
0,04	1090, 0	0,04	895,0	0,04	750,0	0,04	720,0

Здесь STRAIN – деформация, STRESS – напряжение, МПа.

Таблица 3.6. Свойства титанового сплава

	Температура			
	t = 20°C	200°C	300°C	400°C
Модуль упругости E _x , МПа	115000	112000	108000	100000
Коэффициент Пуассона, PRXY	0,34	0,34	0,34	0,34
Плотность, DENS, кг/м ³	4500	4500	4500	4500
Предел прочности σ _в , МПа	1090	895	750	720
Относительное удлинение δ, %	6	6	6	6

Жаропрочная сталь

Таблица 3.7. Данные для построения кривых растяжения

T1 = 20°C		T2 = 400°C		T3 = 500°C	
STRAIN	STRESS	STRAIN	STRESS	STRAIN	STRESS
0,003	600,0	0,003	495,0	0,003	435,0
0,004	700,0	0,004	590,0	0,004	510,0
0,005	735,0	0,005	640,0	0,005	540,0
0,0057	750,0	0,0057	650,0	0,0057	550,0
0,15	900,0	0,15	700,0	0,15	600,0

Здесь **STRAIN** – деформация, **STRESS** – напряжение, МПа.

Таблица 3.8. Свойства жаропрочной стали

	Температура			
	t = 20°C	300°C	400°C	500°C
Модуль упругости E _x , МПа	200000	175000	165000	145000
Коэффициент Пуассона, PRXY	0,3	0,3	0,3	0,3
Плотность, DENS, кг/м ³	7800	7800	7800	7800
Предел прочности σ _в , МПа	900	750	700	600
Относительное удлинение δ, %	8	9	10	12

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Букатый С. А. Расчёт стяжного болта и вала ротора компрессора ГТД методом эквивалентных жёсткостей / С.А. Букатый // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2(25). – С. 192–196.
2. Букатый С.А. Расчёт стяжного вала компрессора ГТД семейства Д-30 методом эквивалентной жёсткости / С.А. Букатый, Д.П. Лёшин // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – Орёл. – 2012. – № 5 (295). –С. 54–58.
3. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева // – М., УРСС, – 2003. – 270 с.
4. Александров В.Г. Справочник по авиационным материалам и технологии их применения / В.Г. Александров, Б.И. Базанов // – М.: Транспорт, 1979. – 263 с.

Учебное издание

***Букатый Станислав Алексеевич,
Букатый Алексей Станиславович,
Водолагин Алексей Львович***

**РАСЧЁТ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ
СЛОЖНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ
ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЖЁСТКОСТЕЙ**

Учебное пособие

Редакционно-издательская обработка
издательства Самарского университета

Подписано в печать 22.12.2022. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 4,75.

Тираж 120 экз. (1-й з-д 1-25). Заказ № . Арт. – 39(Р2УП)/2022.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.