

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

**Д.С. Лёжин, А.В. Собуль**

**Исследования динамики и прочности элементов двигателей  
с использованием современных измерительных комплексов  
и САЕ-пакетов**

Электронное учебное пособие

САМАРА

2011

УДК 620.178.4  
ББК СГАУ: 30.121

Авторы: **Лёжин Дмитрий Сергеевич,**  
**Собуль Александр Владимирович**

Рецензент: д-р техн. наук, профессор В.Н. Матвеев

**Лёжин, Д.С. Исследования динамики и прочности элементов двигателей с использованием современных измерительных комплексов и САЕ-пакетов [Электронный ресурс] :** электрон. учеб. пособие / Д.С. Лёжин, А.В. Собуль; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (53,4 Мбайт). - Самара, 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM). - Систем. требования: ПК Pentium; Windows 98 или выше.

В учебном пособии подробно рассмотрены методики проведения расчётных и экспериментальных исследований модельных элементов двигателей, базирующихся на использовании САЕ-пакета ANSYS и измерительного комплекса ARAMIS. Представлены возможности, предоставляемые совместным использованием экспериментальных и расчётных методов в исследованиях. Поставлены вопросы, требующие проведения исследований, как при проведении расчётов, так и в процессе экспериментов.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2011

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Лабораторная работа №1.....	6
Лабораторная работа №2.....	31
Лабораторная работа №3.....	46

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие техники предоставляет новые возможности в исследовании элементов двигателя на стадии проектирования и доводки. Это дает возможность удешевить процесс проектирования, сделать двигатель более надежным и повысить его конкурентоспособность. В процессе проектирования широко используется САЕ – пакет ANSYS. Без метода конечных элементов сегодня невозможно представить процесс проектирования и доводки. Расчеты в САЕ – пакетах обеспечивают высокую точность, однако это обеспечивается корректностью задачи на уровне ее постановки. Требуется грамотно задать тип элементов, граничные условия. В этом могут оказать существенную помощь экспериментальные методы исследования. Измерительный комплекс ARAMIS, основанный на фотограмметрическом методе, позволяет измерять перемещения и деформации исследуемого объекта. Использование данного комплекса дает возможность провести верификацию элементов, используемых в расчетах в пакете ANSYS, исследовать корректность задания в САЕ – пакете граничных условий.

Учебное пособие построено в виде трех отдельных лабораторных работ. Эти работы составлены так, что дополняют друг друга в части возможностей измерительной системы ARAMIS. Выполнив их, студент получит целостное представление о возможностях системы. В учебном пособии представлены алгоритмы проведения совместных расчетно – экспериментальных исследований. В каждой из работ исследуются различные модельные элементы двигателя, ставится задача исследования и предлагается провести исследование какого – либо параметра расчетного или экспериментального методов и оценить влияние этого параметра на точность и качество полученных результатов. Особое внимание уделено экспериментальной части исследований. Авторами накоплен определенный опыт в этой области, в работах нашли отражение проблемные вопросы, с которыми авторам пришлось столкнуться в процессе освоения измерительного комплекса ARAMIS. Показаны новые возможности, которые дает совместное использование расчетно – экспериментальных методов.

Проведение экспериментов с использованием современного измерительного комплекса ARAMIS дает возможность корректно формулировать задачу для ее решения в CAE – пакете ANSYS, а учет экспериментальных данных в процессе расчета и проектирования элементов двигателя позволяет повысить качество расчетов.

Пособие рекомендуется студентам 4 курса в качестве пособия по лабораторным работам в рамках дисциплины «Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок».

Кроме того, пособие может быть интересно студентам – дипломникам, аспирантам и магистрантам для факультативной работы, чьи исследования связаны с турбомашиностроением.

## Лабораторная работа №1

### РАСТЯЖЕНИЕ ПЛАСТИНЫ БЕЗ КОНЦЕНТРАТОРА

Цель работы: выбор оптимальных конечных элементов в ANSYS, для расчета на растяжение/сжатие, и подкрепление теоретических знаний непосредственно экспериментом, используя оптическую систему «ARAMIS HS»

Выбор конечных элементов в ANSYS крайне важен, потому что он напрямую влияет на результат и может вносить большую погрешность в расчеты, что для ответственных расчетов недопустимо.

Объектом эксперимента является плоская пластина (рисунок 1.1). Пластина закреплена в разрывной машине, две высокоскоростные камеры сфокусированы в центральную часть пластины, вся информация будет передаваться в ПК.

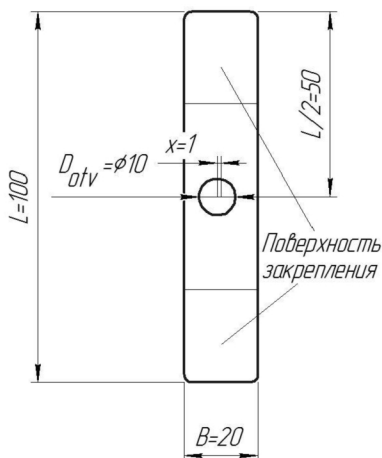


Рисунок 1.1 Схема измеряемой пластины, где,  $L$  – общая длина пластины,  $B$  – ширина пластины в месте закрепления,  $D_{otv}$  – диаметр отверстия,  $x$  – смещение центра отверстия относительно центра пластины.

## Методика проведения эксперимента (пошаговая инструкция)

### 1. определение измеряемого объема и подготовка экземпляра.

В качестве объекта исследования используется пластина с концентратором в виде центрального отверстия. Чертеж с основными размерами данной пластины приведен на рис. 1.

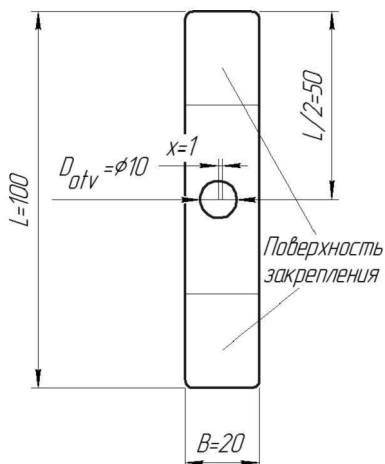


Рисунок 1 Изображение пластины

Возьмем пластину, представленную на рисунке 1.

Нас будут интересовать участок пластины в окрестности отверстия. Ширина пластины не превышает 20 мм, поэтому будем использовать калибровочный объем 30х24 мм.

### 2. подготовка экземпляра.

Как было сказано в описании к системе «ARAMIS», поверхность измеряемого объекта должна быть контрастной. Напыляем на объект белую матовую краску тонким слоем, и даем ей высохнуть, затем напыляем второй слой черной краски, в виде мелких точек.

Для получения контрастной структуры напыление производить на значительном расстоянии аэрозольного баллона от пластины. Пластина с напылением представлена на рисунке 2.

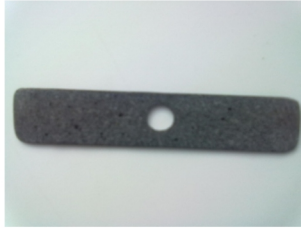


Рисунок 2 Пластина с напылением

### 3. калибровка камер под измеряемый объем.

После установки камер и приборов освещения производятся все необходимые действия, указанные в описании к «ARAMIS»

### 4. создание нового проекта.

Создается новый проект. *File-New Project*

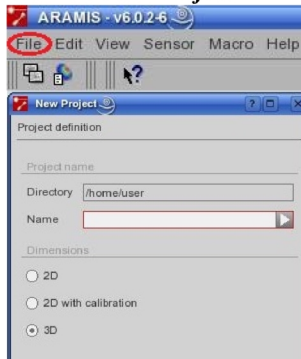


Рисунок 3 Создание нового проекта

Указываем название проекта в пункте *Name*, а директорию где он будет храниться, оставляем по умолчанию. Так же это меню позволяет выбрать тип проекта 3D/2D

### 5. регулировка типа записи изображений.

Зайдем в меню записей:

**Панель инструментов – Start/Stop Measurement Mode** (.

Далее необходимо будет выбрать тип сенсора. Для нашей задачи рекомендуется использовать сенсор **3D HS Aramis**.

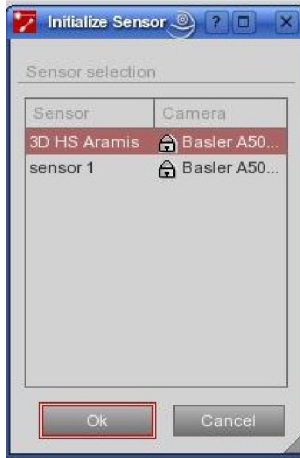


Рисунок 4 Тип сенсора

Записывать будем по кадрам, поэтому выбираем тип записи *Simple*, но возможны и другие варианты, которые будут применены в других ЛР.

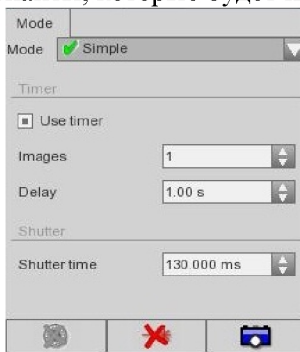


Рисунок 5 Параметры съемки

Такой выбор съемки связан с тем, что нагружение образца будет производиться по шагам. Шаг будет равен нагрузке 50 Н.

Для данного типа съемки главным настроечным параметром будет выдержка (*shutter time*). Выдержка задается таким образом, чтобы объект в свете выглядел контрастно, и на нем не возникало переосвещенных участков, как на рисунке 6а. Если полученное изображение является таким как представлено на рисунке 6б, то

необходимо либо уменьшить выдержку, либо уменьшить яркость света.

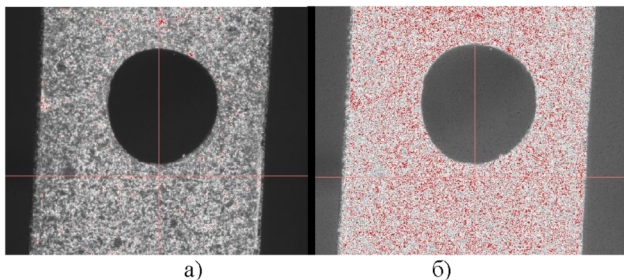


Рисунок 6 Изображение освещенного объекта

Перед тем как проводить нагружение образца, производится «тестовая съемка». Она включает в себя следующие действия: объект закрепляется в разрывной машине, делается один кадр, затем задается автоматическая стартовая точка и производится расчет со стандартными параметрами (*Start/Stop Measurement Mode-Auto Start Point – Compute Project*).

Если изображение выглядит, как продемонстрировано на рисунке 7а, то эксперимент можно продолжать. Если же оно как на рисунке 7б, то необходимо выполнить следующие действия: сначала изменить параметры фасетов, а в случае, если картинка не изменилась, – сделать калибровку, либо заново напылить пластину. Изображение также считается непригодным для расчета, когда существуют бледно-жёлтые включения. В этих местах объекта параметры фасетов не определены и рассчитываться не будут.

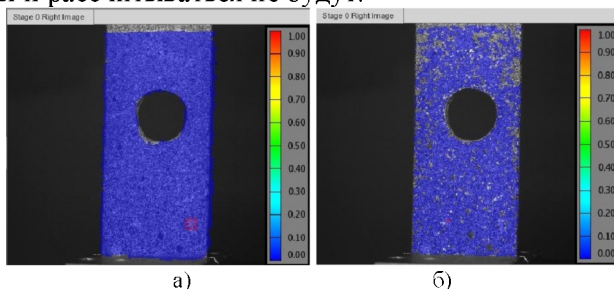


Рисунок 7 Изображение «нулевого» кадра

## 6. определение маски вычисления в измеряемых кадрах.

Проводится для уменьшения объема вычислений (соответственно времени). На полученном изображении необходимо выделить интересующую для последующих расчетов область.



Для того чтобы наложить маску, необходимо нажать на значок (Define Mask).

Следовательно, ограничиваем маской только нужные нам поверхности, как показано на рисунке 8.

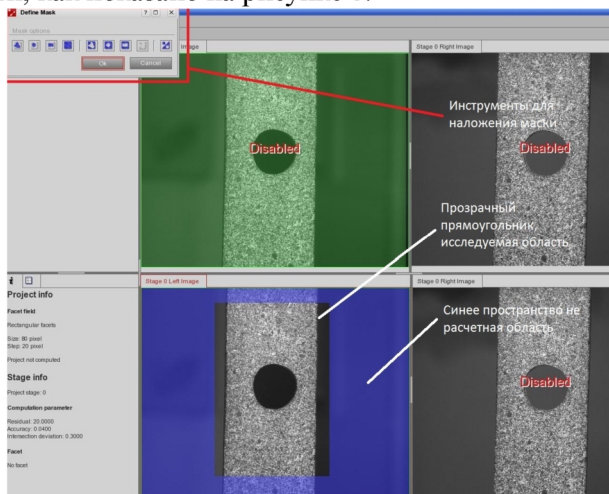




Рисунок 8 Наложение маски

## 7. определение стартовых точек для начала процесса вычисления.

Стартовая точка определяет, откуда будет начат расчет. Если стартовая точка не определена, или определена с ошибками, необходимо изменить параметры, в частности, изменить шаг и размер фасета. В нашем случае размер фасета 80 пикселей, а шаг фасета 5 пикселей.

Выбор размера фасета оказывает влияние не только на определение стартовой точки, но и на точность вычислений.

*(Смотри раздел описания «ARAMIS» фасеты).*

Для того чтобы задать стартовую точку, необходимо нажать **Project Mode – Auto Start Point** () или задание стартовой точки в ручном режиме: **Project Mode – Add Start Point** (.

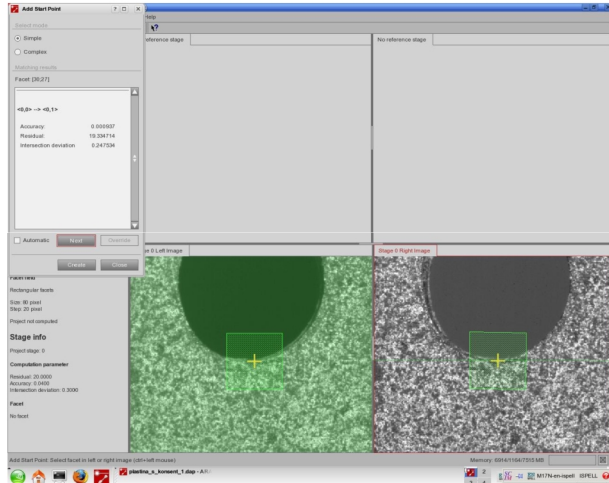


Рисунок 9 Положения стартовой точки на образце

Стартовая точка на правой камере должна соответствовать точке на левой камере. Если это условие выполнено, то калибровка и съемка проведены правильно.

## 8. вычисление проекта.

После того, как задали параметры фасетов, наложили маску и указали стартовую точку, можно будет начать расчет.

***Project Mode – Compute Project*** (🕒).

## 9. выбор типа отображаемого результата.

### **преобразование проекта в определенную систему координат.**

Данное преобразование связано с трудностью установления камеры абсолютно перпендикулярно объекту. Поэтому целесообразно связать СК не с камерами, а с объектом. Иначе, мы будем наблюдать результаты, спроецированные на глобальную систему координат.

Система координат задается так: ***Project – Transformation - 3-2-1 Transformation.***

Система координат задается по шести точкам. Первые три точки определяют плоскость, четвертая и пятая задают направление оси, шестая точка определяет положение СК.

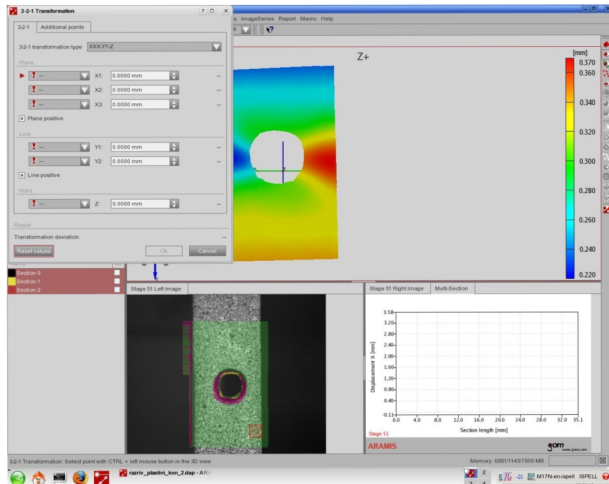


Рисунок 10 локальной системы координат

## 10. постобработка данных

Используется для подавления нежелательного шума измерений, интерполирования отсутствующих пространственных точек, подчеркивания местных эффектов.

В нашем случае, в связи с заданными параметрами фасетов, на краях и в центре появились нежелательные точки. Поэтому надо их удалить/скрыть. Нажмем **Results – Delete 3D points**. Затем, с помощью



инструментов выделения ( ) выбираем точку или множество точек, которые хотим удалить. Нажимаем **Preview**, смотрим, что выделили, если нас все устраивает - нажимаем **Apply**.

На рисунке 11 приведено отображении деформаций по оси X. С плохими, не удаленными 3D точками - рис 11а, и удаленными 3D точками - 11б.

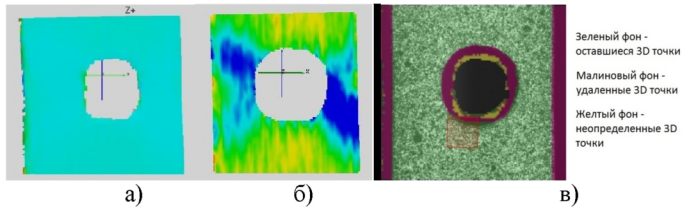


Рисунок 11 отображение деформаций

## 11. определение элементов анализа.

Для проведения анализа выбирается один или несколько кадров.

Для этого необходимо построить дополнительные сечения и вывести результаты для этих сечений. Построим 3 сечения, которые будут проходить по краям и центру отверстия.

Нажимаем **Sections – Create Section**, появится окно, представленное на рисунке 12. Затем вводим необходимые нам параметры - **Create**

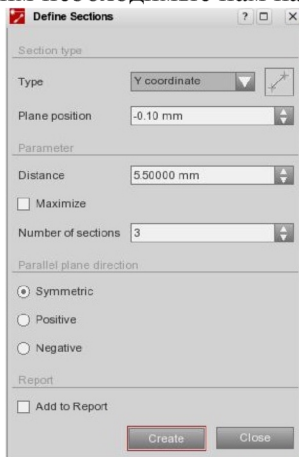


Рисунок 12 Окно параметров сечений

В окне (**Type**) можно задать, перпендикулярно какой оси будет располагаться сечение. Расстояние от этой оси до плоскости сечения задается в пункте (**Plane position**), количество сечений – в (**Number of sections**), расстояние между крайними сечениями - в (**Distance**).

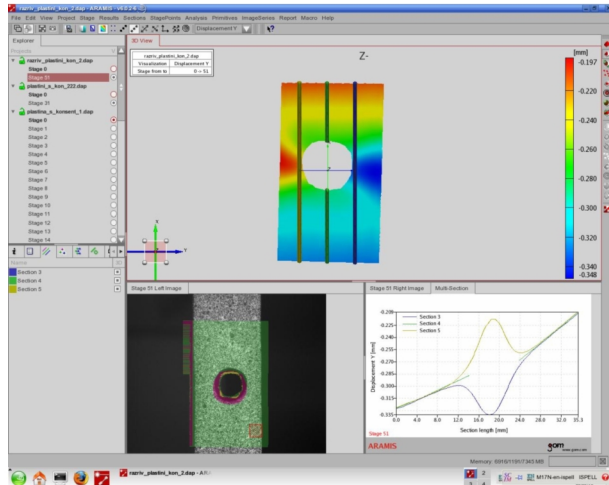









Рисунок13 Построение дополнительных сечений

## 12. документирование.

Документирование результатов включает в себя создание отчетов, экспорт данных и т.п.

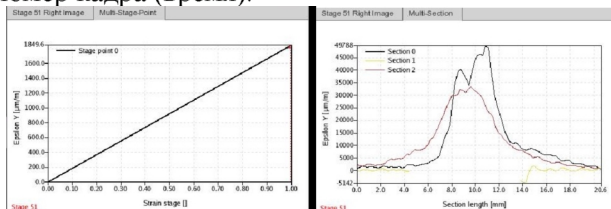
«ARAMIS» позволяет различным способом просматривать результаты.

В раскрывающемся окне () выбираем пункт, который нас интересует. В данной работе выбираем напряжение (Sigma X). Затем в меню информации (      ) переходим во вкладку **Image Series** далее смотрим результаты:

Для точки – **Report Multi Stage Point** (рисунок 14а)

Для сечений – **Report Multi Section** (рисунок 14б)

В выведенных графиках ось абсцисс – наблюдаемый параметр, ось ординат - номер кадра (время).



а) б)  
Рисунок 14 Выведение результатов

Каждый этап очень важен, и неправильное выполнение условий приводит, как правило, к неправильной интерпретации результатов.

## МЕТОД РАСЧЕТА

**Теоретический метод. Метод сопромата.**

### КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

В теории упругости и пластичности, увеличение напряжений в малых областях, примыкающих к местам с резким изменением формы поверхности тела, его сечения или с «локализом», характеризуется неоднородностью материала внутри тела. Факторами концентрации напряжений могут быть надрезы, выточки, выбоины, полости, усадочные раковины, трещины, инородные включения, царапины и т.п. Концентратор может быть причиной разрушения тел, т. к. он снижает сопротивление тела ударным нагрузкам.

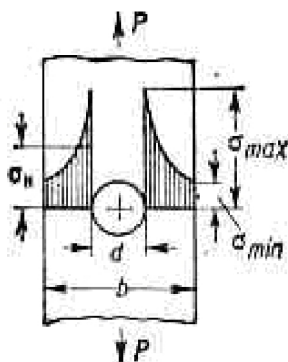


Рисунок 15 Поле распределения напряжения в пластине с концентратором

Для уменьшения концентрации напряжений используются разгружающие надрезы, усиление зоны концентратора напряжений (например, увеличение толщины пластинки вокруг отверстия), технологические приёмы упрочнения материала в зоне концентратора напряжений и т.п.

Распределение напряжений при наличии концентратора напряжений определяется методами теории упругости и пластичности, а также экспериментально (тензометрированием, методом лаковых покрытий, поляризационно-оптическим методом и др.).

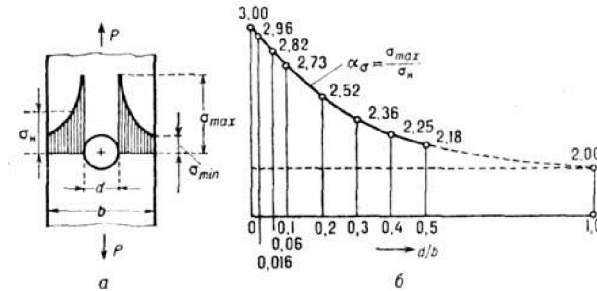


Рисунок 16. Концентрация напряжений при растяжении полосы шириной  $b$  с круговым отверстием диаметра  $d$  силой  $P$ .

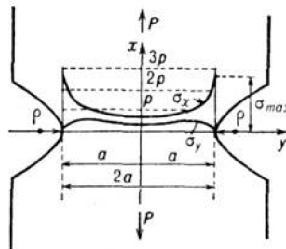


Рисунок 17 Концентрация напряжений при растяжении полосы с двумя симметричными гиперболическими выточками.

При растяжении широкого образца толщиной  $h$  с двусторонней выточкой, имеющей форму гиперболы (рис. 16), наибольшие напряжение будут на контуре выточки в её вершине. Для различных значений,  $a/\rho$  в вершине выточки

$$\sigma_{МАКС} = P \cdot \frac{2 \cdot (a/\rho + 1) \cdot \sqrt{a/\rho}}{(a/\rho + 1) \cdot \operatorname{arctg} \sqrt{a/\rho} + a/\rho} \quad (1.1)$$

(где  $a-1/2$  ширины образца между выточками,  $\rho$  - радиус кривизны выточки,  $p = P/2ah$  - т.н. номинальное напряжение, равное среднему нормальному растягивающему напряжению  $P$  по наиболее узкому поперечному сечению образца). Из формулы (1.1) видно, что максимальное напряжение при  $a/\rho = 4$ . По мере удаления от контура выточки  $S_{\text{MAX}}$  быстро затухают и очень скоро становятся значительно меньше  $p$ , а при уменьшении  $\rho$  быстро возрастают.

Чем больше максимальное напряжение в месте концентрации по сравнению с  $p$ , тем резче наблюдается затухание напряжений при удалении от наиболее напряжённой зоны. Это особенно резко проявляется в случае пространственного напряжённого состояния. Свойством быстрого затухания напряжений возле концентратора можно воспользоваться для уменьшения наибольшего напряжения, имеющегося в соседстве с данным концентратором, путём устройства дополнительного нового концентратора напряжений. Этим часто пользуются для разгрузки напряжённого состояния в детали и для получения более равномерного напряжённого состояния с плавным его изменением.

Количественной оценкой концентратора напряжений служит коэффициент концентрации напряжений

$$a_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{МАКС}}}{\sigma_H}, \quad a_{\tau} = \frac{\tau_{\text{МАКС}}}{\tau_H} \quad (1.2)$$

Где  $\sigma_H$  и  $\tau_H$  - номинальные напряжения. На рис. 16 (б) приведены  $a_{\sigma}$  в плоском образце с круговым отверстием для различных отношений  $d/b$ .

Анизотропия упругих свойств материала оказывает сильное влияние на величину  $a_{\sigma}$  лишь в небольшой области вблизи концентратора, а по мере удаления от концентратора напряжений  $a_{\sigma}$  быстро затухает, как и в случае изотропной среды. Так, напр.,  $a_{\sigma}$  в точке  $a_{\sigma}$  (рис. 16 б) эллиптического отверстия, находящегося в неограниченной ортотропной пластинке, характеризуемой упругими константами,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  определяется по формуле

$$\alpha_\sigma = \sigma_{\text{МАКС}} / p = 1 + (\beta_1 + \beta_2) \cdot \sqrt{a/\rho} \quad (1.3)$$

Для изотропной среды  $\beta_1 = \beta_2 = 1$  и тогда

$$\alpha_\sigma = 1 + 2 \cdot \sqrt{a/\rho} \quad (1.4)$$

Из (1.3) и (1.4) следует, что в случае малых отверстий номинальным напряжением  $\sigma_H$  будут напряжения  $p$  в соответствующей точке неослабленной пластинки, находящейся под действием той же системы внеш. усилий, что и ослабленная данным отверстием пластинка.

## Математический метод. Метод конечных элементов с использованием программного комплекса «ANSYS»

### Типы элементов

В ANSYS существует множество элементов. Каждый элемент используется для решения определенных задач, таких как: статический, электрический, динамический, с использованием контактных поверхностей, и др. Мы будем использовать элементы структурного анализа (Structural elements). Для объемных объектов будем использовать: Solid92, Solid45, Solid95. Для плоских элементов будем использовать: Shell 63, Plane182, Plane183.

SOLID45 используется для трехмерного моделирования твердых структур. Элемент определяется восемью узлами с тремя степенями свободы в каждом узле.

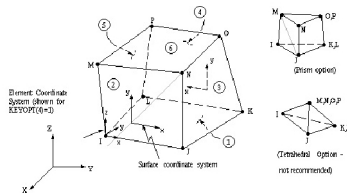


Рисунок 18 Элемент SOLID45

SOLID92 имеет квадратичное поведение перемещения и хорошо подходит для моделирования нерегулярных сеток (например, импортированных из различных CAD / CAM-систем).

Элемент определен в десять узлов, имеющих три степени свободы в каждом узле.

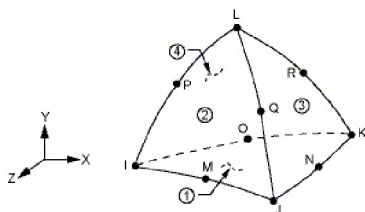


Рисунок 19 Элемент SOLID92

SOLID95 используется для 3-D моделирования твердых структур. Он определяется по двадцати узлами, имеющим три степени свободы в каждом узле.

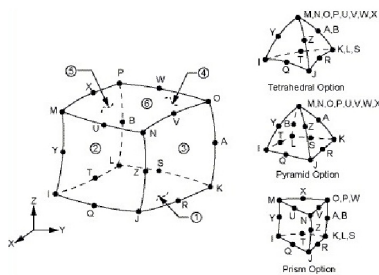


Рисунок 20 Элемент SOLID95

SOLID95 является элементом более высокого порядка версии 3-D, 8-узлового твердотельного элемента SOLID45. Он может использоваться при неправильной форме без потери точности. Элемент SOLID95 имеет совместимые формы перемещения, и хорошо подходит для моделирования криволинейных границ.

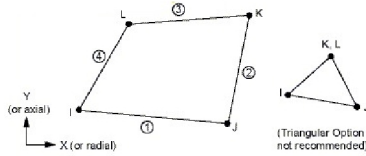


Рисунок 21 Элемент PLANE182

Элемент PLANE182 используется для 2-D моделирования твердых структур. Он может быть использован как элемент плоскости (плоской деформации) или осесимметричных элементов. Он определяется четырьмя узлами с двумя степенями свободы в каждом.

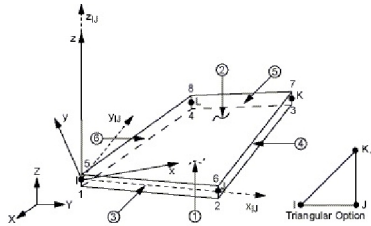


Рисунок 22 Элемент SHELL63

Элемент SHELL63 имеет шесть степеней свободы в каждом узле: перемещения вдоль осей x y z и повороты узлов вокруг x, y, и z-оси. Этому состоянию соответствует касательный вариант матрицы жесткости. Элемент используется при больших отклонениях форм объекта.

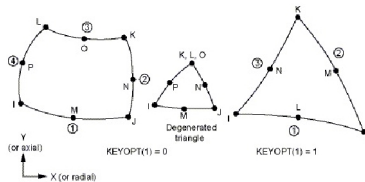


Рисунок 23 Элемент PLANE183

Элемент PLANE183 – элемент более высокого порядка 2-D, 8-узловой или 6-узловой. PLANE183 имеет квадратичное поведение перемещения и хорошо подходит для моделирования нерегулярных

сеток (например, спроектированными различными CAD / CAM-системами).

С помощью этих элементов можно посчитать перемещения, напряжения и деформации, но каждый элемент описывается и определяется соответствующими уравнениями с некоторыми допущениями. Оценим эти допущения, сравним получившиеся результаты с реальным экспериментом и теорией.

## МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ И РАСЧЕТА В ANSYS

### 1. Построение геометрии

Загрузим файл так: *File – Read Input From, выбираем текстовый документ пластины* 3 объемные и 3 плоские модели пластины. Пластина имеет размеры, представленные на рисунке 24. Толщина пластины 1 мм.

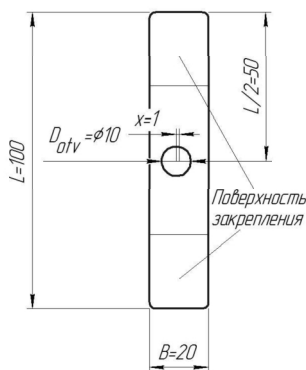


Рисунок 24 Схема пластины

Построенные пластины должны выглядеть как на рисунке 25

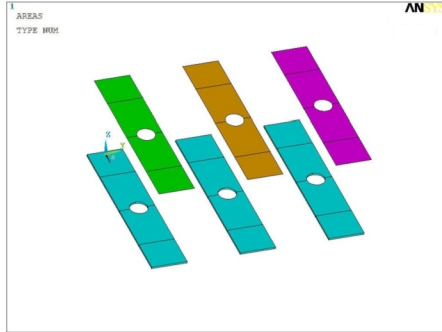


Рисунок 25 Изображение пластин

## 2. Задание материала, элементов и реальных констант

### 2.1 Задание материала

Нажимаем *PrePr* – *Material Props* – *Material Models*, появится окно, представленное на рисунке 26.

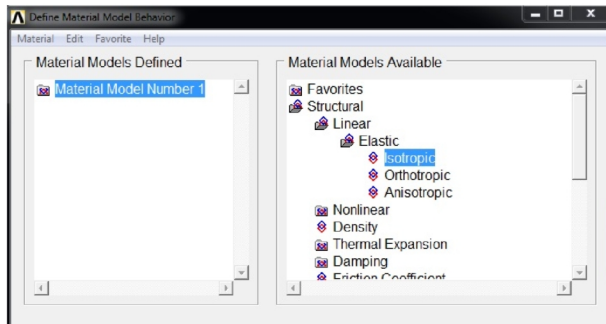


Рисунок 26 Задание свойств материала

Выбираем *Structural* – *Linear* – *Elastic* – *Isotropic*. Появится окно, представленное на рисунке 27. Затем в окне, изображенном на рисунке 26, выбираем пункт *Density*. Появится окно, представленное на рисунке 28.

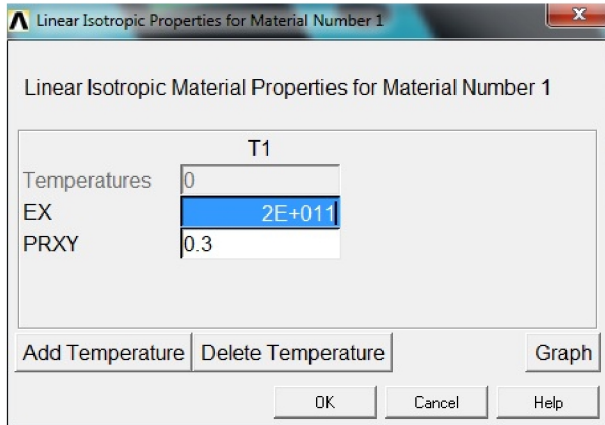


Рисунок 27 Свойства материала

В появившемся окне вводим значение модуля упругости (EX) и коэффициент Пуансона (PRXY). Модуль упругости для стали равен  $2e11$  МПа, а коэффициент Пуансона - 0,3.

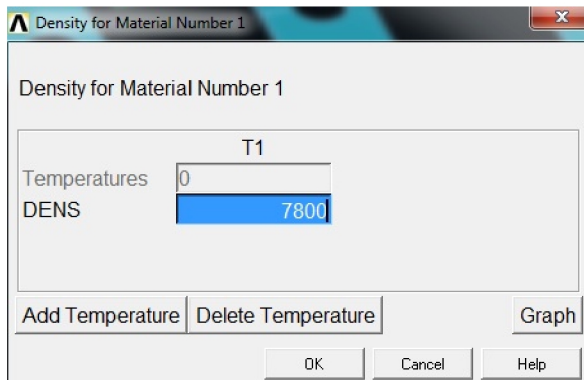


Рисунок 28 Плотность материала

В появившемся окне вводим значение плотности (DENS). Для стали плотность равна  $7800\text{кг/м}^3$ .

## 2.2 Задание типов элементов

Нажимаем *PrePr – Element Type – Add/Edit/Delete*, на экране появится окно, представленное на рисунке 29.

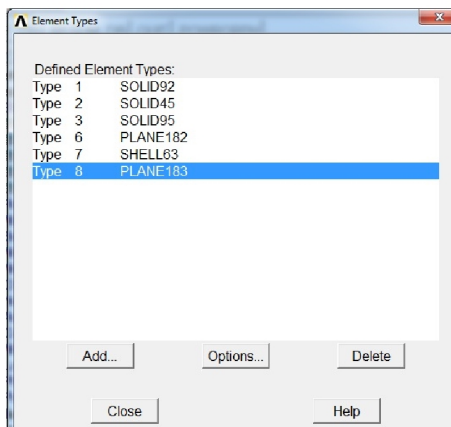


Рисунок 29 Задание типов элементов

В появившемся окне нажимаем кнопку *Add* и выбираем следующие типы элементов: **SOLID92**, **SOLID45**, **SOLID95**, **PLANE182**, **SHELL63**, **PLANE183**.

## 2.3 Задание реальных констант

Для элемента **SHELL63** задаем реальную константу, которой в данном случае является толщина.

Нажимаем *PrePr – Real Constant – Add/Edit/Delete*, на экране появится окно, представленное на рисунке 30.

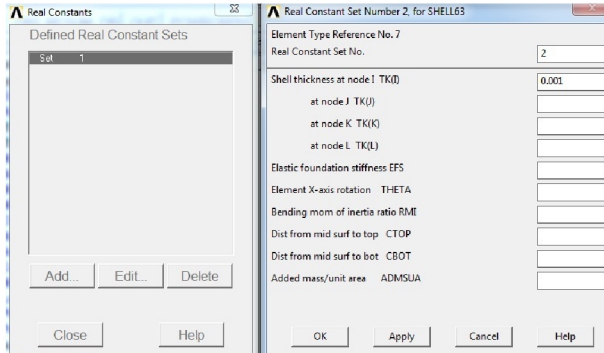


Рисунок 30 Реальные константы

В пункте ТК(I) вводим значение толщины пластины, равное 0.001 (1мм).

### 3. Назначение размера элемента

*PrePr – Meshing – Size Cntrls – Manual Size – Lines,*

появится окно представленное на рисунке 31

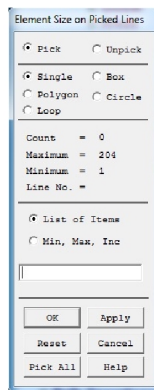


Рисунок 31 Выбор линий

Выбираем все линии и нажимаем **OK**.

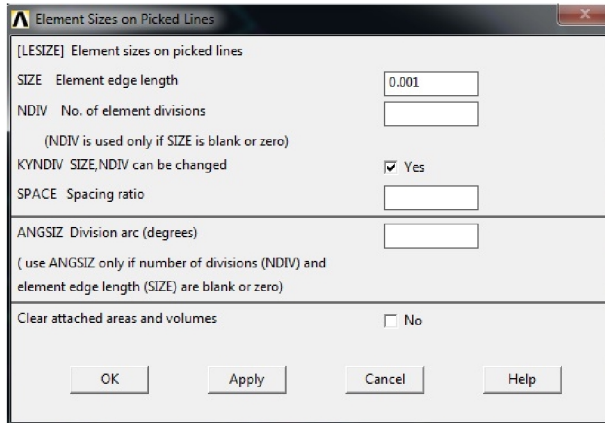


Рисунок 32 Задание размера элемента

Для различных случаев будем вводить размер элемента от 1 до 5 мм.

#### 4. Задание нагрузки

Зададим перемещение, используя следующий алгоритм: *PrePr – Loads – Define Loads – Apply – Structural – Displacement*.

Для объемных моделей нагрузку прикладываем к поверхностям, для плоских моделей - к линиям.

Для одного края пластины по оси Y и Z ограничиваем перемещение полностью, по оси X задаем перемещение равное 0,08 мм; для другого - ограничиваем по всем осям.

#### 5. Расчет и просмотр результатов

Запуск расчета: *Solve – Current LS*.

#### 6. Просмотр результатов

Нажимаем *General PostPr – Plot Results – Contour Plot*. Далее в меню выбираем либо напряжения, либо перемещения, либо деформации по сечению.

Результат будем смотреть в одной точке (узле). Введем *General PostPr – Query Results – Subgrid Solu*, появится следующее меню, представленное на рисунке 33.

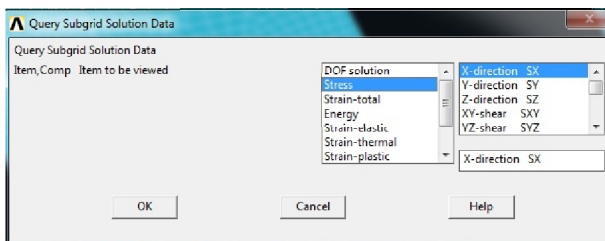


Рисунок 33 Меню Subgrid Solution

И выбираем нужные нам узлы.

## РАСЧЕТ МЕТОДОМ СОПРОМАТА

Так как в нашем случае отверстие считается малым, то напряжение будет рассчитано по формуле  $\sigma_{\text{МАКС}} = F/S$ . К краям напряжение падает, поэтому оно нас интересовать не будет.

Так как отверстие находится не по центру, то максимальные напряжения у краев отверстия будут различными.

В нашем случае длина меньшей перемычки равна 4,5 мм; длина большей перемычки - 5,5 мм. Толщина пластины составляет 1 мм. Соответственно, площадь меньшей перемычки- 4,5 мм<sup>2</sup>, площадь большей – 5,5 мм<sup>2</sup>. Получаем:

$$\sigma_{1\text{МАКС}} = \frac{F}{S} = \frac{300}{4,5 \cdot 10^{-6}} = 66,6 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{2\text{МАКС}} = \frac{F}{S} = \frac{300}{5,5 \cdot 10^{-6}} = 54,54 \text{ МПа}$$

Полученные результаты запишем в таблицу 1

## РАСЧЕТ В ARAMIS

После выполнения всех вышеуказанных пунктов в методике, приступаем к просмотру результатов. Как было ранее сказано, будем смотреть перемещения, напряжения и деформации по сечению, которое будет, проходить посередине пластины, как показано на рисунке 26. Полученные результаты заносим в таблицу 1

## РАСЧЕТ В ANSYS

Расчет будем проводить для различных значений размера сетки, начиная с крупного – 5 мм и заканчивая малым – 1 мм. Все полученные результаты заносим в таблицу

Значения для узла будем смотреть с помощью меню Query Subgrid Solution.

Результаты заносим в таблицу 1

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отчет по лабораторной работе включает в себя расчетную схему с указанием всех необходимых величин; отчеты из ARAMIS и ANSYS; сравнение расчетных и экспериментальных значений напряжений и деформаций в опасном сечении; анализ полученных результатов.

Таблица 1 Напряжения

Расчет методом сопромата	Расчет в ARAMIS	Расчет в ANSYS							Размер элемента, мм.
		Тип элемента							
									5
									4
									3
									2
									1

По данным результатам необходимо рассчитать погрешность для каждого из методов.

## Лабораторная работа №2

### ИЗУЧЕНИЕ ПЛАСТИЧНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

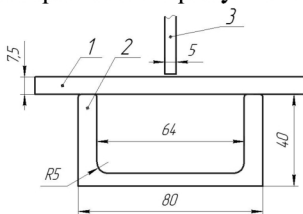
Цель работы: определение опытным путем, используя оптическую систему «ARAMIS HS», величины деформаций и напряжений в балке плоского поперечного сечения. Также необходимо провести сравнение результатов, полученных теоретическим и опытным путем.

Объектом данной лабораторной работы будет являться стержень, прямоугольного поперечного сечения. Материал, из которого он выполнен, – алюминий. Стержень установлен на 2 опорах. Нагружать стержень будем посередине, причем величина нагрузки будет такой, что произойдут пластические деформации.

#### Методика проведения эксперимента (пошаговая инструкция)

##### 1. определение измеряемого объема и подготовка экземпляра

В качестве объекта исследования используется стержень прямоугольного поперечного сечения. Он установлен на двух стальных опорах, как изображено на рисунке 1.



1 – исследуемая пластины, 2 – стальной профиль, 3 – стальная пластина  
Рисунок 1 Изображения стержня

Возьмем стержень, представленный на рисунке 1

Нас будут интересовать участок стержня в окрестности, где стальная пластина соприкасается со стержнем. Ширина стержня не превышает 10 мм, поэтому будем использовать калибровочный объем 30x24 мм

##### 2. подготовка экземпляра

Как было сказано в описании к системе «ARAMIS» поверхность измеряемого объекта должна быть контрастной. Напыляем на объект белую матовую краску тонким слоем и даем ей высохнуть. Затем напыляем второй слой черной краской, в виде мелких точек. Для получения контрастной структуры напыление необходимо производить на значительном расстоянии аэрозольного баллона от пластины. Напыленная пластина представлена на рисунке 2.

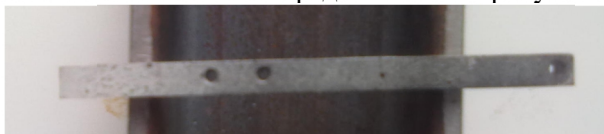


Рисунок 2 Стержень с напылением

### 3. калибровка камер под измеряемый объект

После установки камер и приборов освещения производятся все необходимые действия, указанные в описании к «ARAMIS»

### 4. создание нового проекта

Создается новый проект. Нажимаем *File-New Project*, как указано на рисунке 3.

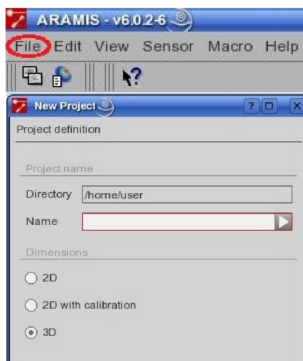



Рисунок 3 Создание нового проекта

Указываем название проекта в пункте *Name*, а директорию где он будет храниться, оставляем по умолчанию. Затем необходимо выбрать тип проекта: 3D или 2D.

### 5. регулировка типа записи изображений

Зайдем в меню записей: *Панель инструментов – Start/Stop Measurement Mode* (  ).

Далее необходимо будет выбрать тип сенсора, для нашей задачи рекомендуемым считается *3D HS Aramis*.

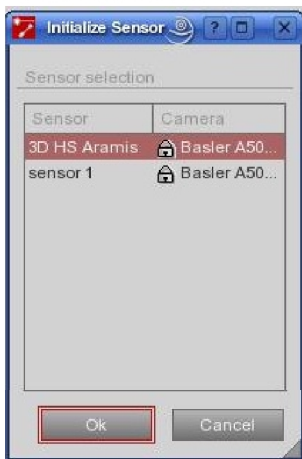


Рисунок 4 Тип сенсора

Записывать будем по кадрам, поэтому выбираем тип записи *Simple*, но возможны и другие варианты, которые будут применены в других ЛР.

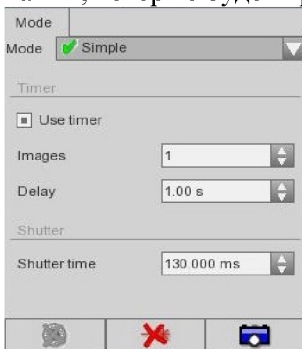


Рисунок 5 Параметры съемки

Такой выбор съемки связан с тем, что нагружение образца будет производиться по шагам, шаг будет равен перемещению 0,01 мм. Для данного типа съемки главным настроечным параметром будет выдержка (*shutter time*). Выдержка задается таким образом, чтобы объект в свете выглядел контрастно, и на нем не возникало переосвещенных участков, как на рисунке ба. Если изображение

выглядит, как продемонстрировано на рисунке 6б, необходимо либо уменьшить выдержку, либо уменьшить яркость света.

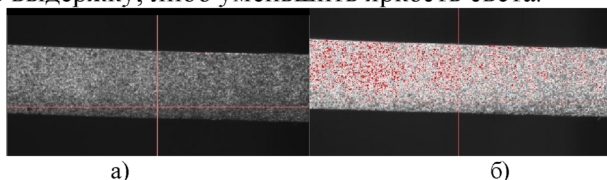


Рисунок 6 Вид объекта в режиме OVEREXPOSED

Перед тем как проводить нагружение образца, производится «тестовая съемка». Она включает в себя следующие действия: объект закрепляется в разрывной машине, делается один кадр, затем задается автоматическая стартовая точка и производится расчет со стандартными параметрами (*Start/Stop Measurement Mode-Auto Start Point – Compute Project*).

Если изображение выглядит, как продемонстрировано на рисунке 7а, то эксперимент можно продолжать. Если же оно как на рисунке 7б, то необходимо выполнить следующие действия: сначала изменить параметры фасетов, а в случае, если картинка не изменилась, – сделать калибровку, либо заново напылить пластину. Изображение также считается непригодным для расчета, когда существуют бледно-жёлтые включения. В этих местах объекта параметры фасетов не определены и рассчитываться не будут.

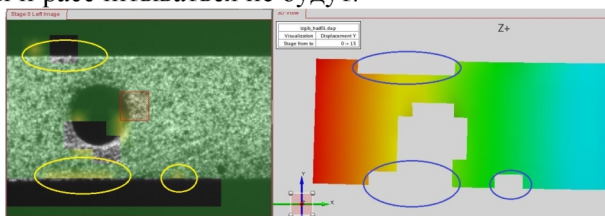



Рисунок 7 Изображение плохих 3D точек

## 6. определение маски вычисления в измеряемых кадрах

Проводится для уменьшения объема (соответственно времени) вычислений. На полученном изображении необходимо выделить интересующую область.

Для того чтобы наложить маску, необходимо нажать на значок  (Define Mask).

Затем ограничиваем маской только нужные нам поверхности, как показано на рисунке 8.

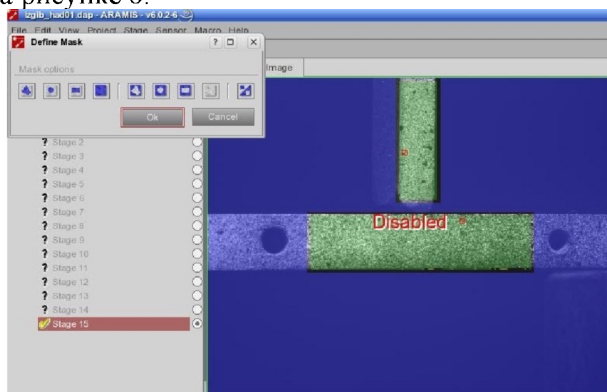


Рисунок 8 Наложение маски

## 7. определение стартовых точек

Стартовая точка определяет, откуда будет начат расчет. Если стартовая точка не определена, или определена с ошибками, необходимо изменить параметры, в частности изменить шаг и размер фасета. В нашем случае размер фасета 80 пикселей, а шаг фасета 5 пикселей.

Выбор размера фасета оказывает влияние не только на определение стартовой точки, но и на точность вычислений.

*(Смотри раздел описания «ARAMIS» фасеты)*

Для того чтобы задать стартовую точку в автоматическом режиме, необходимо нажать **Project Mode – Auto Start Point** (📍), а чтобы задать ее в ручном режиме: **Project Mode – Add Start Point** (📍).

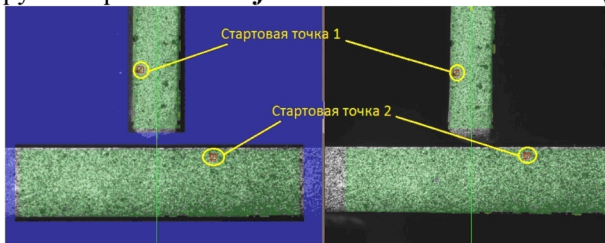


Рисунок 9 Положения стартовой точки на образце

Стартовая точка на правой камере должна соответствовать точке на левой камере, если это так, калибровка и съемка проведены правильно.

Если существует несколько масок, как в нашем случае, то необходимо задать столько стартовых точек, сколько у нас расчетных областей.

## 8. вычисление проекта

После того как задали параметры фасетов, наложили маску, и указали стартовую точку, можно начать расчет. Для этого необходимо нажать *Project Mode – Compute Project*.

## 9. задание свойств материала

Для того чтобы задать материал, нажимаем *Project – Select Material – Flow curve*, появится следующее окно.

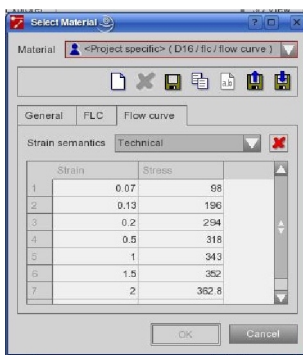


Рисунок 10 Задание материала

Заполняем эту таблицу, где strain – деформации, а stress – соответствующие напряжения. Для выполнения работы понадобится справочник ВИАМ.

## 10. выбор типа отображаемого результата

### преобразование проекта в определенную систему координат

Данное преобразование связано с трудностью установления камеры абсолютно перпендикулярно объекту. Поэтому целесообразно связать СК не с камерами, а с объектом. Иначе, мы будем наблюдать результаты, спроецированные на глобальную систему координат.

Система координат задается так: **Project – Transformation - 3-2-1 Transformation**.

Система координат задается по шести точкам, первые три определяют плоскость, четвертая и пятая задают направление оси, шестая точка определяет положение СК.

### 11. постобработка данных

Используется для подавления нежелательного шума измерений, интерполирования отсутствующих пространственных точек, подчеркивания местных эффектов.

В нашем случае, в связи с заданными параметрами фасетов, на краях и в центре появились нежелательные точки. Поэтому надо их удалить/скрыть. Нажмем **Results – Delete 3D points**. Затем, с помощью



инструментов выделения( ) выбираем точку или множество точек, которые хотим удалить. Нажимаем **Preview**, смотрим, что выделили, если нас все устраивает - нажимаем **Apply**.

На рисунке 11 приведено отображении деформаций по оси X. С плохими, не удаленными 3D точками - рис 11а, и удаленными 3D точками - 11б.

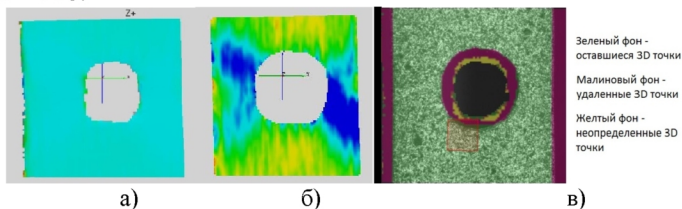


Рисунок 11 отображение деформаций

### 12. определение элементов анализа.

Для проведения анализа выбирается один или несколько кадров.

Для этого необходимо построить дополнительные сечения и вывести результаты для этих сечений. Построим 3 сечения, которые будут проходить по краям и центру отверстия.

Нажимаем **Sections – Create Section**, появиться окно, представленное на рисунке 12. Затем вводим необходимые нам параметры - **Create**



Рисунок 12 Окно параметров сечений

В окне (*Type*) можно задать, перпендикулярно какой оси будет располагаться сечение. Расстояние от этой оси до плоскости сечения задается в пункте (*Plane position*), количество сечений – в (*Number of sections*), расстояние между крайними сечениями - в (*Distance*).

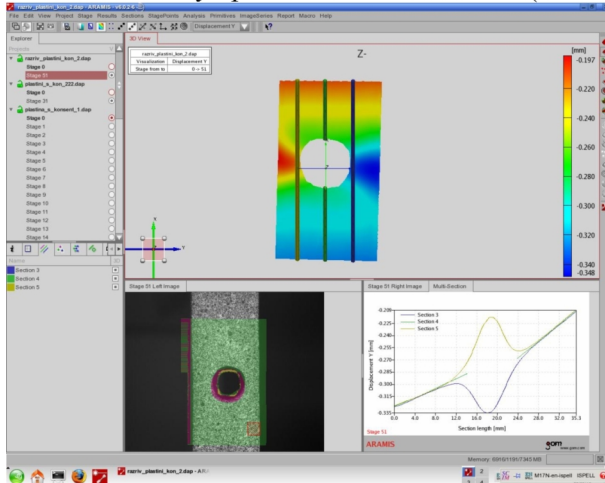










Рисунок13 Построение дополнительных сечений

### 13. документирование.

Документирование результатов включает в себя создание отчетов, экспорт данных и т.п.

«ARAMIS» позволяет различным способом просматривать результаты.

В раскрывающемся окне () выбираем пункт, который нас интересует. В данной работе выбираем напряжение (Sigma X). Затем в меню информации (       ) переходим во вкладку **Image Series** далее смотрим результаты:

Для точки – **Report Multi Stage Point** (рисунок 14а)

Для сечений – **Report Multi Section** (рисунок 14б)

В выведенных графиках ось абсцисс – наблюдаемый параметр, ось ординат - номер кадра (время).

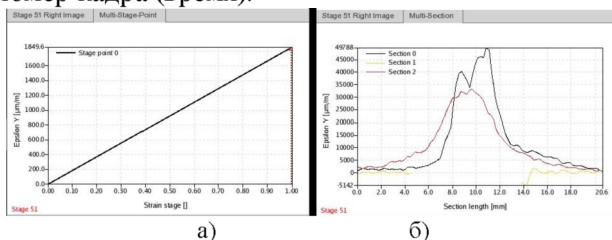


Рисунок 14 Выведение результатов

Каждый этап очень важен, и неправильное выполнение условий приводит, как правило, к неправильной интерпретации результатов.

### РАСЧЕТ В ANSYS Workbench

Построим конструкцию, которая изображена на рисунке 15 в КОМПАС-3D, а затем импортируем ее в Ansys Workbench (далее – Awb).

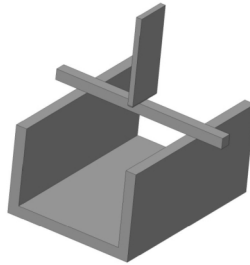


Рисунок 15 Объемное изображение конструкции

После того как мы импортировали «геометрию» в Ansys Workbench (рисунок 16), необходимо задать материалы и их свойства.

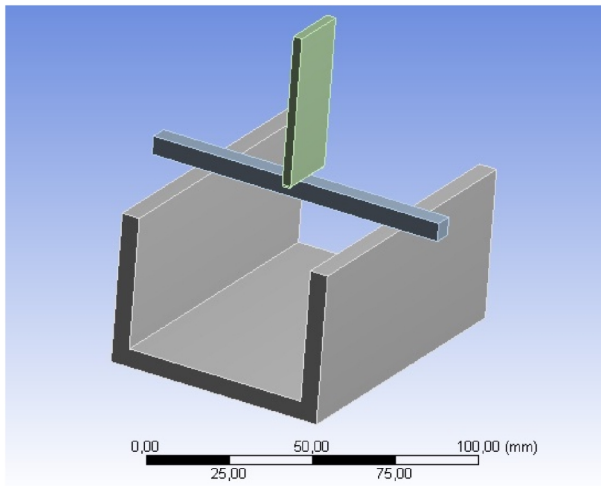


Рисунок 16 Импортированная геометрия

Основание и стержень давления выполнены из стали, прямоугольный брус, как было ранее сказано, выполнен из алюминия. Параметры этих материалов берем из справочника ВИАМ.

Стальные образцы будут работать в упругой зоне, и их напряженно-деформированное состояние нас интересовать не будет. Алюминиевый же стержень будет подвержен упругопластическим

деформациям. Для него диаграмма растяжения представлена на рисунке 17.

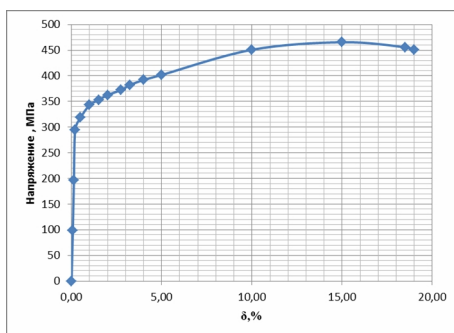


Рисунок 17 Диаграмма растяжения сплава Д16

В AWb материал задается в *Engineering Data*. Используя данные из справочника, вводятся все необходимые параметры, такие как модуль упругости, коэффициент Пуансона, плотность и др. Вводятся как линейные свойства материала (в меню *Linear Elastic - Isotropic Elasticity*), так и пластичные (в меню *Plasticity - Bilinear Isotropic Hardening*). Пример представлен на рисунке 18.

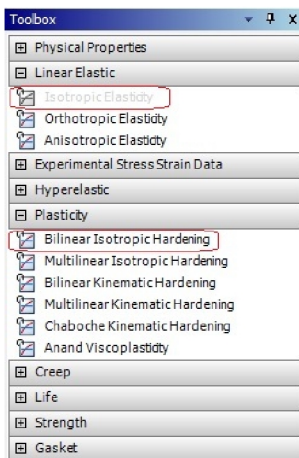


Рисунок 18 свойств материала

Properties of Outline Row 4: Structural Steel			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulu...	
8	Young's Modulus	2E+13	Pa
9	Poisson's Ratio	0,3	
10	Bulk Modulus	1,6667E+13	Pa
11	Shear Modulus	7,6923E+12	Pa
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular	
16	Strain-Life Parameters		
24	Tensile Yield Strength	7,9E+08	Pa

Рисунок 19 Линейные свойства материала

На рисунке 19 представлено окно, в котором задаются линейные свойства материала. Аналогичное окно появляется и при задании нелинейных свойств.

В данной лабораторной работе представлено так задание контактной задачи. В местах, где балка соприкасается с уголком, контакт будет раскрывающимся, с трением (Frictionless); в месте, где стержень давит на балку, контакт будет связанный (bonded). В AWb контакты определяются автоматически, если они были указаны при сборке в CAD системе, как показано на рисунке 20.

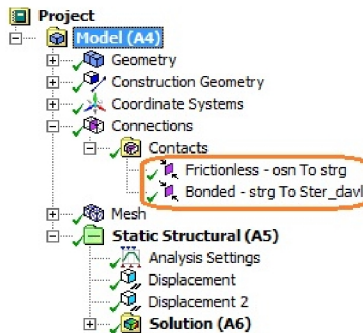


Рисунок 20 используемые типы контактов

## Создание пути

Путь будем создавать по двум точкам, как показано на рисунке 21.

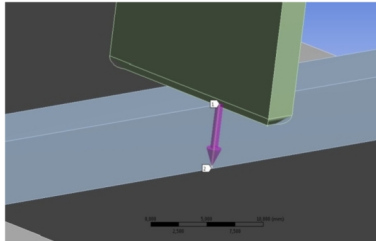


Рисунок 21 Путь от точки 1 к точке 2

В таблицу будем вводить координаты точек, указанных на рисунке 22.

Details of "Path"	
Definition	
Path Type	Two Points
Path Coordinate System	Global Coordinate System
Number of Sampling Points	47
Suppressed	No
Start	
Coordinate System	Global Coordinate System
Start X Coordinate	0, mm
Start Y Coordinate	7, mm
Start Z Coordinate	-55,08 mm
Location	Click to Change
End	
Coordinate System	Global Coordinate System
End X Coordinate	0, mm
End Y Coordinate	7, mm
End Z Coordinate	-49,08 mm
Location	Click to Change

Рисунок 22 Задание координат точек

Разбиваем модель сеткой. Нажимаем **Mesh - Generate Mesh**, и запускаем расчет **Solver**.

Нажимаем ПКМ на меню **Solution** и выбираем, необходимые результаты для просмотра. Нас будут интересовать **Stress Intensity**(интенсивность напряжений) по сечению. Смотри рисунок 23.

Scope	
Scoping Method	Path
Path	Path
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Stress Intensity
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	15,689 MPa
<input type="checkbox"/> Maximum	331,51 MPa
Minimum Occurs On	strg
Maximum Occurs On	strg
Graph Controls	
<input checked="" type="checkbox"/> Minimum Value Over Time	
<input checked="" type="checkbox"/> Maximum Value Over Time	
<input checked="" type="checkbox"/> Information	

Рисунок 23 Интенсивность напряжений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ARAMIS

Результаты будем смотреть там, где стальной стержень касается нашей балки.

Поэтому по ранее построенному графику выводим напряжения (Yield Stress). Смотри рисунок 24.

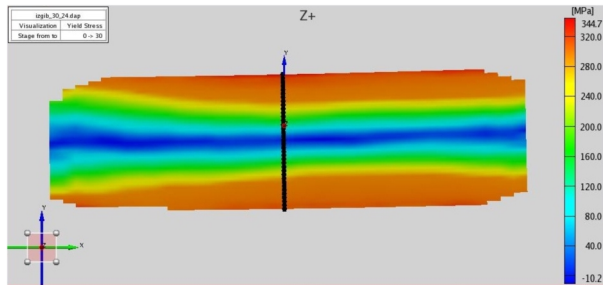


Рисунок 24 Yield Stress

Строим график напряжений по сечению, как показано на рисунке 25.

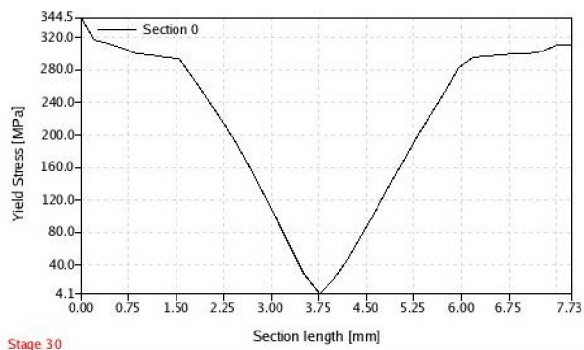


Рисунок 25 Результаты Yield Stress по сечению

## РЕЗУЛЬТАТЫ ANSYS

Результаты будем смотреть там, где стальной стержень касается нашей балки.

Поэтому по ранее построенному графику выводим напряжения (Intensity Stress).

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отчет по лабораторной работе включает в себя расчетную схему с указанием всех необходимых величин; отчеты из ARAMIS и ANSYS; сравнение расчетных и экспериментальных значений напряжений и деформаций в опасном сечении; анализ полученных результатов.

По данным результатам необходимо рассчитать погрешность для каждого из методов.

## Лабораторная работа №3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ДИСКА

Цель работы: знакомство с теоретическими и экспериментальными методами исследования колебаний дисков.

Диски роторов являются одними из наиболее напряженных элементов конструкций. Разрушение дисков часто ведет к катастрофическим последствиям.

Одной из причин, вызывающей разрушение дисков, могут быть их колебания.

В большинстве случаев полотно дисков допустимо рассматривать как круглую пластину.

Из общей теории колебаний линейно-упругих тел известно, что свободные колебания на любой из собственных форм совершаются во времени по гармоническому закону.

$$\vartheta(\vec{a}, t) = w(\vec{a},) \cos(w_0 t + \gamma)$$

где  $v(a, t)$  смещение точек тела,

$w(a)$  - амплитуда смещений точек тела,

$\vec{a}$  - вектор, определяющий координаты точек тела,

$w_0$  - собственная угловая частота,

$\gamma$  начальная фаза.

Дифференциальное уравнение свободных колебаний круглой пластины постоянной толщины (рис. 1) имеет вид

$$\Delta^2 \Delta^2 \omega - k^4 \omega = 0$$
$$\Delta = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2}$$

Где  $\Delta$  - дифференциальный оператор (оператор Лапласа) для полярных координат  $\omega = \omega(r, \varphi)$  - амплитуда прогибов

$$k^4 = \frac{\rho \cdot \delta \cdot R^4 \cdot \omega_0^2}{D}$$

$\rho$  - массовая плотность материала

$\delta$  - толщина диска

$R$  - наружный радиус диска

$D = \frac{E \cdot \delta^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}$  - цилиндрическая жесткость

$\mu$  - коэффициент Пуассона

$E$  - модуль упругости первого рода.

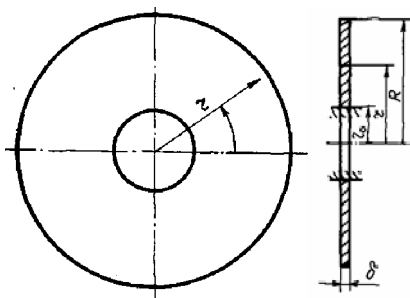


Рисунок 1 Расчетная схема диска

Для круглой пластины постоянной толщины общее решение имеет вид

$$\omega(r, \varphi) = \omega_m(r) \cos m\varphi$$

Где  $\omega_m(r) = A \cdot I_m(kr) + B \cdot Y_m(kr) + C \cdot I_m(ikr) + D \cdot Y_m(ikr)$ ,

$I_m(kr), I_m(ikr)$  - функции Бесселя первого рода. действительного и мнимого аргументов ( $i = \sqrt{-1}$ ).

$Y_m(kr), Y_m(ikr)$  - функции Бесселя второго рода действительного и мнимого аргументов,  $m = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$

$A, B, C, D$  - константы, которые определяются из конкретных граничных условий.

Для функций Бесселя, подобно тому, как это сделано для тригонометрических функций, составлены специальные таблицы. В данной работе рассматривается задача для диска, который на внутреннем радиусе  $r_0$  зашпечлен, а на наружном радиусе  $R$  свободен. Для этого случая граничные условия будут следующими:

при  $r = r_0$   $\omega(r_0) = 0$  - прогиб

$$\frac{\partial \omega}{\partial r} = 0 \text{ - угол поворота}$$

При  $r = R$   $M(R) = 0$  - погонный момент,  $Q(R) = 0$  - обобщенная погонная перерезывающая сила.

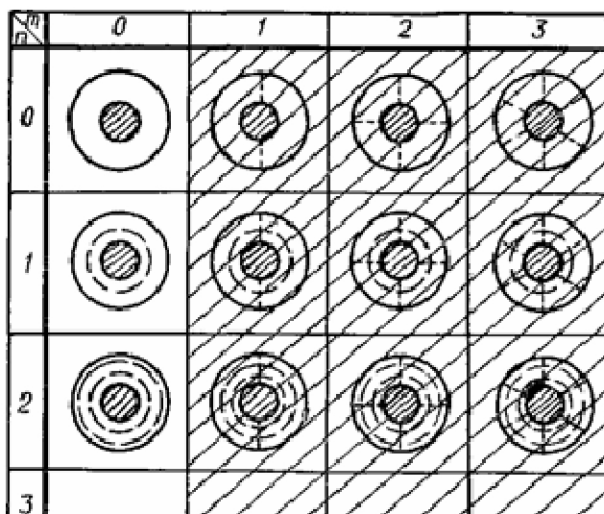


Рисунок 2. Формы колебаний диска

Используя эти граничные условия с помощью уравнения для каждого из значений  $m$ , можно получить систему четырех однородных уравнений первого порядка относительно констант  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ . Эта система позволяет исключить три из четырех констант и тем самым определить формы колебаний. Приравняв к нулю определитель этой системы, можно получить уравнение для определения  $k$ , что дает возможность найти собственные угловые частоты

$$\omega_0 = \left(\frac{k}{R}\right)^2 \sqrt{\frac{D}{\delta\rho}}$$

Как отмечалось выше, величина  $m$  может принимать целые значения от 0 до  $\infty$ . Нетрудно видеть, что значение  $m$  соответствует числу волн деформаций, укладываемых по окружности диска.

Таким образом, степень собственных движений круглых пластин включает в себя бесчисленное множество собственных форм, имеющих различное число волн деформаций, укладываемых по окружности диска. Кроме того, каждому из значений  $m$  соответствует бесчисленное множество собственных форм, имеющих различное

число узловых окружностей. Спектр собственных форм (узловых линий) круглой пластины представлен на рис. 2; таблица, изображенная на ней, может быть продолжена вправо и вниз до сколь угодно больших целых значений  $t$  и  $p$ . Как видно,  $p$  соответствует числу узловых окружностей, а  $m$  - числу узловых диаметров. Таким образом, любая из форм собственных колебаний диска может быть выделена двумя целыми числами  $m$  и  $p$ . Каждой из этих собственных форм соответствует определенная собственная частота.

Тогда, вместо предыдущего выражения запишем:

$$\omega_{0mn} = \left(\frac{k_{mn}}{R}\right)^2 \sqrt{\frac{D}{\delta\rho}}$$

Значения  $k_{mn}$  для различных  $\alpha = \frac{r_0}{R}$  вычислены и приведены на рис. 3

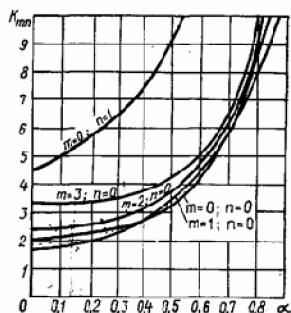


Рисунок 3 Зависимость  $K_{mn}$  от  $\alpha$

Для других условий закрепления круглой пластины спектр собственных форм будет выглядеть аналогично представленному на рис. 2. Собственная частота может быть вычислена по формуле, в которую, значение  $K_{mn}$  должно подставляться в соответствии с заданными граничными условиями.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема установки показана на рис. 4. Испытуемый диск 2, заземленный на внутреннем радиусе и свободный на наружном, установлен на массивной подставке 5 и возбуждается электромагнитом 4, заземленным на платформе 1, которая может поворачиваться относительно диска. Питание электромагнита переменным током производится от звукового генератора через усилитель. Относительная деформация и частота колебаний диска измеряются с помощью пьезоэлектрического датчика 3.

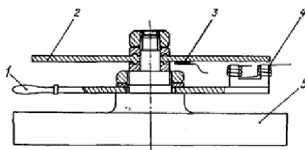


Рисунок 4. Схема экспериментальной установки

1 – платформы, 2 – испытуемый диск, 3 датчик, 4 – электромагнит, 5 – массивная подставка

На вертикальную развертку катодного осциллографа подается сигнал с датчика 3, а на горизонтальную - от звукового генератора блока возбуждения.

Изменяя плавно частоту тока, питающего электромагнит, можно добиться такого момента, когда одна из собственных частот диска совпадет с частотой возбуждения, т. е. наступит явление резонанса. Явление резонанса характеризуется резким увеличением амплитуды колебания диска и фиксируется с помощью пьезодатчика по величине наибольшего отклонения луча на экране катодного осциллографа в вертикальном направлении.

Получив фигуру Лиссажу в виде эллипса или наклонной прямой, убеждаемся, что частота возбуждения совпадает с собственной.

Определение формы колебаний (рисунка узловых линий) производится при помощи песчаных фигур.

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Познакомиться с теорией вопроса.
2. Произвести расчет собственных частот экспериментального диска для  $n=0$  при  $m=0, 1, 2, 3, 4$  и построить график зависимости  $\omega_0 = \omega_0(m)$ .
3. Изучить установку и методику проведения эксперимента.
4. Провести эксперимент по определению форм и частот собственных колебаний диска для условий по пункту 2. Формы узловых линий зарисовать, а частоты занести в протокол и отложить на графике  $\omega_0 - \omega_0(m)$

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ В ARAMIS

### **определение измеряемого объема и подготовка экземпляра.**

Нас будут интересовать участок диска в окрестности нейтральной линии, нас будут интересовать только перемещения, поэтому будем использовать калибровочный объем 120x96 мм чтобы заснять максимальную площадь полотна.

### **1. Подготовка экземпляра.**

Как было сказано в описании к системе «ARAMIS» поверхность измеряемого объекта должна быть контрастной. Напыляем на объект белую матовую краску тонким слоем и даем ей высохнуть. Затем напыляем второй слой черной краской, в виде мелких точек.

Для получения контрастной структуры напыление необходимо производить на значительном расстоянии аэрозольного баллона от диска. Напыленный диск представлен на рисунке 5.



Рисунок 5. Диск с напылением

## 2. калибровка камер под измеряемый объем.

После установки камер и приборов освещения производятся все необходимые действия, указанные в описании к «ARAMIS»

## 3. создание нового проекта

Создается новый проект. *File-New Project*

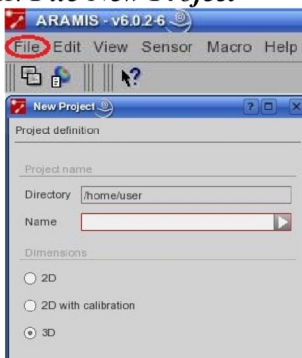


Рисунок 6. Создание нового проекта

Указываем название проекта в пункте *Name*, а директорию где он будет храниться, оставляем по умолчанию. Так же это меню позволяет выбрать тип проекта 3D/2D

## 4. регулировка типа записи изображений

Зайдем в меню записей:

**Панель инструментов – Start/Stop Measurement Mode** (  ).

Далее необходимо будет выбрать тип сенсора, для нашей задачи рекомендуемым считается *3D HS Aramis*.

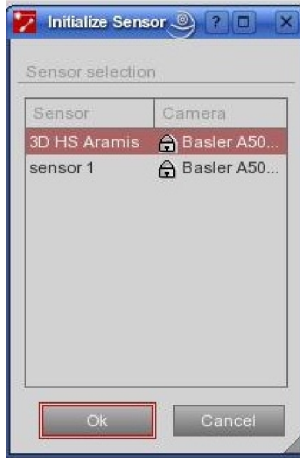


Рисунок 7 Тип сенсора

Требуется записать высокоскоростной процесс, поэтому выбираем тип записи *Fast Measurement*, но возможны и другие варианты, которые будут применены в других лабораторных работах.



Рисунок 8. Параметры съемки Fast Measurement

Расчетным методом было получено, что форма  $0 \times 3$  возникает на частоте около 400 Гц поэтому нам понадобится минимальная выдержка, и высокая освещенность.

Выдержка задается таким образом, чтобы объект в свете выглядел контрастно, и на нем не возникало переосвещенных участков

Перед тем как проводить нагружение образца производится «тестовая съемка». Объект закрепляется, делается один кадр, задается автоматическая стартовая точка, производится расчет со стандартными параметрами. (*Start/Stop Measurement Mode-Auto Start Point – Compute Project*)

Изображение считается непригодным, если существуют бледно-жёлтые включения, в этих местах параметры фасетов не определены, и считаться не будут ( рисунок 9).

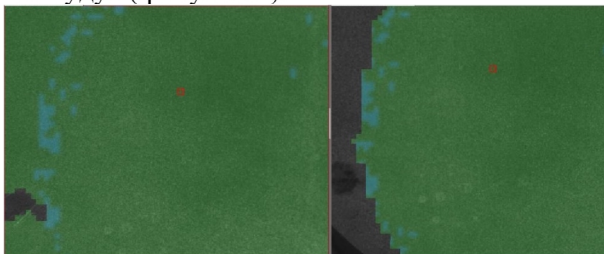



Рисунок 9 Изображение плохих 3D точек

## 5. определение маски вычисления в измеряемых кадрах

Проводится для уменьшения объема (соответственно времени) вычислений. На полученном изображении необходимо выделить интересующую для последующих расчетов область.

Чтоб наложить маску необходимо нажать на значок  (Define Mask).

Поэтому ограничиваем маской только нужные нам поверхности, как показано на рисунке 10.

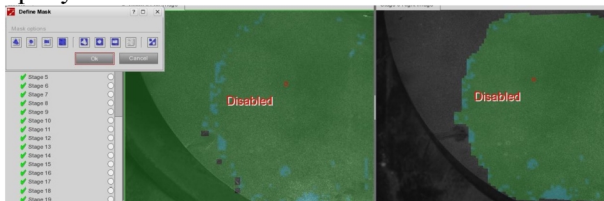


Рисунок 10 Наложение маски

## 6. определение стартовых точек

Стартовая точка определяет, откуда будет начат расчет. Если стартовая точка не определена, или определена с ошибками, необходимо изменить параметры, в частности изменить шаг и размер фасета. В нашем случае размер фасета 40 пикселей, а шаг фасета 5 пикселей.


Выбор размера фасета оказывает влияние не только на определение стартовой точки, но и на точность вычислений.

(Смотри раздел описания «ARAMIS» фасеты)

Чтоб задать стартовую точку, необходимо нажать **Project Mode – Auto**

**Start Point** ()

или задание стартовой точки в ручном режиме:

**Project Mode – Add Start Point** ()

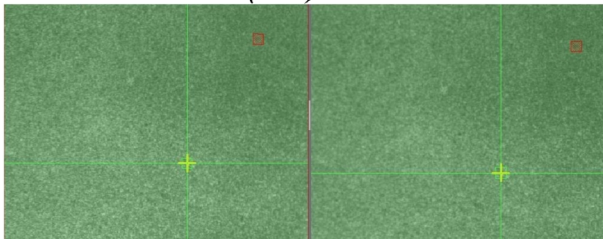


Рисунок 11 Положения стартовой точки на образце

Стартовая точка на правой камере должна соответствовать точке на левой камере, если это так, то калибровка и съемка проведены правильно

## 7. вычисление проекта

После того как задали параметры фасетов, наложили маску, и указали стартовую точку, можно будет начать расчет.

**Project Mode – Compute Project** ( )

## 8. выбор типа отображаемого результата

**преобразование проекта в определенную систему координат.**

Данная процедура связана с тем, что при опыте выставить камеры, абсолютно перпендикулярно объекту очень трудоемко, поэтому целесообразно связать СК не с камерами, а с объектом, если мы этого

не сделаем мы будем наблюдать результаты, спроецированные на глобальную систему координат.

Система координат задается так:

### **Project – Transformation - 3-2-1 Transformation**

Система координат задается по шести точкам, первые три точки определяют плоскость, пятая и шестая задают направление ось, шестая точка определяет положение СК.

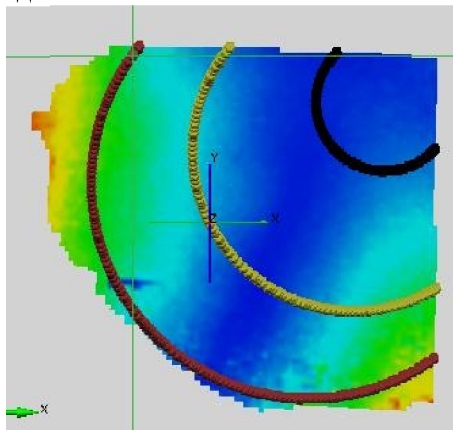


Рисунок 12. Трансформированная система координат в привязке к диску.

**9. постобработка данных.** Используется для подавления нежелательного шума измерений, интерполирования отсутствующих пространственных точек, подчеркивания местные эффекты.

В нашем случае в связи с заданными параметрами фасетов на краях и в центре появились не желательные точки. Поэтому надо их удалить/скрыть. Нажмем **Results – Delete 3D points**. Затем, с помощью



инструментов выделения( ) выбираем точку или множество точек которые хотим удалить, *Preview*,смотрим что выделили, если нас все устраивает, нажимаем *Apply*.

На рисунке 13 приведено отображении деформаций по оси X с плоскими, не удаленными 3D точками рис 13а, и удаленными 3D точками 13б.

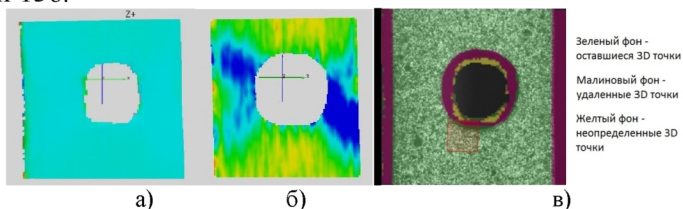


Рисунок 13 отображение деформаций

**10. определение элементов анализа**, один или несколько кадров указываются для анализа.

Для анализа можно построить дополнительные сечения и выводить результаты для этих сечений. Построим 3 сечения, которые будут проходить по краям и центру отверстия.

Нажимаем **Sections – Create Culcular Section**, появиться окно, представленное на рисунке 14, вводим необходимые нам параметры - **Create**

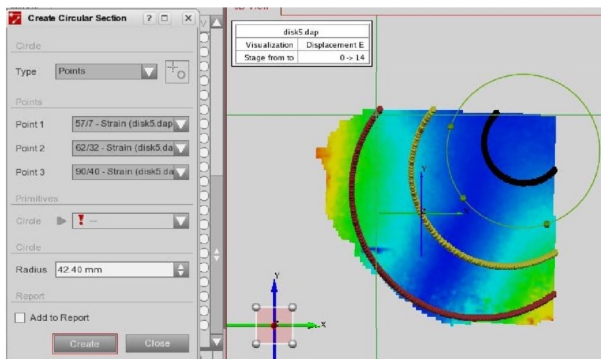










Рисунок 14 Окно параметров сечений

В этом окне необходимо указать 3 точки по которым будет построено окружное сечение

**документирование** результатов (создание отчетов , экспорт данных).

«ARAMIS» позволяет различным способом просматривать результаты.

В раскрывающемся окне (**Epsilon X**) выбираем пункт, который нас интересует, в данной работе нас интересуют перемещения (Displacement Z)

Затем в меню информации (         ) переходим во вкладку **Image Series** далее смотрим результаты:

Для точки – **Report Multi Stage Point** (рисунок 15 а)

Для сечений – **Report Multi Section** (рисунок 15 б)

В выведенных графиках ось абсцисс – наблюдаемый параметр, ось ординат номер кадра (время)

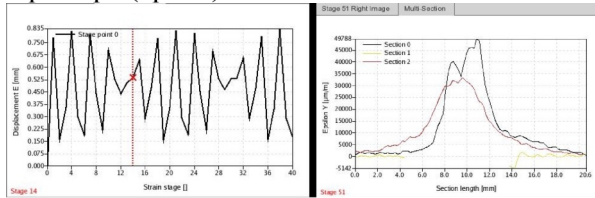


Рисунок 15 Выведение результатов

Каждый этап очень важен, и неправильное выполнение условий приводит, как правило, к неправильной интерпретации результатов.

## РАСЧЕТ В ANSYS Wb

Построим данную конструкцию в KOMPAS-3D, а затем импортируем ее в Ansys Workbench.

Объемное изображение конструкции представлено на рисунке 16.

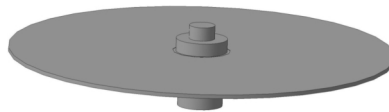


Рисунок 16 Объемное изображение конструкции

После того, как мы импортировали геометрию в Ansys Wb (рисунок 17), необходимо задать материалы и их свойства.

Выбираем модальный расчет (*Modal*). Затем заходим в меню проекта и выбираем меню геометрии (*Geometry*).

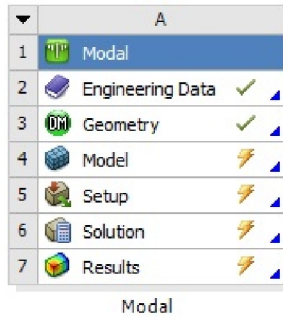


Рисунок 17 Меню проекта

Нажимаем *File – Import External Geometry File* (рисунок 18) и выбираем созданный ранее файл, и нажимаем *Generate*. Затем возвращаемся в меню проекта.

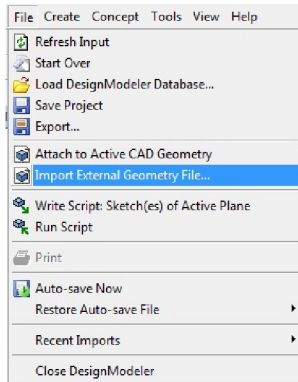


Рисунок 18 Меню File в меню Geometry

Выбираем раздел *Model* в меню проекта, появляется окно, представленное на рисунке 19.

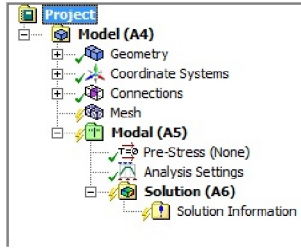


Рисунок 19 Дерево проекта

Пункты, которые отмечены зелеными галочками, готовы к расчету, а те, что отмечены молниями, не определены, либо определены не полностью.

Разобьём нашу модель на КЭ. Нажимаем ПКМ *Mesh – Insert – Sizing* (рисунок 19). После этого в дереве проекта появится раздел *Body Sizing* (рисунок 20). В этом меню выбираем интересующие нас тела и задаем необходимый размер элемента.

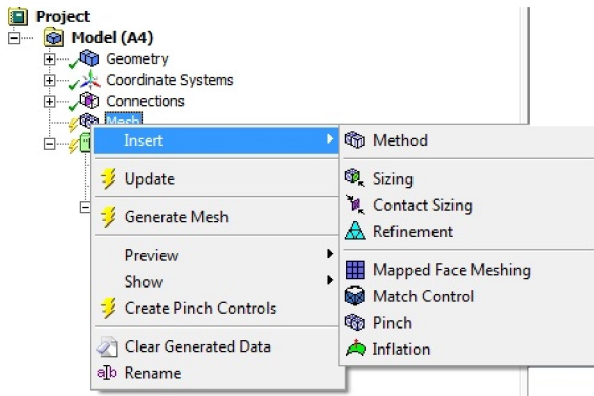


Рисунок 20 меню Mesh

[-] <b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Bodies
[-] <b>Definition</b>	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	5, mm
Behavior	Soft

Рисунок 21 Меню Body Size

Закрепим нашу модель, нажимаем ПКМ *Modal – Insert – Displacement*.

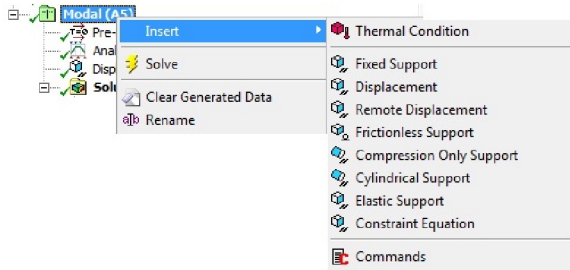


Рисунок 22 Меню Modal

Далее заходим в меню *Analysis Settings* (рисунок 23).

[-] <b>Options</b>	
Max Modes to Find	10
Limit Search to Range	Yes
Range Minimum	0, Hz
Range Maximum	1000, Hz
[-] <b>Solver Controls</b>	
Solver Type	Program Controlled
[-] <b>Output Controls</b>	
[-] <b>Analysis Data Management</b>	

Рисунок 23 Меню Analysis Settings

В данном меню вводим число первых форм(Max Models to Find), которое будем рассчитывать, и диапазон частот (Range Minimum, Range Maximum), в которых будем их искать

Зафиксируем нашу деталь, нажав на **Displacement**. появится следующее окно, как показано на рисунке 24.

[-] <b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] <b>Definition</b>	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0, mm
<input type="checkbox"/> Y Component	0, mm
<input type="checkbox"/> Z Component	0, mm
Suppressed	No

Рисунок 24 Меню Displacement

В этом меню выбираем поверхность закрепления, и запрещаем её перемещения по всем осям.

После всех выше выполненных операций в дереве проекта не должно остаться пунктов со знаком молнии. Если это условие выполняется, нажимаем расчет **Solve**.

Для просмотра результатов ПКМ нажимаем **Solution – Insert – Deformation – Total**.

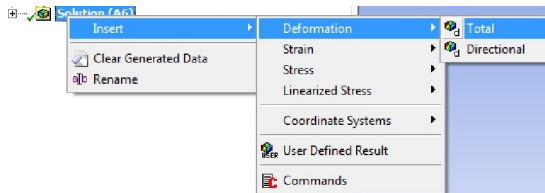


Рисунок 25 Меню Solution

Затем в дереве выбираем Total Deformation (рисунок 26). Смотрим номер формы (Mode) и частоту(Reported Frequency), на которой эта форма возникает. Так же справа будет, отображается таблица всех частот, и гистограмма зависимости частоты от формы рисунок 27.

[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
[-] Definition	
Type	Total Deformation
Mode	1,
Identifier	
[-] Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	0, mm
<input type="checkbox"/> Maximum	54,38 mm
Minimum Occurs On	основание
Maximum Occurs On	Диск
[-] Information	
<input type="checkbox"/> Reported Frequ...	120,34 Hz

Рисунок 26 Меню Total Deformation



Рисунок 27. Таблица всех частот, и гистограмма зависимости частоты от формы

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отчет о выполненной работе должен содержать:

краткое описание работы;

схему экспериментальной установки;

протокол расчетного и экспериментального определения собственных частот диска;

график теоретической зависимости  $\omega_0 - \omega_0(m)$  ( $n=0$ ) с нанесенными экспериментальными точками; рисунки форм узловых линий; рисунки форм расслоенного спектра и их частот; анализ полученных результатов.

## Протокол к работе. «Колебания диска»

Таблица 1 Собственные частоты диска

	n=0				
1	m				
2	$K_{mn}$				
3	Вычисляемая частота $f_0$ , Гц ANSYS				
4	Вычисляемая частота $f_0$ , Гц ARAMIS				
5	Замеряемая частота $f_0$ , Гц				