

УДК 620.178.4/6

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «ARAMIS» В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ

© 2011 Д. С. Лёжин, Ф. В. Паровай, А. В. Собоуль

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Представлены результаты тестирования и опыт использования фотограмметрического принципа измерения деформаций, реализованного в бесконтактном измерительном комплексе «ARAMIS» для решения различных измерительных и исследовательских задач.

Измерение деформаций, бесконтактный метод, измерительный комплекс «ARAMIS».

В настоящее время существует множество методов определения деформаций. Основными из них являются: тензометрия, интерферометрический метод, рентгеноструктурный анализ, оптический метод. В основе работы данной системы лежит фотограмметрический принцип измерения деформаций. Он основан на анализе изменения изображения исследуемого объекта в процессе испытания.

Основные элементы и возможности системы «ARAMIS»

Система состоит из следующих компонентов:

- штатив с двумя камерами (только для 3D установки);
- система подсветки на штативе;
- триггер для электропитания камер и временного управления записью изображения;
- высокоэффективный PC;
- прикладное программное обеспечение ARAMIS v6 и GOM Linux 7 или выше;
- набор калибровочных элементов.

Особенностью 3D системы является то, что камеры располагаются на штативе под определенным углом относительно друг друга. Проводится одновременная съемка исследуемого объекта с разных углов зрения, последующая обработка изображения позволяет идентифицировать форму объекта как семейство точек. На рис. 1 представлены снимаемые поверхности.

Система дает возможность проводить следующие типы экспериментов:

- испытание материалов;
- оценка прочности;

- определение размеров компонентов;
- изучение нелинейных свойств;
- характеристики явления ползучести и процесса старения;
- проверка конечно-элементных моделей;
- определение характеристик материалов;
- анализ поведения однородных и неоднородных материалов при деформировании.

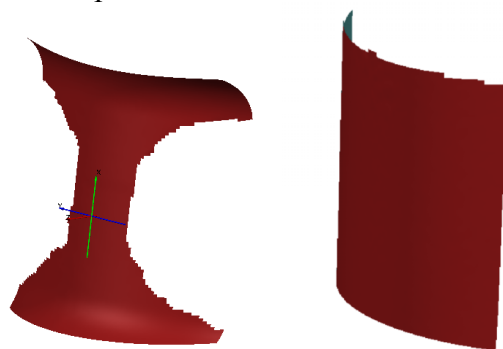


Рис. 1. Пространственные поверхности, снятые в системе «ARAMIS»

Методика проведения эксперимента представлена на рис. 2.

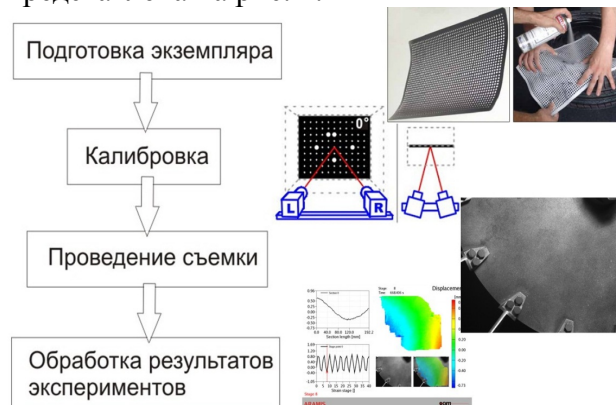


Рис. 2. Методика проведения эксперимента

Система «ARAMIS», приобретенная СГАУ, относится к классу систем HS (HighSpeed - высокоскоростная). Это позволяет проводить съемку с частотой 500 кадров/с при полной разрешающей способности (1280×1024 пикс.), кроме того, есть возможность увеличения скорости съемки за счет использования половинной, четвертной и т.д. матриц.

Программное обеспечение позволяет интегрировать отснятые поверхности в другие программы.

Следует отметить функциональные возможности представления результатов системы «ARAMIS». Программное обеспечение имеет мощный генератор отчетов, что позволяет смотреть перемещения тела по любой из осей, эквивалентные перемещения, кроме того, можно наблюдать перемещения любой выбранной точки или перемещения по сечению или сечениям.

Для исследования возможностей установки и верификации полученных результатов были проведены тестовые эксперименты по следующим направлениям:

- определение перемещений;
- временные характеристики;
- определение деформаций.

ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Исследование перемещений точек объекта позволяет интегрально оценить характеристики системы «ARAMIS». Это связано с тем, что при исследовании перемещений на качество результата влияют все элементы системы «ARAMIS – объект»:

Оптика. Под оптикой будем понимать собственно качество используемых объективов и, как следствие – качество получаемых в процессе эксперимента изображений.

Подготовка поверхности объекта. Под подготовкой поверхности понимается нанесение на нее контрастной структуры. К подготовке поверхности нужно относиться с особой тщательностью, так как от нее напрямую будет зависеть распознаваемость поверхности.

Форма поверхности. Как было сказано ранее, система 3D дает возможность получения пространственного изображения исследуемого объекта, качество распознавания

формы объекта оказывает влияние на последующее вычисление перемещений.

Калибровка системы. Под калибровкой понимается настройка системы на определенный измеряемый объем (рис. 3), при этом следует иметь в виду, что размеры исследуемого объема прямо определяют дискретность измеряемых перемещений.

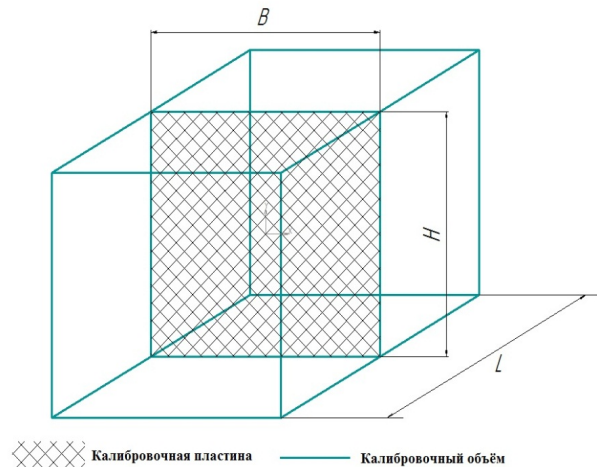


Рис. 3. Калибровочный объём:
 B – ширина пластины, H – высота пластины,
 L – глубина резкости

Каждому исследуемому объекту необходимо четко выбирать калибровочную пластину, соответствующую минимальной величине измерений.

Алгоритмы обработки. Величина перемещений является рассчитываемым параметром.

В ходе тестирования были сравнены перемещения, полученные системой «ARAMIS», с результатами, получаемыми на разрывной машине, которая внесена в Государственный реестр средств измерения.

Были проведены эксперименты, в которых было установлено, что система способна уловить перемещения с дискретностью 1 мкм. При этом большое влияние оказывают внешние условия эксперимента, что дает посторонний шум. Это особенно заметно при малых величинах измеряемых перемещений (рис. 4).

При перемещениях свыше 20-30 мкм и выше величина влияния шума снижается, поэтому на графиках он становится не заметен (рис. 5).

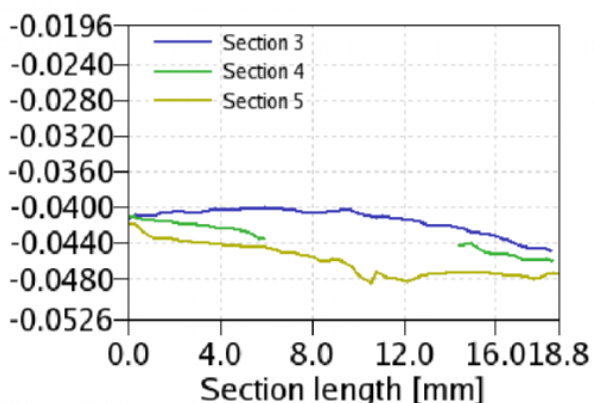
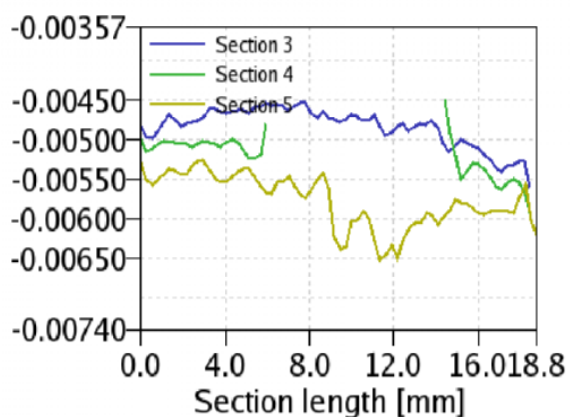


Рис. 4. Перемещения по сечениям

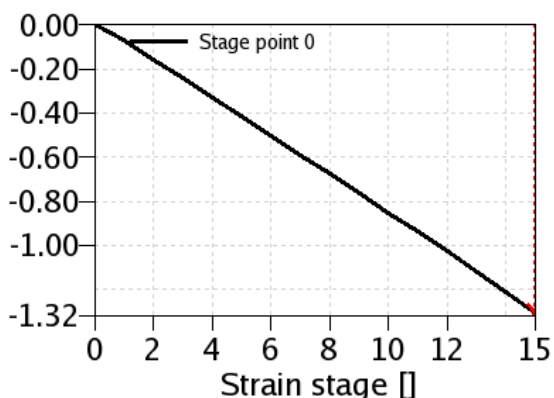
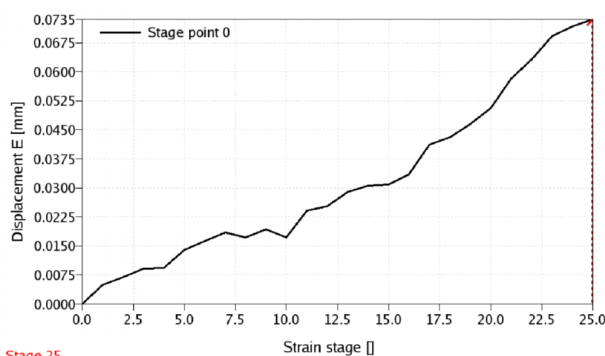


Рис. 5. Перемещение точки

Был проведен ряд экспериментов на исследование перемещений. В наиболее простом случае исследовалось перемещение объекта, жестко закрепленного в подвижной траверсе разрывной машины. Результаты обработки в системе «ARAMIS» сравнивались со значениями перемещений, задаваемых на разрывной машине.

Величина эквивалентных перемещений в ARAMIS сравнима с перемещениями на машине. Стоит отметить, что эксперимент проводился в неподготовленных условиях, разрывная машина и установка стоят на обычном полу, что вносит некоторые кор-

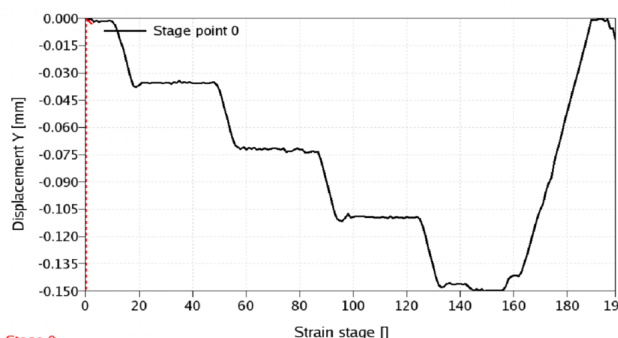
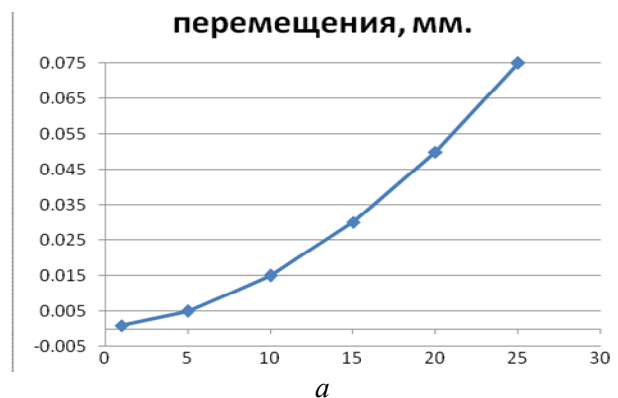
рективы (рис. 6). Некоторые точки на графике из-за этого выпадают.



Stage 25
ARAMIS gom www.gom.com

Рис. 6. Эквивалентные перемещения в ARAMIS

Подтверждением корректности полученных результатов является достоверное воспроизведение ступенчатого перемещения объекта, проведенное по заданной программе на разрывной машине. Результаты эксперимента показаны на рис. 7. Здесь приведена зависимость перемещений вдоль исследуемой оси (по шкале ординат) по записанным кадрам (шкала абсцисс). Как видно из рисунка, распределение четкое, точно такое же распределение перемещений было получено на разрывной машине.



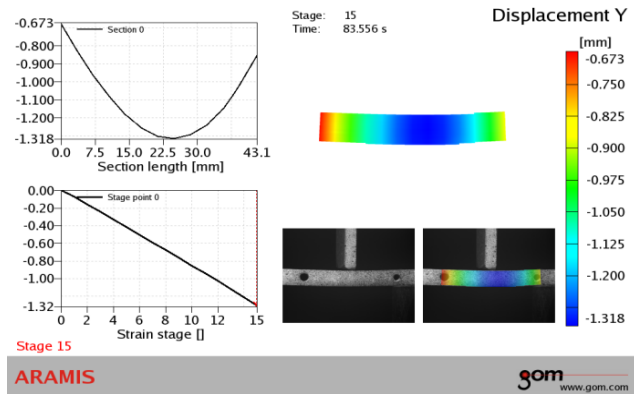
Stage 0
ARAMIS gom www.gom.com

б

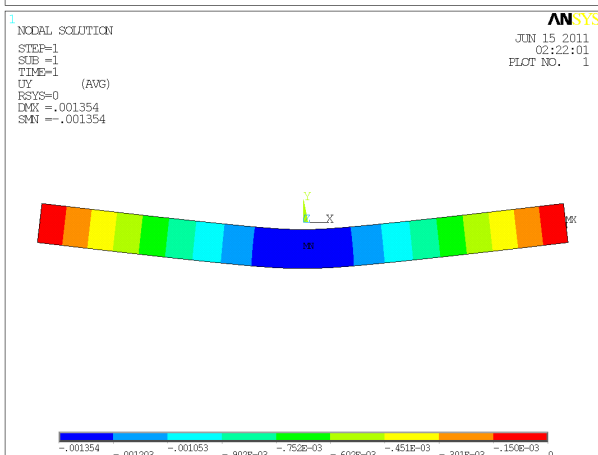
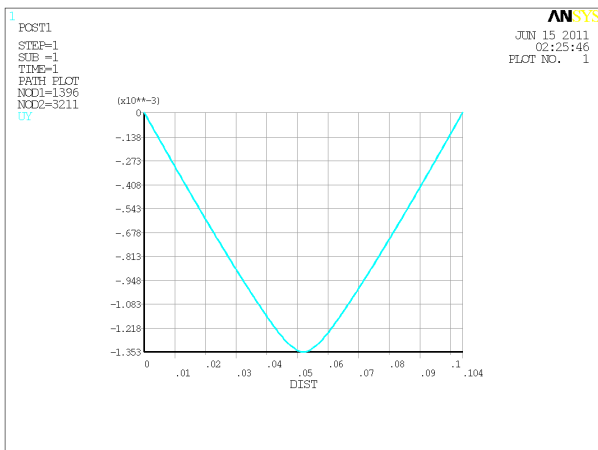
Рис. 7. Эквивалентные перемещения на разрывной машине (а) и по датчикам ARAMIS (б)

Исследование перемещений проводилось при разных видах нагружения. В одном из экспериментов исследовались перемещения при изгибе детали.

Результаты этого эксперимента представлены на рис. 8.



а



б

Рис. 8. Перемещения стержня вдоль оси Y:
а – ARAMIS, б – ANSYS

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов данного эксперимента сведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение результатов эксперимента

Величина	ARAMIS	ANSYS	Погрешность
Перемещения по Y	1,318 мм	1,353 мм	2,6%

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Триггер обеспечивает гибкий старт записи кадров для измерительной системы, при этом возможно создавать достаточно сложные алгоритмы записи, управлять записью по аналоговому и цифровому каналам, синхронизировать запись с каким-либо процессом.

Четкое обеспечение временных характеристик дает таймер триггера. Наиболее простые варианты записи следующие:

- задаются количество кадров и время выдержки;
- покадровая съемка, при этом триггер позволяет запрограммировать время съёмки.

Для проверки временных характеристик записи, обеспечиваемых системой «ARAMIS», был проведен ряд динамических экспериментов. Проверка временных характеристик проводилась с использованием стробоскопа.

Основными экспериментами данного сегмента являются динамические исследования колебаний тел типа «диск» и «линейка».

Задачей динамических экспериментов является нахождение частоты и амплитуды колебаний исследуемой конструкции. Стоит отметить, что система «ARAMIS» может регистрировать процесс с частотой до 2000 кадров в секунду (но при этом будет снижаться разрешение по вертикали, а это, в свою очередь, требует увязки с характерными размерами исследуемого объекта). Кроме того, как показал опыт, при частотах съемки выше 2000 кадров в секунду время экспозиции каждого кадра становится настолько малым, что для четкого последующего распознавания структуры поверхности требуется принципиально другая система освещения. В соответствии с этим для динамических экспериментов были выбраны объекты с невысокими первыми собственными частотами. Эксперименты проводились при нормальном разрешении камер и средней освещенности.

Суть эксперимента заключалась в том, чтобы исследовать низшие собственные частоты объектов с измерением амплитудных и временных характеристик. Это давало возможность, с одной стороны, получить расчетное подтверждение результатов, с другой стороны, исследование собственных частот проводится поиском резонансных режимов, что, в свою очередь, обеспечивает благоприятные для записи амплитудные характеристики. На режиме резонанса была произведена съемка исследуемых объектов.

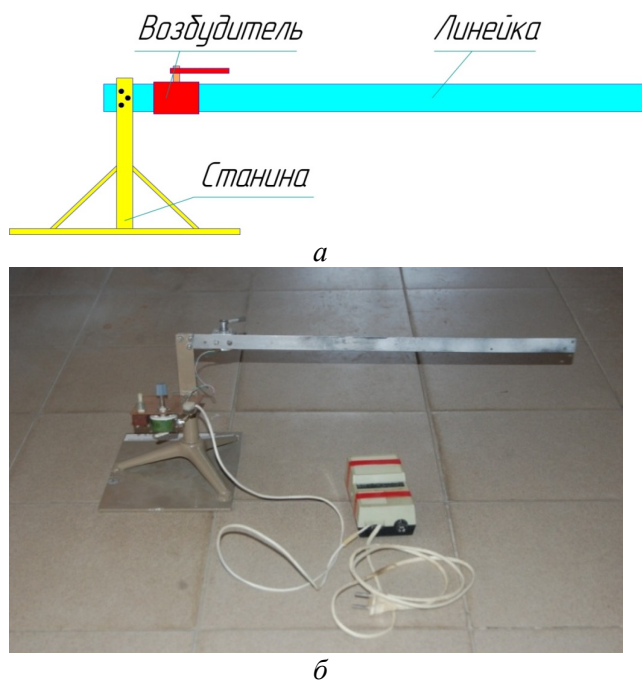


Рис. 9. Схема (а) и внешний вид (б) установки «линейка»

В результате эксперимента на установке «Линейка» (рис. 9) получили перемещения точек объекта. По этим данным построили амплитудно-частотную характеристику, по которой определили амплитуду точки и собственную частоту линейки. Полученные результаты сравнили с измерениями с помощью стробоскопа и с моделью, выполненной в ANSYS.

В результате полученная погрешность не превышает 5%, что является допустимой величиной:

$$\Delta = \frac{9,09 - 8,8}{9,09} 100\% = 3,19\%.$$

Таблица 2. Сравнение результатов эксперимента «ARAMIS», ANSYS, стробоскоп

Собственная частота	«ARAMIS»	ANSYS	Стробоскоп
I	1,53 Гц	1,44 Гц	-
II	9,09 Гц	9,08 Гц	8,8 Гц

Исследование колебаний диска

Сутью этого эксперимента, так же как и предыдущего, является определение собственной частоты и амплитуды колебаний. Рассмотрим схему установки (рис. 10).

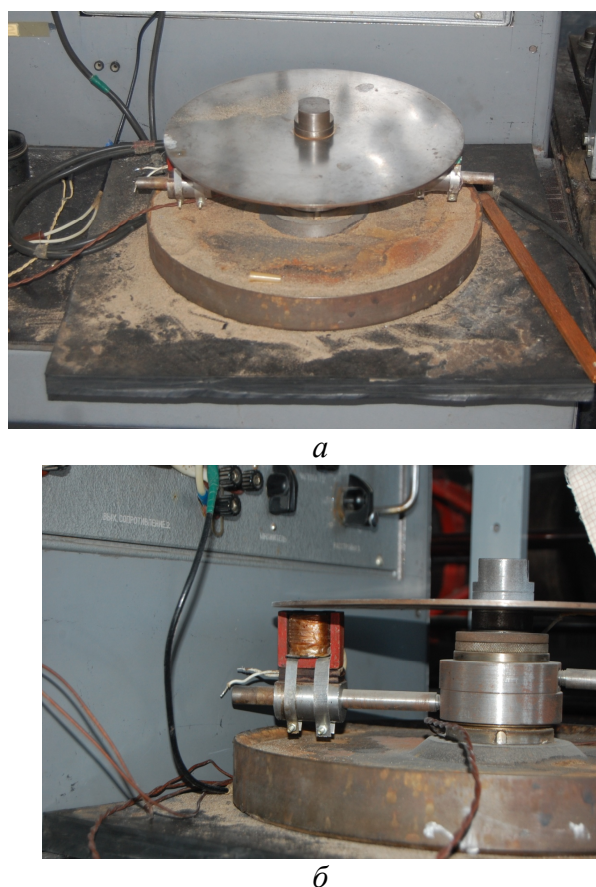


Рис. 10. Установка для исследования колебаний диска: вид на полотно диска (а), вид на электромагнит (возбудитель) (б)

В результате эксперимента получили перемещения по полотну диска (рис. 11). По этим данным построили амплитудно-частотную характеристику, по которой определили максимальную амплитуду и собственную частоту диска. Полученные результаты сравнили с измерениями, проведенными с использованием стробоскопа, и с расчетами, проведенными в ANSYS (рис. 12). Результаты сравнения приведены в табл. 3.

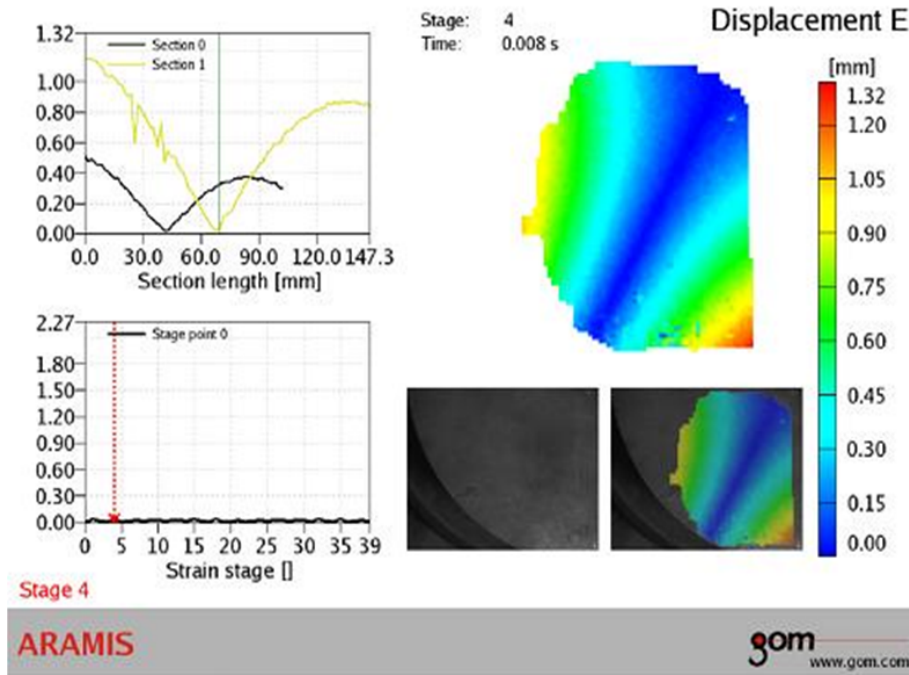


Рис. 11. Суммарные перемещения диска, зарегистрированные в результате эксперимента системой «ARAMIS»

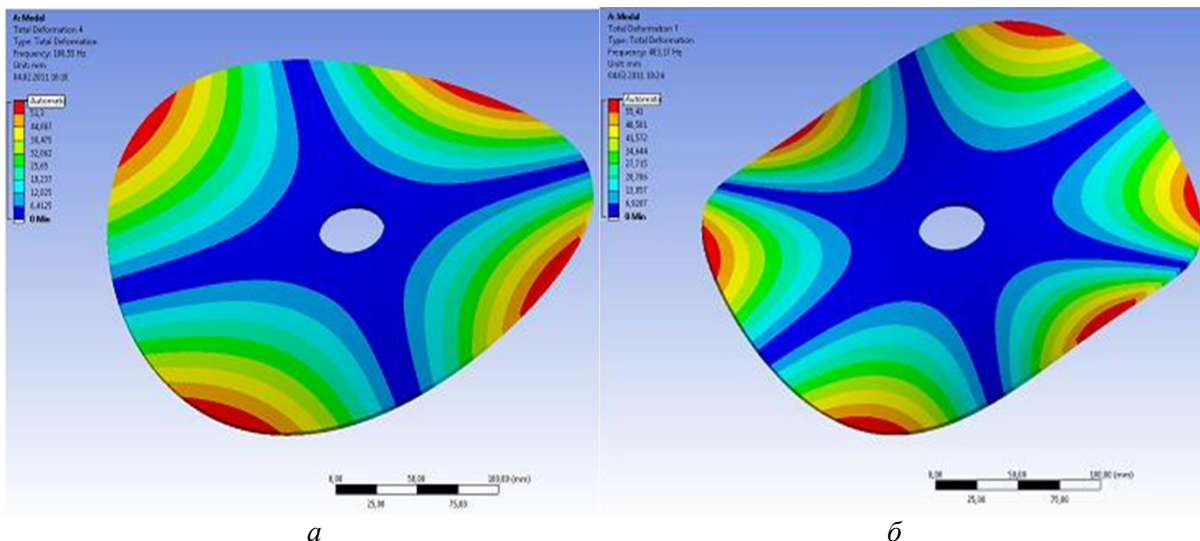


Рис. 12. 0x2 (а) и 0x3 (б) формы колебаний диска, полученные расчетом в ANSYS

Таблица 3. Сравнение результатов, полученных в системах «ARAMIS», ANSYS и с помощью стробоскопа

Форма колебаний	«ARAMIS»	Стробоскоп	ANSYS
0x2	166,6	177,6	188,15
0x3	400	412	403,17

ДЕФОРМАЦИИ

Деформация (от лат. *deformatio* — «искажение») — изменение взаимного положения частиц тела, связанное с их перемещением относительно друг друга. Деформация представляет собой результат измене-

ния межатомных расстояний и перегруппировки блоков атомов. Обычно деформация сопровождается изменением величин межатомных сил, мерой которого является упругое механическое напряжение.

Деформации разделяют на обратимые (упругие) и необратимые (пластические, ползучести). Упругие деформации исчезают после окончания действия приложенных сил, а необратимые — остаются. В основе упругих деформаций лежат обратимые смещения атомов металлов от положения равновесия (другими словами, атомы не выходят за пределы межатомных связей); в основе необратимых — необратимые перемещения атомов

на значительные расстояния от исходных положений равновесия (т.е. выход за рамки межатомных связей, после снятия нагрузки переориентация в новое равновесное положение).

Наиболее простые виды деформации тела в целом:

- растяжение-сжатие,
- сдвиг,
- изгиб,
- кручение.

В большинстве практических случаев наблюдаемая деформация представляет собой совмещение нескольких одновременных

простых деформаций. В конечном счёте, однако, любую деформацию можно свести к двум наиболее простым: растяжению (или сжатию) и сдвигу.

В «ARAMIS» деформации являются расчетной величиной. Поэтому при необходимости получения подобных результатов в ходе эксперимента стоит обращать внимание на корректность выбора измеряемого объема.

В табл. 4 собраны сведения по минимальной фактической величине деформаций, распознаваемой системой «ARAMIS», при различных калибровочных пластинах.

Таблица 4. Определение минимальной фактической величины деформаций

Размер фасета в пикселях	размер пикселя, мм	Количество пикселей в фасете	Объем уравнений	Относительная величина пикселя	Минимальная фактическая величина деформаций, мм
Количество пикселей	1200				
Пластина	120 мм				
60x60	0,1	60	3600	0,0166	0,0016
Пластина	33 мм				
60x60	0,0275	60	3600	0,0166	0,00045
Пластина	55 мм				
60x60	0,0458	60	3600	0,0166	0,000763

Корректность полученных результатов в ходе обработки эксперимента программными средствами «ARAMIS» определяются размером величины фасета. Размер фасета может быть задан в пределах от 1 до 100

пикселей. На рис. 13 представлены результаты одного и того же эксперимента с различной величиной разбиения на фасеты. Как видно, результаты при этом сильно различаются.

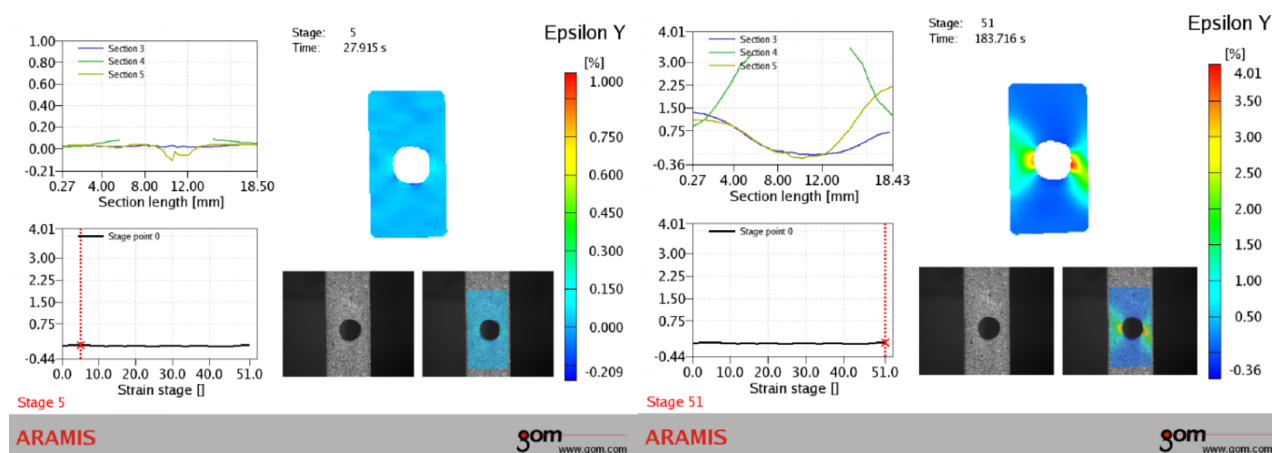


Рис. 13. Деформации пластины в «ARAMIS»

Так же как и в случае с перемещениями установка начинает определять деформации с определенного значения, это значение определяется величиной фасета, калибровочной пластиной.

В ходе тестирования системы «ARAMIS» на корректность определения деформаций были проведены два эксперимента на следующие типы деформаций:

изгиб – эксперимент «брус»
сдвиг – эксперимент «датчик»

ИЗГИБ

Результаты эксперимента по исследованию изгибных деформаций бруса и расчета представлены на рис. 14. Количественное сравнение результатов представлено в табл. 5.

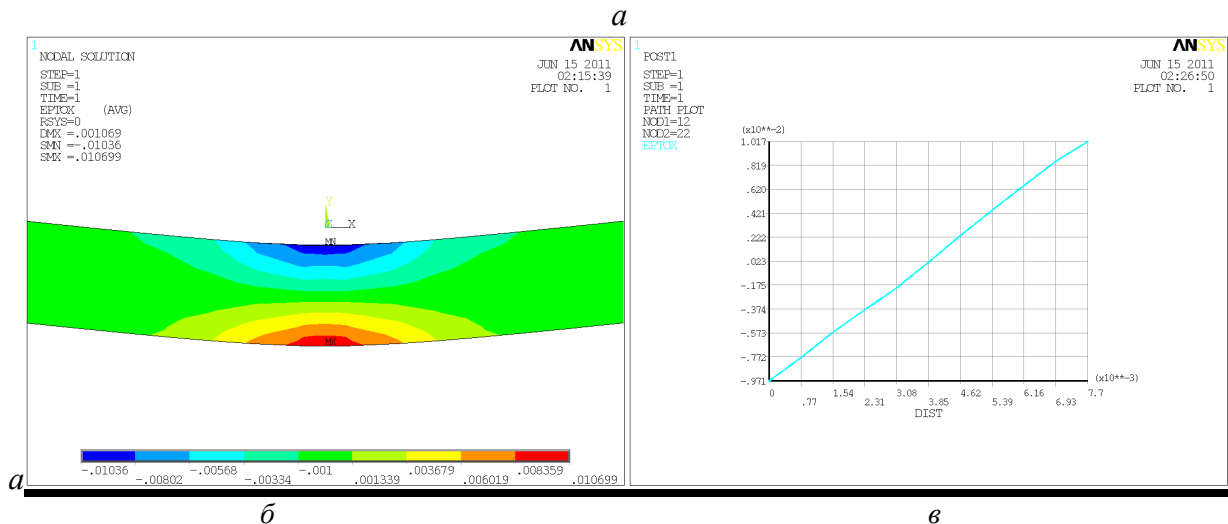
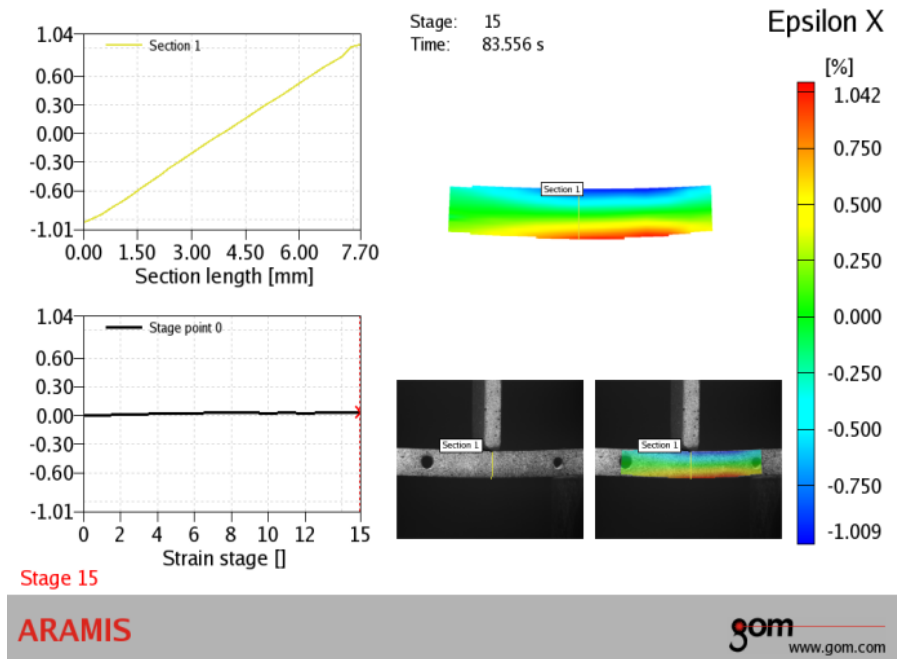


Рис. 14. Деформации стержня вдоль оси X:
а- «ARAMIS», б- ANSYS

Таблица 5. Сравнение результатов расчета и эксперимента на изгиб

Величина	«ARAMIS»	ANSYS	Погрешность
Деформация по оси X	1,042%	1,017%	2,5%

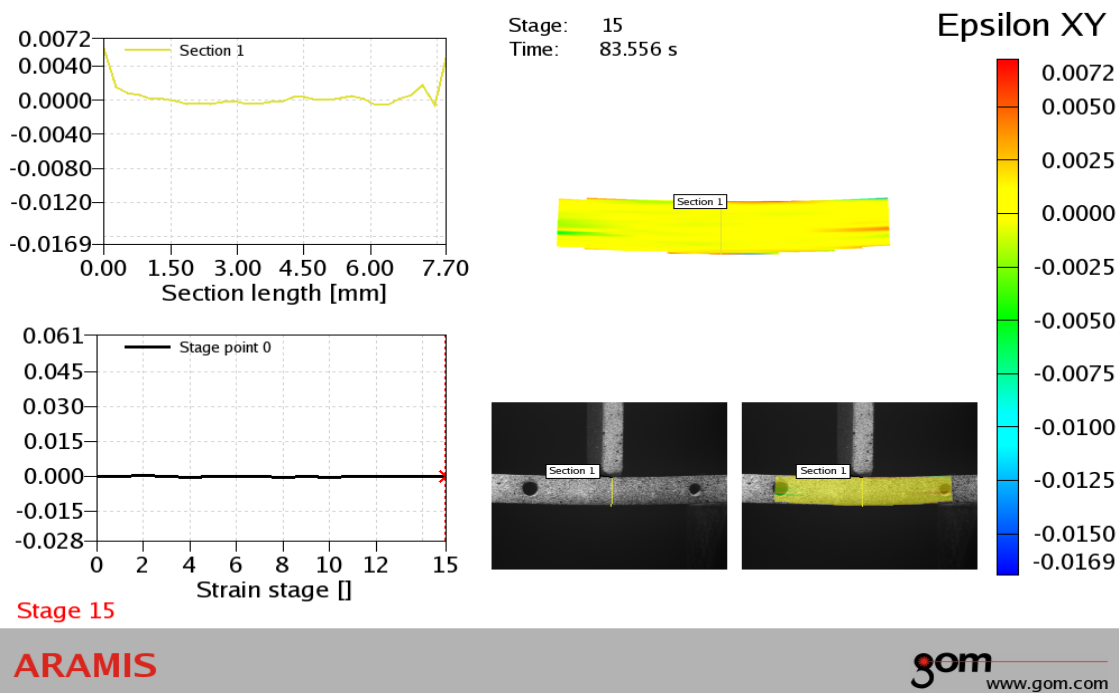


Рис. 15. Касательные деформации

Полученные результаты говорят о корректности измерений системой «ARAMIS».

Как видно из отчетов «ARAMIS», рис. 14 и 15, при изгибе верхние волокна сжимаются, внешние растягиваются, их величина практически одинаковая. На рис. 15 представлена зависимость касательных деформаций, они везде практически равны 0, это отражает физику процесса.

СДВИГ

Эксперимент на исследование деформаций при сдвиге представлен на рис. 16.

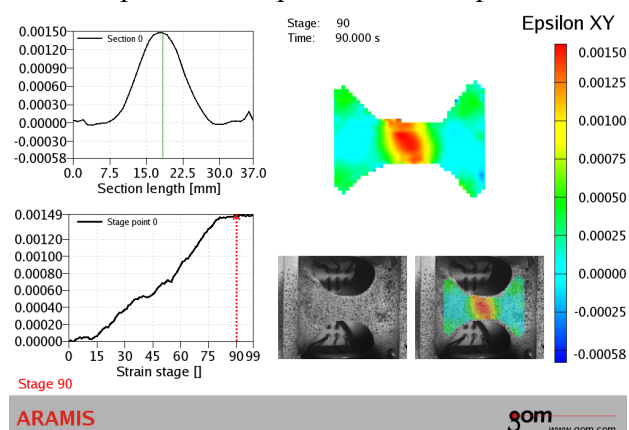


Рис. 16. Касательные деформации

Особенностью данного эксперимента является то, с какой точностью проведено измерение деформаций системой «ARAMIS». Как видно из рис. 16, величина

деформаций имеет значения порядка 10^{-4} , при этом мы видим достаточно четкую кривую распределения деформаций по сечению. Все полученные результаты были сопоставлены с расчетами, сделанными в ANSYS (рис. 17).

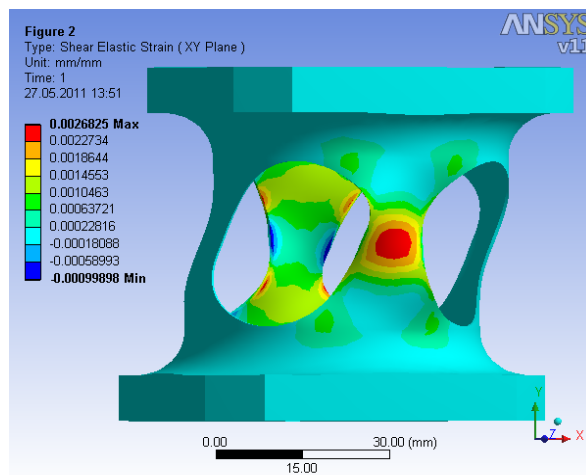


Рис. 17. Касательные деформации по ANSYS

Учитывая, что $\varepsilon_{XY} = \frac{1}{2} \gamma_{XY}$, проведено сравнение результатов (табл. 6).

Таблица 6. Сравнение результатов измерения деформаций при сдвиге

Величина	«ARAMIS» ε_{XY}	ANSYS γ_{XY}	Погрешность
Касательные деформации	0,0015	0,002685	10.5%

Полученная величина погрешности получилась больше допустимой, т.к. во время эксперимента была приложена такая нагрузка, при которой в датчике произошли небольшие пластические деформации, при расчете в ANSYS задача рассчитывалась в упругой зоне.

Как видно из представленных результатов, в целом система «ARAMIS» достаточно корректно решает поставленные задачи. Данная установка до конца не изучена, по-

этому предстоит еще провести ряд экспериментов на исследование материалов, на определение напряжений не только в упругой зоне, но и в зоне пластичности. Только после этого ее можно будет использовать для верификации расчетов в исследовательских задачах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

APPLICATION OF CONTACTLESS MEASURING COMPLEX «ARAMIS» IN EXPERIMENTAL TASKS

© 2011 D. S. Lezhin, F. V. Parovay, A. V. Sobul

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev
(National Research University)

Two high-speed cameras capture movement and deformation of an object which allows to compute surface stress and strain.

Measurements, stress, displacement, strain, experiments.

Информация об авторах

Лёжин Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-75. E-mail: ldms@mail.ru. Область научных интересов: измерения вибрации, торцовые уплотнения, динамика и прочность.

Паровой Фёдор Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 334-43-23. E-mail: parovai@mail.ru. Область научных интересов: измерения, динамика и прочность, вибро-и ударозащита, системы виброизоляции, материал МР.

Собуль Александр Владимирович, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: измерения вибрации и деформаций бесконтактными методами.

Lezhin Dmitriy Sergeevich, Candidate of technical Sciences, Associate Professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-46-75. E-mail: ldms@mail.ru. Area of research: measurement, vibration engineering, contact seals.

Parovay Fedor Vasilyevich, Candidate of technical Sciences, Associate Professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 334-43-23. E-mail: parovai@mail.ru. Area of research: measurement, vibration engineering, metallic rubber analog

Sobul Alexander Vladimirovich, Student, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: vibration engineering.