

## РАЗДЕЛ V. ИЗМЕРЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

- цессов СВС. / Д. А. Гарколь, П. Ю. Гуляев, В. В. Евстигнеев, А. Б. Мухачев // ФГВ. – 1994 – № 1(30). – С. 72-77.
3. Саламатов, В. Телевизионная система определения динамических температурных полей в процессах СВС. / В.Г. Саламатов, Г.А. Цыба, А.И. Кирдяшкин, Ю.М. Максимов // Измерительная техника. – 2002 – № 9. – С. 41-45.
  4. Тригуб, М. Лазерный монитор с возможностью покадровой регистрации изображений. / М.В. Тригуб, Г.С. Евтушенко, Ф.А. Губарев, С.Н. Торгаев // Контроль. Диагностика. – 2011. – Спец.Выпуск. – С. 140-143.
  5. Пасманик, Г. Оптические системы с усилителями яркости / Г.А. Пасманик, К.И. Земсков, М.А. Казарян / – Горький: ИПН АФ СССР, 1988 – 173 с.
  6. Земсков, К. Лазерный проекционный микроскоп. / К.И. Земсков, А.А. Исаев, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш // Квантовая электроника. - 1974. - № 1(1). - С. 14 – 15.
  7. Абрамов, Д. Визуализация с помощью лазерного монитора взаимодействия лазерного излучения с поверхностью стекло- и пироуглерода / Д.В. Абрамов, А.Ф. Галкин, С.В. Жаренова, И.И. Климовский, В.Г. Прокошев, Е.Л. Шаманская // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – №2(312). – С. 97 – 101.
  8. Евтушенко, Г. Скоростная визуализация микробъектов посредством активных сред лазеров на парах металлов в условиях мощной засветки. / Г.С. Евтушенко, Ф.А. Губарев, В.Б. Суханов, Д.В. Шиянов, С.Н. Торгаев, М.В. Тригуб //Известия Томского политехнического университета. – 2009. – т. – №4(315) – С. 141-146
- Аспирант М.В. Тригуб*<sup>1,2</sup> – [trigub@tpu.ru](mailto:trigub@tpu.ru); *д.т.н., проф. Г.С. Евтушенко*<sup>1</sup> – [ime@tpu.ru](mailto:ime@tpu.ru); *к.ф.-м.н. А.И. Кирдяшкин*<sup>3</sup> – [maks@fisman.tomsk.ru](mailto:maks@fisman.tomsk.ru); *к.ф.-м.н. В.Д. Китлер*<sup>3</sup> – [kitler\\_1@mail.ru](mailto:kitler_1@mail.ru); *к.т.н. Р.А.Юсупов*<sup>1,2,3</sup> – [rash1956@yandex.ru](mailto:rash1956@yandex.ru); *к.ф.-м.н. Ф.А. Губарев*<sup>1,2</sup> – [gfaqddtpu@tpu.ru](mailto:gfaqddtpu@tpu.ru); *аспирант С.Н. Торгаев*<sup>1,2</sup> – [torgaev@tpu.ru](mailto:torgaev@tpu.ru); *к.ф.-м.н. Д.В. Шиянов*<sup>2</sup> – [qel@asd.iao.ru](mailto:qel@asd.iao.ru)

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, Институт неразрушающего контроля, каф. ПМЭ, (3822)419-605

<sup>2</sup>ИОА ТНЦ СО РАН, г. Томск, Лаборатория квантовой электроники, (3822) 492-989

<sup>3</sup>Отдел структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН, г. Томск, (3822) 492-497

УДК 621.7.08

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «РАБОЧЕЕ КОЛЕСО» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Д.А. Осипович

Рассмотрена проблема изготовления и контроля деталей турбин, имеющих геометрические элементы сложной формы. Предложен способ сокращения брака на производстве типовых деталей путем выполнения промежуточного контроля сложнопрофильной геометрии. Разработан алгоритм выполнения контрольных операций для типовых деталей с использованием оптической системы измерения и «оцифровки».

**Ключевые слова:** оптические измерения, трехмерное сканирование, промежуточный контроль, турбиностроение

### Введение

Современное производственное предприятие работает в условиях жесткой конкуренции как в рамках отрасли одной страны, так и в мировом масштабе. Решение задачи выживаемости и прибыльности в таких условиях определяется одновременными процессами повышения качества и эксплуатационных характеристик продукции и сокращения ресурсоемкости ее производства. Эта проблема особенно характерна для такой передовой, активно развивающейся отрасли промышленности как турбиностроение. Для разработки конструкции современной турбины и ее важнейшего элемента – лопатки привле-

каются значительные научные и инженерные интеллектуальные ресурсы. Результат их проектирования представляет собой геометрические поверхности крайне сложной формы, описываемые разнообразными математическими закономерностями, требующими исполнения высочайшей точности (рисунок 1).

Именно это исполнение представляет собой одну из самых сложных технологических задач. Для ее разрешения принято использовать наиболее передовые технологические инструменты: пятиосевую фрезерную и электроэрозионную обработку, высокоточное литье по выплавляемым и выжигаемым

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2/1, 2012

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «РАБОЧЕЕ КОЛЕСО» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ

моделям, выращивание монокристаллов, жидкофазное спекание порошков металлов [1].

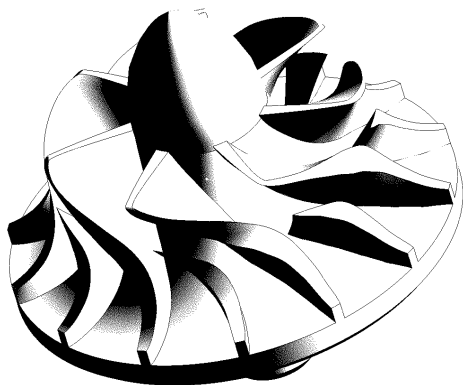


Рисунок 1 – деталь «рабочее колесо турбины»

Однако, как показывает практика действующих предприятий, даже при использовании таких передовых методов получения деталей – главных рабочих элементов турбины: лопаток, моноколес, весьма высока доля бракованных деталей, что в результате приводит к ограничению объема производства окончательной продукции. Разрабатывается множество способов повышения производительности технологии изготовления рассматриваемых деталей, среди них проведение операций контроля геометрии сложнопрофильной поверхности детали на промежуточных этапах процесса изготовления.

### Методика контроля и используемое оборудование

Промежуточный (выполняемый до окончательных доводочных операций) контроль геометрии поверхности детали выполняется путем сопоставления фактической поверхности обрабатываемой детали с номинальной поверхностью, заданной конструкторской моделью. Основной задачей такого контроля является раннее выявление отклонений формируемой поверхности от теоретической, которое позволит скорректировать режим финишной обработки для получения годной детали. Сопоставление поверхности детали с номинальной поверхностью можно проводить несколькими способами. До последнего времени наиболее распространенным был способ, основанный на сравнении величин контрольных размеров, заданных конструктором, и, при попадании всех величин фактических размеров в назначенный на соответствующие номинальные размеры допуск, обработанная деталь признавалась годной. Тенденция к усложнению геометрии профиля функционального элемента рабочего колеса приводит

к тому, что в последнее время все чаще ее описание с помощью плоских размеров становится невозможным. Эта тенденция практически не вызывает сложностей с реализацией технологического процесса изготовления деталей, заданных таким образом, поскольку степень автоматизации современных подходов к обработке позволяет использовать в качестве исходных данных трехмерную модель, не зависимо от способа ее определения. Однако, при таком подходе для выполнения контрольных измерений необходимо сопоставить полной поверхности модели полную поверхность обрабатываемой детали. Современный уровень развития систем трехмерной графики позволяет использовать их для этой цели. Для этого необходимо представить поверхность обрабатываемой детали в форме, понятной компьютерной системе – «оцифровать» ее, тогда после совмещения по поверхностям технологических баз номинальной модели и «оцифрованной» копии детали, можно быстро и наглядно определить получаемые отклонения в любой точке детали.

Технология «оцифровки» поверхности появилась еще более двадцати лет назад, но только сейчас широко воплощается в оборудовании, производительность которого позволяет использовать его в промышленных целях. Существует несколько подходов к технологии «оцифровки», которые, главным образом, различаются по способу взаимодействия устройства измерения с измеряемой деталью: контактные способы измерения и бесконтактные – оптические. Важнейшим преимуществом современных оптических систем измерения является возможность одновременного определения положения множества (до четырех миллионов) точек, тогда как контактный способ выполняет измерение в каждой конкретной точке, что в разы увеличивает время, затрачиваемое на проведение «оцифровки». Ограничения оптических методов измерения представлены использованием прозрачных, блестящих и черных поверхностей, что можно исправить с помощью напыления на измеряемую поверхность мелкодисперсного порошка диоксида титана. Другим, непреодолимым ограничением применимости оптических методов является невозможность «оцифровки» точек, расположенных в глубоких узких отверстиях, щелях или внутренних полостях, характерных для закрытых колес, например, центробежного насоса, для которых невозможно провести оптическую «оцифровку» без нарушения целостности детали (рисунок 2).

## РАЗДЕЛ V. ИЗМЕРЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

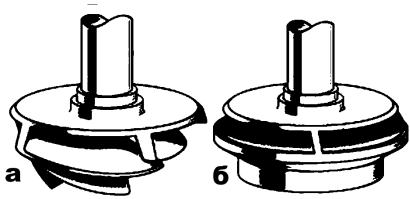


Рисунок 2 – разновидности турбинных рабочих колес: а – открытое, б – закрытое.

С учетом этих ограничений определяется группа деталей, для контроля которой может быть использован разрабатываемый технологический процесс.

### Предлагаемый алгоритм контроля

Исходными данными для разработки процесса контроля являются чертеж или трехмерная модель детали, контроль которой нужно выполнить и эталонные детали. В результате анализа процессов, проведенных для реализации контрольных операций ряда типовых деталей, была получена следующая последовательность действий (рисунок 3).

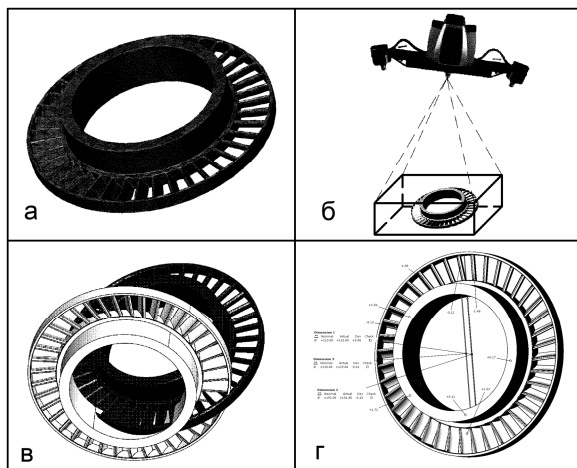


Рисунок 3 – порядок выполнения разработанного процесса контроля детали; а – получение задания и анализ условий обработки, б – оптическая «оцифровка» поверхности детали, в – совмещение «оцифрованной» полигональной поверхности с номинальной моделью, г – определение контрольных размеров и отклонений в точках.

В первую очередь производится анализ детали, поступившей на сканирование, выбор стратегии обработки и используемого оборудования (выбор определенного набора комплектующих для установки оптических измерений зависит от размеров детали). Затем выполняется подготовка детали к «оцифровке» распаковка, нанесение матирующего порошкового покрытия, если это необходимо, установка на оснастку или в автоматизированную камеру. После проведения всех под-

готовительных процедур, производится непосредственно «оцифровка» поверхности эталонной детали. Задачей оператора на этом этапе является создание за минимальное время, напрямую зависящее от количества проведенных циклов съемки. В процессе разработки была использована установка трехмерных оптических измерений, основанная на использовании принципа структурированного белого света, ATOS III от GOM. Цикл съемки при использовании этой системы состоит из проецирования на поверхность контрастной сетки черных и белых линий и фиксирования этих линий, искривленных поверхностью детали, с помощью двух отъюстированных камер. Совмещение полученных изображений позволяет определить координаты каждой точки, зафиксированной обеими камерами. Результатом «оцифровки» является облако точек, принадлежащих поверхности детали, положение которых было однозначно определено на данном этапе.

Для дальнейшей обработки необходимо полигонизировать полученную таким образом точечную модель. Уже полигонизированная модель окончательно обрабатывается: зашиваются мелкие разрывы в полигональной сетке, обрезаются участки поверхности, не принадлежащие контролируемой детали, но попавшие в модель. Параллельно этому процессу в случае, когда в качестве исходных данных был предоставлен чертеж, выполняется трехмерное моделирование в произвольном CAD пакете для создания номинальной модели контролируемой детали.

Следующие этапы операции контроля начинаются с программного совмещения двух моделей, полученных на предыдущих стадиях. В ходе разработки на этом этапе была использована система GOM-Inspect-V7.5, поставляемая вместе с установкой оптических трехмерных измерений, использованной в данной работе. Главным требованием корректной работы этой системы является целостность полигональной поверхности, отсутствие на ней «несшитых» участков. Наличие таких участков может привести к невозможности определить отклонение поверхности на них, в силу формального отсутствия поверхности. Система GOM-Inspect-V7.5 работает с файлами стандартных форматов, поэтому с ее помощью можно оценить отклонения от номинала замкнутой полигональной поверхности, полученной любым другим способом.

Для определения отклонений положений точек фактической поверхности от номинальной в первую очередь необходимо совмес-

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «РАБОЧЕЕ КОЛЕСО» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ

тить анализируемые модели, выполненные в различных системах координат, по технологическим базам. Именно поэтому важно определить все точки поверхности контролируемой детали, а не только участки сложно-профильной геометрии. Для совмещенных моделей система в автоматизированном режиме производит расчет отклонений во всех узловых точках полигональной поверхности и воспроизводит результат в виде цветовой карты отклонений, наложенной на полигональную поверхность. Есть возможность определить и вывести в результирующий отчет точное значение отклонения практически в любой точке поверхности. Помимо этого на номинальной модели можно указать ряд размеров, характеризующих геометрические параметры детали, с назначенными полями допусков, тогда система автоматически определит значения этих размеров на фактической поверхности и вычислит, принадлежит ли полученное значение множеству допустимых для этого размера. Результат сравнения, содержащий изображение поверхности детали, окрашенной картой отклонений, метки со значениями отклонений в произвольно назначенных точках, сводную таблицу определенных номинальных и фактических размеров, а также выходные данные о системе и организации, производившей контрольную операцию, генерируется автоматически по запросу оператора.

Значения отклонений фактической поверхности, полученной в результате первичной обработки, от номинальной, которые были определены таким образом, могут быть использованы в качестве исходных данных для корректировки траектории финишной обработки детали.

В процессе разработки использованы:

1. Система оптических измерений ATOS от GOM, Германия (рисунок 4). Технические характеристики системы:
  - принцип действия основан на структурированном белом свете;
  - диапазон объемов измерений от 30x24x13мм до 2x2x2 м;
  - время одного съема от 1 с;
  - точек поверхности за съем - до 4000000;
  - точность от 0,004мм;
2. Программное обеспечение GOM-Inspect-V7.5, относящееся к классу 1, характеризующемуся самой высокой точностью. Достижимые точности линейных величин - менее 0,1мкм, угловых величин – менее 0,1 арксеканса.
3. Контролируемые детали – «рабочее колесо внутреннее» (рисунок 5). Парамет-

Д.А. ОСИПОВИЧ

ры: Ø192мм, ширина 36мм, количество лопаток – 40шт.

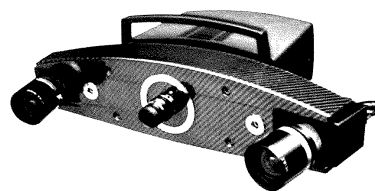


Рисунок 4 – главный рабочий орган системы ATOS – сенсор с установленными камерами и проектором.

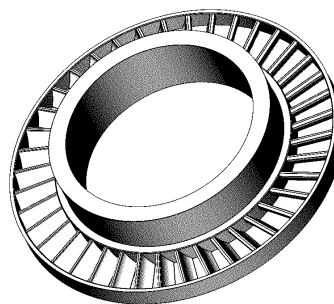


Рисунок 5 – номинальная модель детали «рабочее колесо внутреннее», выполненная в системе SolidWorks.

### Заключение

Таким образом, в работе представлен технологический алгоритм контроля деталей типа «рабочее колесо», включение которого в виде дополнительной промежуточной стадии в ход процесса с последующей корректировкой режима финишной обработки с учетом данных, полученных на этом этапе, должно привести к повышению качества обрабатываемых деталей и сокращению брака. Ограничения метода, связанные с особенностями подхода оптических измерений, несколько сокращают область возможного применения разработанного процесса, однако он остается пригодным для весьма обширного множества типовых деталей. Высокая скорость выполнения процесса «оцифровки» поверхности при сохранении высокой измерительной точности делает метод пригодным для самых ответственных деталей, выпускаемых массово. Подход к описанию поверхности фактической детали на основе трехмерной оптической «оцифровки» предполагает возможность использования подобного алгоритма не только в качестве промежуточного этапа в процессе изготовления детали. Также он может быть использован для возвращения в эксплуатацию деталей, подверженных износу, после определения того факта, что деталь в процессе износа не перестала удовлетворять требованиям допусков на размеры.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бажанов, А.И. Технология производства, современное оборудование. // А.И.Бажанов Двигатель. – 2010.- №2(68). – С. 10-14.
2. 3D сканеры и история их появления [Электронный ресурс].–URL: <http://www.uralprom.org/nashi/magazin-kompyuterov-40.htm> (дата обращения 09.02.2012)

*Аспирант Осипович Д.А. тел. 8-922-68-93-119, [dashapors@rambler.ru](mailto:dashapors@rambler.ru) - каф. Технология, конструирование и автоматизация в специальном машиностроении Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета*

**УДК 658.5**

## **ПРОЦЕСС АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РЕЗИНОВОЙ СМЕСИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ**

В.А. Ханов, Б.Н. Марьин, Д.Н. Фролов

Рассмотрен новый подход к совершенствованию системы технологического контроля при производстве деталей из резинотехнических изделий (РТИ), выполняющих особо важные функции, работающих в агрегатах авиационной техники. Цель работы состоит в повышении качества производимой продукции и снижении уровня брака. Достижение чего становится возможным при разработке и внедрении адаптированных автоматизированных методов мониторинга технологии производства РТИ.

**Ключевые слова:** технологический контроль; мониторинг технологии; резинотехнические изделия; детали агрегатов систем авиационной техники; качество продукции; нейросетевое моделирование

### **Состояние проблемы**

Важнейшей из задач в авиастроении, является обеспечение высокой надёжности технических систем летательных аппаратов, особенно при постоянном расширении областей применения с учётом условий эксплуатации изделий авиационной техники (температуры, нагрузки, скорости, агрессивные среды и т.д.). В частности, существенную роль здесь играет обеспечение требуемого качества деталей, выполняющих ответственные функции, к которым относятся различные уплотнители из эластомеров.

Производство деталей из резинотехнических изделий (РТИ) для агрегатов авиационной техники подчас сопровождается высоким процентом отсева бракованных деталей, что приводит к существенному увеличению материалоемкости изделий и трудоемкости их изготовления, то есть удорожанию производства РТИ, а, следовательно, и повышению стоимости конечного продукта – летательного аппарата. Следует отметить, не смотря на то, что в современном самолёте количество деталей из РТИ составляет 10–12 тысяч единиц, стоимость комплектующих резиновых изделий в сравнении со стоимостью агрегатов систем летательных аппаратов, в которых они используются, обычно невелика, однако трудность замены деталей из эластомеров зачастую высока. Таким образом, для

потребителя долговечность РТИ является одним из основных показателем. Для производства это оборачивается увеличением материало- и трудоемкости. Следовательно, при производстве РТИ огромное значение имеют экономия сырья и материалов, разработка безотходных технологий, продление сроков эксплуатации изделий. Одним из путей достижения этих целей является внедрение на участках изготовления РТИ новых систем контроля качества сырья и РТИ и мониторинга состояния технологического процесса.

### **Предлагаемая методика оценки состояния**

В практике производства РТИ наиболее информативными в цеховых условиях являются реологические методы испытания исходного материала заготовок, основным из которых является виброреометрия. Однако на этапах технологического цикла оказывается затруднительным использование метода на отечественном и зарубежном оборудовании.

На виброреометрах требуется для испытания до 70 г. материала. Нами разработана и исследована методика реологического контроля резиновых смесей (РС) меньшего объёма – до 0,3 г. Это позволяет обеспечить проведение низкокзатратных испытаний на