

станка с ЧПУ. Как и в случае с САЕ-системой, модель автоматически передается в САМ-систему. Полученная в САМ-системе управляющая программа постоянно поддерживает ассоциативную связь с исходной моделью, что позволяет в случае изменения модели автоматически пересчитать управляющую программу для станка (рисунок 5).

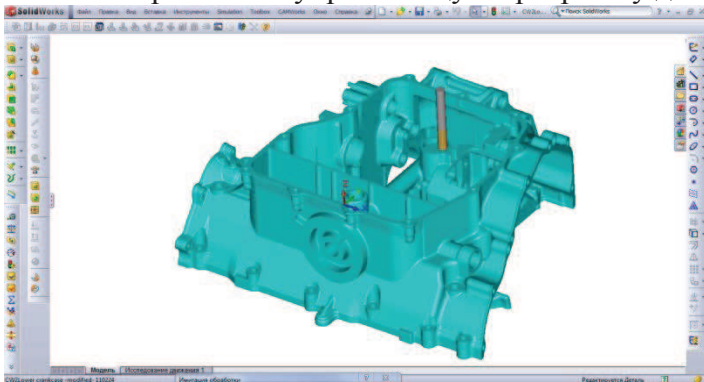


Рисунок 5. Создание управляющей программы для станка с ЧПУ в САМ-системе

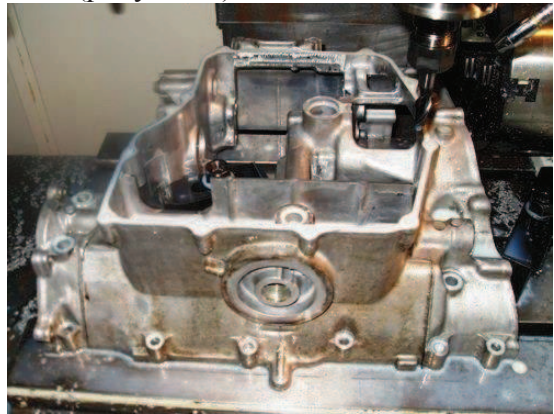


Рисунок 6. Обработанный картер

Как видно из приведенного примера, Solid Works позволил замкнуть внутри себя весь жизненный цикл модели: от проектирования до создания управляющей программы для станка с ЧПУ. Функция, позволяющая в автоматическом режиме после изменения исходной САД-модели, корректировать САЕ- и САМ-модели незаменима для производств с групповой технологией. Создав одну качественную САД-САЕ-САМ-модель, предприятие в кратчайшие сроки сможет перейти на выпуск новой модификации детали, откорректировав лишь исходную модель (рисунок 6).

Литература

1. Анкин А.В., Кузьминский Д.Л. Разработка программного обеспечения для расчета пространственной размерной цепи. // Известия МГТУ «МАМИ», № 2, 2011. С. 106-110.
2. Максимов Ю.В., Порхунов С.Г., Кузьминский Д.Л. Особенности расчета и оптимизации сварной станины для уникальных станков. // Известия МГТУ «МАМИ», № 2(14), 2012. С. 98-104.
3. Порхунов С.Г., Кузьминский Д.Л. Solid Works как основа для проектирования. // САПР и графика, 2011, № 11. С. 97-99.
4. Крылов О.В. Метод конечных элементов и его применение в инженерных расчетах. М., 2001.

Направленное поверхностно-пластическое деформирование в системе управления формой прецизионных деталей пневмогидроагрегатов

к.т.н. проф. Курицына В.В., Мартынюк А.В., Грачев М.В.

Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского (МАТИ)
8 (495) 915-52-93, tpdla@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты комплексных исследований, направленных на выявление возможностей технологического управления параметрами точности формообразования ответственных деталей агрегатов управления двигателей летательных аппаратов прогрессивными методами направленного поверхностно-пластического деформирования алмазным индентором.

Ключевые слова: технологический процесс, пневмогидросистемы, отклонение формы, локальное поверхностное пластическое деформирование, алмазный индентор.

Введение

Технологии изготовления деталей, узлов, агрегатов, энергетических установок и изделий авиакосмической техники определяют во многом работоспособность, себестоимость изделия, трудоемкость производства. Постановка на производство деталей разнообразной номенклатуры и различного функционального назначения требует решения проблемы быстрого и эффективного проектирования технологических процессов, включающих высокие прогрессивные технологии формообразования и модификации поверхностного слоя.

Проблема технологического обеспечения качества дорогостоящих ответственных деталей особенно актуально проявляется на современном этапе развития авиационного и ракетного двигателестроения, где непрерывно возрастают масштабы применения прецизионных деталей сложных конструктивных форм, неравномерной жесткости, тонкостенных. Широкое распространение получают различного рода гидроусилители и сервоприводы, выносные и встроенные силовые цилиндры, сложнопрофильные детали. Интенсификация производства обострила проблему изготовления класса высоконагруженных деталей из особо прочных и жаропрочных конструкционных материалов. Это обусловлено:

- сложностью формы деталей;
- применением труднообрабатываемых жаростойких и жаропрочных материалов;
- высокими требованиями по точности геометрических параметров поверхности на уровне 5-7 квалитетов, шероховатости поверхности 1,25 мкм;
- необходимостью формирования поверхностного слоя с регламентированными свойствами, высокой несущей способностью, с распределением предпочтительных остаточных напряжений сжатия.

Проблемы технологического наследования конструктивных форм прецизионных деталей сервоприводов авиакосмической техники

Прецизионные детали пневмогидравлических систем (ПГС) управления (рисунок 1) работают в специфических условиях, характеризующихся одновременным воздействием различных эксплуатационных факторов, которые могут изменяться в широком диапазоне: от криогенных до высоких температур (от -190°C до $+500^{\circ}\text{C}$), высоких рабочих давлений (давление в корпусе гидропривода достигает 30 МПа), динамических нагрузок (вибраций, ударов, тряски и т.п.). В качестве рабочих сред в ПГС часто применяются химически активные жидкости и газы. Наблюдается тенденция дальнейшего ужесточения условий работы ПГС. Одновременно с этим повышаются требования к работоспособности, степени герметичности и условиям контактирования подвижных соединений ПГС. Прецизионные пары трения являются важнейшими узлами топливных и гидравлических агрегатов и самыми дорогостоящими при производстве.

Цилиндрические корпусные детали ПГС по конструкторско-технологическому признаку можно отнести к группе неосесимметричных деталей и охарактеризовать как изотропные оболочки неравной жесткости как по длине, так и по сечению (рисунок 2). Механической обработке подвергаются внутренняя цилиндрическая и частично наружная поверхности. Важными характеристиками, влияющими на функциональные параметры изделия, являются отклонение формы, волнистость поверхности.

Основным препятствием повышению качества и производительности изготовления деталей сложной конфигурации являются деформации, возникающие от действующих сил при различных видах технологического воздействия (рисунок 3). Особого рассмотрения требуют отклонения формы, возникающие в связи с наследованием конструктивных форм деталей. В ходе технологических процессов механической обработки детали получают специфические отклонения от правильных геометрических форм. Эти отклонения вполне определенным образом связаны с геометрической формой продольных и поперечных сечений детали, взаимным расположением их поверхностей. Заготовки деталей, имея в зависимости от конст

тивных особенностей различную жесткость или температурные деформации в разных точках, под действием сил обработки или нагрева получают в ходе технологического процесса или эксплуатации различные перемещения, вызывающие погрешности формы готовых деталей. Сюда же можно отнести возникновение отклонений формы от неравномерной релаксации напряжений, величина которых в различных точках заготовки связана с особенностями конструктивных форм деталей.

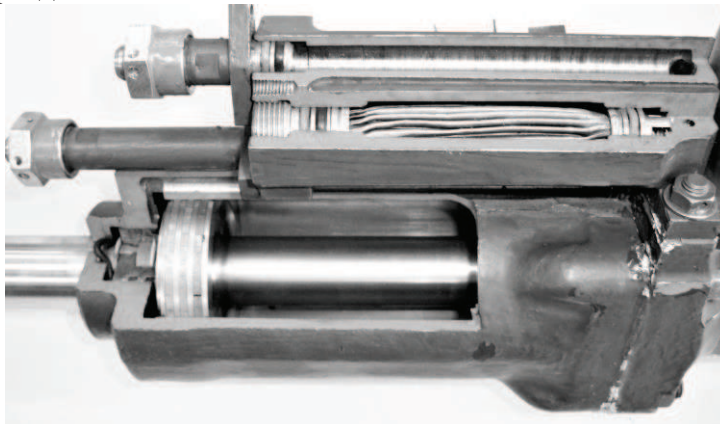


Рисунок 1. Прецизионные неравножесткие детали в составе цилиндра-поршневой группы ПГС

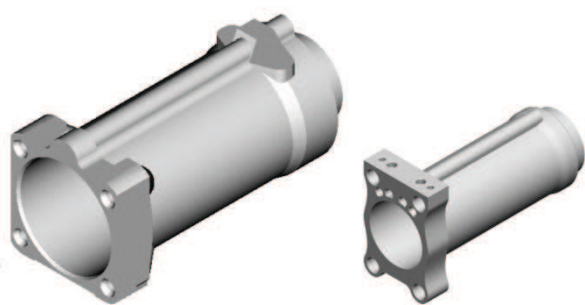


Рисунок 2. Модели корпусных деталей пневмогидросистем

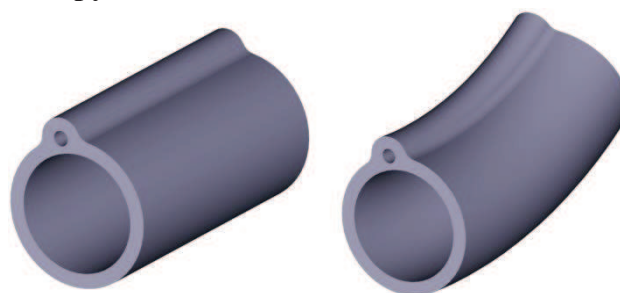


Рисунок 3. Модель коробления деталей неравномерной жесткости

Таким образом, картина технологического наследования в операциях формообразования внутренних точных рабочих поверхностей неравножестких деталей кольцевого и цилиндрического типа складывается из нескольких порождающих факторов:

1. Наследование состояния формы самой рабочей поверхности до технологической операции на ее форму после операции.
2. Наследование неравномерного распределения локальных мест приложения сил закрепления мало жесткой заготовки в приспособлении.
3. Влияние наследования внешних конструктивных форм нерабочих поверхностей на формообразование внутренних высокоточных поверхностей. Неравномерная жесткость детали, связанная с внешней геометрией, порождает аналогичную картину неравномерного распределения сил механообработки внутренней поверхности, а следовательно, и распределения отклонений ее формы. Данный вид наследования в производстве мало- и неравномерно жестких деталей составляет наиболее сложную проблему в технологическом обеспечении точности деталей данного класса.
4. Влияние наследования внешних конструктивных форм детали на получаемые отклонения формы внутренних поверхностей при операциях, связанных с воздействием высоких температур. Получаемые отклонения связаны с неравномерными температурными полями при остывании. Данный вид наследования формы весьма опасен, так как может носить скрытый характер и проявиться с течением времени либо при операциях частичного отъема материала.

5. Деформации, имеющие место при применении методов финишной обработки маложестких тонкостенных деталей (поверхностно-пластическое деформирование, нанесение покрытий и модификация поверхностей), обусловлены остаточными напряжениями, возникающими в тонком поверхностном слое детали в результате неоднородных пластических деформаций или изменения объема.

Неравномерная жесткость детали может привести в ходе технологического процесса к возникновению погрешности формы в виде отклонения от прямолинейности оси корпуса и отклонения от круглости центрального отверстия. Отклонения формы деталей, получаемые под действием различных факторов на протяжении технологического процесса изготовления, имеют тенденцию устойчивого сохранения в течение всего процесса обработки. Это обуславливается явлением технологического наследования. При этом некоторые характеристики и свойства переходят от операции к операции, они как бы наследуются от предыдущей обработки.

Явление технологического наследования наблюдается в любом технологическом процессе, однако его проявление особо важно для изготовления и сборки высокоточных деталей [1]. Последнее объясняется количественной стороной наследуемых параметров, наследственная часть погрешности в этом случае оказывается весьма ощутимой и занимает большую часть, а иногда и весь допуск на параметр, или даже превышает его. Игнорирование явления технологического наследования приводит к нестабильности системы технологического обеспечения требуемых параметров. Необходимый уровень точности формы прецизионных деталей достигается посредством трудоемких доводочных операций.

Средства борьбы с данным видом отклонений связаны с выбором места технологических операций в структуре технологического процесса, а также режимов их проведения. Однако как показывает анализ исследований технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей путем оптимизации методов лезвийной и алмазно-абразивной обработок, а также ППД обработки возможно обеспечить повышение эффективности в среднем лишь на 20÷30%, что не вполне отвечает современным требованиям интенсификации технологии машиностроения. В связи с этим появление новых комбинированных методов направленного технологического воздействия, основанных на достижениях в области физики твердого тела, механики деформируемых сред и т.п., является актуальным. Важной задачей в связи с этим является поиск путей и методов ликвидации вредных наследственных явлений в производстве прецизионных деталей пневмогидравлических агрегатов двигателей и силовых установок.

Локальное поверхностно-пластическое деформирование как метод управления технологическим наследованием формы

Обеспечение высокой точности формы корпусных деталей вызывает необходимость ужесточения требований к технологическому процессу и разработки новых прогрессивных технологических процессов, таких, как *локальное поверхностное пластическое деформирование* (ЛППД), заключающееся в целенаправленном воздействии на процесс формообразования цилиндрических маложестких прецизионных деталей.

Любая система, рассматриваемая с позиции наследования, содержит большое число регуляторов [2, 3]. Работа наследственных регуляторов, присущих технологическим системам, является мощным фактором обеспечения требуемых выходных параметров и повышения надежности работы высокоточных деталей. Теоретическое и экспериментальное исследование методов, интенсифицирующих обработку традиционными и специальными комбинированными методами направленного воздействия, позволит управлять процессом технологического наследования, с тем чтобы свойства, положительно влияющие на надежность детали, сохранять в течение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно, ликвидировать в его начале [4].

Большими потенциальными возможностями обладают методы локального воздействия

на деталь технологической энергией различной физической природы (деформация, снятие материала, нанесение покрытий, модификация потоками энергии и др.). Предлагаемые прогрессивные методы локального поверхностного пластического деформирования способствуют интенсификации управления производственными процессами формообразования и доводки прецизионных деталей двигателей ЛА.

Особая роль в формировании качества и эксплуатационных свойств деталей принадлежит обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД), к которой относятся процессы обкатывания поверхностей шариками, роликами, алмазными инденторами и др. [5]. Эффективным методом повышения прочности поверхностного слоя деталей является алмазное выглаживание, связанное с образованием остаточных напряжений сжатия, повышением твердости, несущей способности поверхности, коррозионной стойкости. Преимущества методов ППД в технологии обработки обуславливаются их высокоэффективным силовым воздействием на поверхностный слой обрабатываемой детали и высокой производительностью. Им присуща более высокая гибкость в технологическом управлении качеством поверхности, т.к. включены в работу такие средства технологического воздействия, как силовые, температурные и др.

Анализ различных методов ППД показал, что для рассматриваемых деталей и материалов из-за присущей им высокой поверхностной твердости, достигающей HRC=56-65 единиц, обеспечиваемой операциями термической и химико-термической обработки, лишь алмазные инденторы приемлемы в качестве инструмента для отделочной обработки. Твердость деформирующих элементов, использующихся при других методах ППД, вполне соизмерима, а в некоторых случаях даже уступает поверхностной твердости деталей прецизионных пар. При контактном давлении, равном пределу текучести материала детали, осуществляется пластическая деформация в зоне контакта. При этом происходит не только упрочнение выглаженного слоя, но и формирование выгодных при эксплуатации остаточных напряжений сжатия.

Связь параметров канавки с параметрами процесса деформирования алмазным индентором можно представить в виде:

$$P_y = 0,38 \cdot \frac{\pi \cdot R_{сф} \cdot H_{\mu} \cdot h_k}{f \cdot K_k}, \quad (1)$$

где: P_y – усилие выглаживания, Н; $R_{сф}$ – радиус сферы алмазного индентора, мм; H_{μ} – микротвердость исходной поверхности, МПа; h_k – глубина канавки, мм; f – коэффициент трения по обрабатываемому материалу; K_k – коэффициент, учитывающий влияние шага между канавками (для одиночной канавки $K_k = 1,0$).

В силу специфики (наиболее высокая твердость деформирующего инструмента, малая площадь пластического контакта инструмента с деталью, особенности напряженного состояния материала) в наилучшей степени для целей локальной обработки поверхностей пригодно ППД алмазным индентором.

Механизм влияния локальной поверхностно-пластической обработки на геометрические характеристики деталей в различных аспектах рассмотрения различен и имеет две разновидности:

1. Изменение геометрии поверхности за счет перераспределения материала поверхностного слоя при пластическом деформировании во время образования канавок (рельеф поверхности).
2. Наведение остаточных напряжений в приповерхностной зоне образования канавки, которые, в свою очередь, способны вызывать общую деформацию детали или ее элемента (маложесткие, тонкостенные детали), а также способны изменить жесткость детали без изменения ее конструктивных форм.

Таким образом, применение локального или управляемого поверхностного пластического деформирования позволяет управлять геометрическими характеристиками поверхно-

стей за счет целенаправленного перераспределения материала поверхностного слоя детали, уменьшая волнистость, а также путем создания поля остаточных напряжений, способных осуществить направленную деформацию детали, уменьшающую имеющееся отклонение формы. Сущность методов ЛППД состоит в нанесении серии разнообразных канавок алмазным индентором на рабочие и, возможно, нерабочие поверхности обрабатываемых деталей. Локальность и управляемость процесса заключается в специальных методиках выбора режимов нанесения канавок, что подразумевает выбор места и регулярности их нанесения, интенсивности нагрузки, радиуса индентора. Особого внимания заслуживает метод управления формой цилиндрических деталей, основанный на локальном поверхностном пластическом деформировании детали алмазным индентором.

Принцип ЛППД основан на возникновении остаточных напряжений в поверхностной зоне материала детали при пластическом деформировании поверхности. Специальное распределение остаточных напряжений может вызвать деформации тонкостенных неравножестких деталей (рисунок 4).

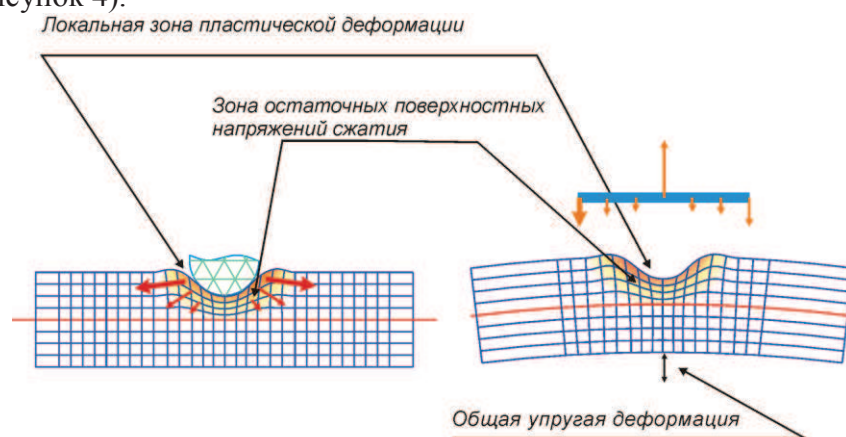


Рисунок 4. Схема ЛППД тонкостенной плоской пластины

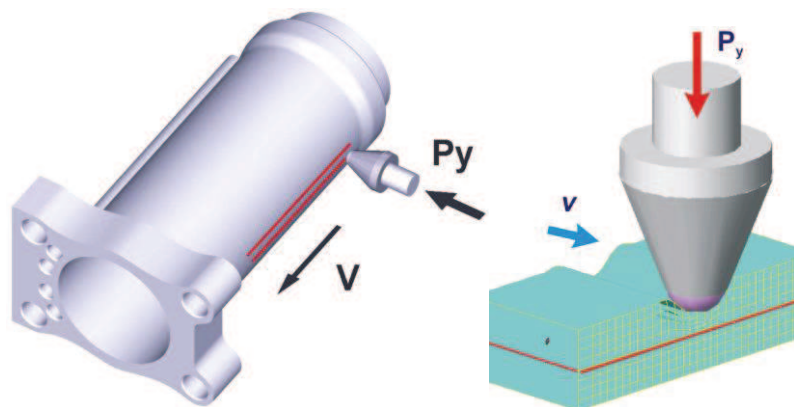


Рисунок 5. Схема ЛППД цилиндра алмазным индентором

Основная идея метода ЛППД при управлении формой деталей кольцевого и цилиндрического типа состоит в проведении на нерабочей поверхности деталей одной или нескольких канавок алмазным индентором вдоль образующей (рисунок 5). При этом образуется локальное поле сжимающих остаточных напряжений, эквивалентное системе сосредоточенных нормальных и тангенциальных нагрузок, а следовательно, обладающее большой деформативной способностью; возникает направленная общая упругая деформация детали.

Эффект исправления отклонения формы от круглости достигается за счет уравнивания локальных остаточных напряжений в поверхностном слое детали, сопровождающегося ее общей упругой деформацией, поле перемещений которой противоположно полю отклонения формы от номинала детали до воздействия ЛППД. Данный метод обладает рядом преимуществ (низкая энергоемкость, высокая производительность, применение универсального

широко распространенного оснащения). Большая степень локализации пластической деформации обеспечивает высокую разрешающую способность метода, что выражается в точности регулирования воздействия (сила вдавливания, дискретность расположения канавок) и точности получаемого результата (геометрия общего деформирования).

Локальное поверхностно-пластическое деформирование может проводиться на токарно-винторезных станках моделей 16К20 и 1И611П. Инструментом служат наконечники из природных (ОН-037-103-67) и синтетических (АСПК, АСПК-3) алмазов со сферической рабочей частью $R_{сф} = 1,0-3,5$ мм. Усилие на алмазном наконечнике при формообразовании одной канавки не превышает 1000 Н. Используется смазочно-охлаждающая жидкость – масло.

При определении места воздействия и режимов ЛППД для тонкостенных деталей неравномерной жесткости применяется численный анализ упругого напряженно-деформированного состояния образцов, подвергнутых воздействию единичных силовых нагрузок, эквивалентных эффекту действия остаточных напряжений после локального поверхностного пластического деформирования. При расчете действие локальных остаточных напряжений представляется как приложение сосредоточенной силы, направленной по нормали от поверхности. Метод конечных элементов в форме метода перемещений является базой для разработанной системы моделирования, вполне отвечает требованиям надежности получения необходимого результата при повторении синтезированного теоретического эксперимента на практике в реальных условиях. Описывающие уравнения математической модели получаем путем минимизации полной потенциальной энергии рассматриваемой системы, выраженной через поле перемещений. При решении задачи упругого деформирования рассматриваем тело заданной формы, материал которого имеет известные физико-механические свойства. На тело действуют заданные нагрузки и наложены некоторые связи, определяются напряжения, деформации и перемещения в теле. Уравнения модели описывают равновесие узлов системы; искомыми неизвестными могут являться компоненты узловых перемещений при заданных параметрах силовых факторов или параметры локального воздействия (сила давления, место приложения и т.д.) при заданном поле требуемых перемещений.

Оценка отклонения профиля от круглости осуществляется путем спектрального анализа, который основан на представлении профиля в виде ряда периодических функций (ряд Фурье) и реализуется с помощью гармонического анализа. Спектральное представление позволяет, с одной стороны, получить комплексную характеристику отклонений, с другой стороны – провести детальный анализ отклонений формы от круглости в любом частотном диапазоне.

Применение автоматизированных программно-аппаратных комплексов в технологическом проектировании обуславливает применение аналитического и имитационного моделирования с целью синтеза таких технологических процессов, которые обеспечивали бы с достаточной вероятностью требуемые выходные параметры. Принцип работы программного комплекса заключается в проведении машинных экспериментов по нагружению исследуемой детали внешними сосредоточенными радиальными силами (рисунок 6).

Решение задачи равновесия позволяет прогнозировать выходные параметры точности рабочих поверхностей при обработке реальных деталей, а также рекомендовать режимы обработки и целенаправленного локального воздействия на деталь для исправления имеющихся отклонений формы от номинала.

Сравнение результатов, полученных средствами системы имитационного моделирования, и реальных экспериментов подтверждает эффективность применения моделирования с целью гарантированного назначения режимов и координат воздействия ЛППД для уменьшения отклонений формы высокоточных неравножестких деталей типа корпуса гидропривода. Результаты экспериментальной проверки показывают устойчивость деталей после воздействия на них ЛППД к релаксации внутренних напряжений и колебаний температуры (выле-

живание 1,5 месяца, нагрев до 350°C с выдержкой 3 часа, охлаждение до -15°C с выдержкой 2 часа, вылеживание 1 год).

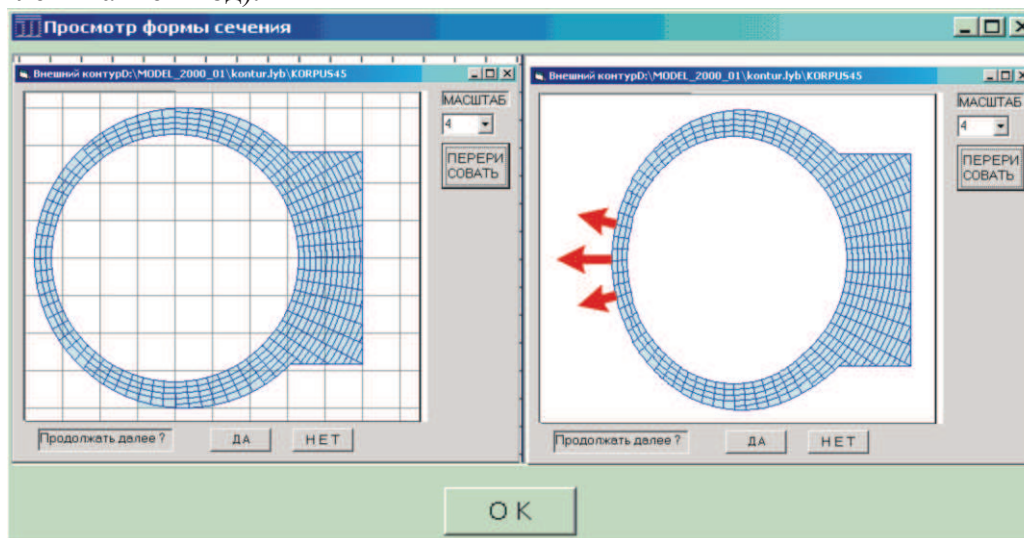


Рисунок 6. Компьютерная дискретизация сечения и координаты проведения ЛППД

Сочетание метода ЛППД и автоматизированной системы моделирования поведения детали позволяет с наибольшей эффективностью использовать такие преимущества этого метода, как высокая производительность, низкая энергоемкость, низкая стоимость, безотходность, применение универсального технологического оснащения. Более широкие технологические возможности ЛППД открываются при применении оборудования с ЧПУ, что позволяет изменять силу воздействия алмазного индентора на деталь по заданной программе, а также задавать сложные траектории движения инструмента.

Выводы

Технология локального поверхностного пластического деформирования алмазным индентором позволяет с высокой точностью управлять процессом формообразования высокоточных поверхностей вращения деталей различной конфигурации, а также в значительной степени уменьшать отклонения формы рабочих поверхностей от круглости, полученные в ходе производства или эксплуатации маложестких кольцевых и цилиндрических деталей.

Применение предлагаемого метода в качестве финишной операции позволило на расчетных режимах ЛППД уменьшить изгиб оси гидроцилиндра на 30÷40 мкм, некруглость рабочих поверхностей корпуса и колец на 50÷80 мкм, что обеспечило требование по точности изготовления прецизионных корпусов гидроагрегатов до 0,01 мм при исключении из технологического процесса трудоемких доводочных и притирочных операций. При этом характер технологического наследования отклонений формы изменился в сторону интенсивного уменьшения данного отклонения и устойчивого сохранения полученных изменений. Эффект исправления отклонений формы достигает 60÷80%. Детали после ЛППД устойчивы к релаксации напряжений и колебаниям температуры.

Преимуществами предлагаемой технологии являются экологическая чистота, высокая производительность, доступное оборудование, быстрая организация производства и перенастраиваемость. Методы целесообразно применять для наиболее ответственных деталей в случаях, когда традиционная технология не обеспечивает требуемого уровня эксплуатационных свойств или является чрезмерно трудоемкой и дорогой. Данная технология разработана для применения в области авиационно-космической техники и транспортного машиностроения.

Литература

1. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / Авт.: А.М.

Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др. / Под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.

2. Хворостухин Л.А., Курицына В.В. Управление параметрами качества прецизионных деталей двигателей летательных аппаратов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2007. № 10. С. 19-28.
3. Курицына В.В. Обеспечение качества ответственных деталей гидроагрегатов поверхностно-пластическим деформированием // Технология машиностроения. 2012. № 10. С. 32-37.
4. Курицына В.В., Лиокумович Д.С., Силюянова М.В. Инструментальные средства MatLab Simulink в системе технологического менеджмента качества точного машиностроения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 1. С. 22-31.
5. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.

Физико-математическое моделирование тепловых режимов термостойких материалов и покрытий

¹Мерзликин В.Г., ¹Максимов А.Д., ²Товстоног В.А., ²Елисеев В.Н., ³Крохалев И.Н
¹ Университет машиностроения, ²МГТУ им. Н.Э. Баумана, ³ЦНИРТИ им. акад. А.И. Берга
8(909)989-55-32 MerzlikinV@mail.ru

Аннотация. Представлена разработка экспериментального теплового стенда для исследований и модельных (близких к натурным) испытаний материалов и покрытий при имитации сложного теплообмена с существенной долей лучистой компоненты в различных типах камер сгорания, при эксплуатации элементов турбин, различных теплоэнергетических устройств, аэрокосмических аппаратов.

Ключевые слова: камера сгорания, радиационно-конвективный теплообмен, натурно-модельные испытания, моделирование спектра и потока излучения, индикаторная диаграмма, тепловой стенд, теплоизолирующие материалы и покрытия.

Улучшение термостойкости теплозащиты элементов теплоэнергетического оборудования, повышение эффективности и сокращение выбросов токсичных газов для двигателей и турбин, высокоскоростных дизельных двигателей в течение длительного периода функционирования является актуальной задачей. Но до сих пор не получила широкого применения корректная оценка параметров сложного теплообмена с существенной долей лучистой компоненты, например, в теплоизолированных камерах сгорания дизелей [1, 2]. Подобная проблема актуальна в других областях машиностроительного производства, например, при разработках авиационных двигателей [3 - 5]. Это предопределяет разработку термобарьерных (теплозащитных, теплоизолирующих) материалов и покрытий как непрозрачных, так и полупрозрачных при сложном теплообмене для теплонагруженных элементов различных теплоэнергетических установок и транспортных средств [4 - 7].

Важным этапом разработок новых и штатных конструкционных материалов является проведение экспериментальных исследований их тепловых режимов в модельных условиях эксплуатации [8 - 11]. С этой целью Университетом машиностроения совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана была разработана установка имитации высокоинтенсивного радиационно-конвективного воздействия, характерного для камер сгорания быстроходных дизельных двигателей [12].

Установка предназначена для диагностики характеристик термостойкости и термостойкости металлов, композиционных и керамических материалов, покрытий, а также возможно применение для создания и обработки керамических и композиционных материалов, например, методом селективного лучевого спекания, а также для нагрева поверхностей различ-