

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Калужский филиал МГТУ имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРИБОРО - И МАШИНОСТРОЕНИИ И РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ВУЗЕ

**Материалы
Всероссийской научно-технической конференции**

Том 1



УДК 378:001.891
ББК 74.58:72
НЗ4

Руководители конференции

А. В. Царьков (директор КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана);
А. А. Столяров (зам. директора по научной работе)

Оргкомитет конференции

А. А. Столяров (председатель оргкомитета);
В. В. Лебедев (ученый секретарь);
Е. Н. Мальшев; Г. В. Орлик; В. В. Андреев; А. А. Жинов;
Ю. П. Корнюшин; А. П. Коржавый; А. И. Пономарев; А. К. Рамазанов;
А. А. Анкудинов; Б. М. Логинов; В. Г. Косушкин; А. В. Мазин; А. А. Шубин;
А. К. Горбунов; Н. Е. Шубин; А. В. Максимов; В. Н. Пащенко;
М. В. Астахов; Е. Н. Сломинская; О. Л. Перерва; В. В. Ильин; В. М. Алакин

НЗ4 **Научное** технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 14 – 16 ноября 2017 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 232 с.

В сборнике материалов Всероссийской научно-технической конференции представлены результаты научных исследований, выполненных учеными в течение ряда лет. Систематизированы материалы различных научных школ. Результатами научных исследований являются новые методы, вносящие вклад в развитие теории, а также прикладные задачи, воплощенные в конструкции и материалы.

УДК 378:001.891
ББК 74.58:72

© Коллектив авторов, 2017
© Калужский филиал МГТУ
им. Н. Э. Баумана
© Издательство МГТУ
им. Н. Э. Баумана, 2017

СЕКЦИЯ 1.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Е.В. Логутенкова, Я.С. Мельников

АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Условия эксплуатации поверхностей деталей машин разнообразны по уровню тепловых и механических нагрузок, а также по виду материала поверхностного слоя. В таких условиях поверхности должны обладать высоким уровнем эксплуатационных свойств для обеспечения необходимой работоспособности изделий [1-4]. Кроме исходного, достигнутого после теплового воздействия комплекса свойств, поверхностные слои деталей должны сохранять твердость при повышении температуры во время эксплуатации, имеет высокую коррозионную устойчивость, иметь высокие характеристики сопротивления хрупкому разрушению при высоких локальных напряжениях [5-8]. Это важная задача, поскольку, создавая определённое структурное, энергетическое состояние и задавая свойства поверхностных слоев путем термообработки, оптимизацией условий механической обработки, можно изменять основные характеристики процесса металлообработки и, в конечном итоге, управлять важнейшими выходными эксплуатационными параметрами процесса – износом поверхностных слоев деталей машин [9-11].

В контактировании поверхностей деталей много не решенных проблем. Что касается геометрических показателей, судя по литературным данным, отклонение от параллельности, плоскостности и т.д., изучено достаточно полно. Однако обладая одинаковыми параметрами шероховатости, описываемыми ГОСТ 2789-73 эксплуатационные характеристики могут отличаться [12-13]. Вполне вероятно, что тремя высотными и двумя шаговыми параметрами шероховатости, предусмотренными в данном ГОСТе нельзя достаточно полно отразить микрогеометрическое состояние поверхности. В 2016 году в РФ впервые вступил в силу национальный стандарт ГОСТ Р ИСО 4287-2014 «Геометрические характеристики изделий (GPS)».

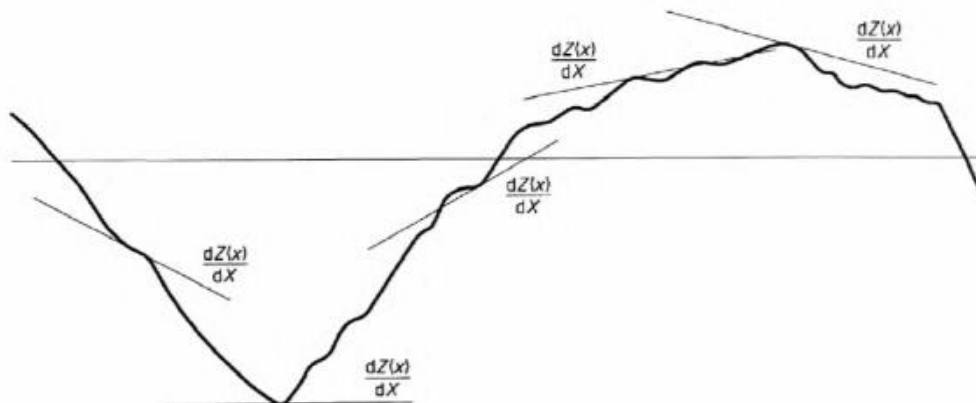


Рис.1. Местный угол наклона профиля

Он устанавливает термины, определения и параметры для оценки структуры поверхности (шероховатостью, волнистость и первичный профиль) при помощи методов профилирования.

В частности, он вводит ряд дополнительных терминов, например, местный угол наклона dz/dx (Рис.1) – наклон оцениваемого профиля в положении x_i

Кроме того, предлагается еще ряд параметров, таких как P_t , R_t , W_t , Z_p и др.

Современному исследователю при описании шероховатости поверхностей, получаемых различными технологическими операциями следует использовать методику данного ГОСТ. Это дает предпосылки для целого ряда новых исследований по влиянию технологий, оборудования и оснастки на формирование геометрических характеристик изделий.

Следовательно, можно разрабатывать обоснованные инженерно-технические мероприятия по технологическому обеспечению требуемой геометрической характеристики поверхностей деталей машин.

Список литературы

[1] Калмыков В.В., Федорова О.С. Основные статистические методы анализа результатов экспериментов // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 1 (5). С. 68-75.

[2] Калмыков В.В., Космынина Е.В., Сорокин П.С. Выбор методов оценки точности технологических процессов // Инженерный вестник. 2012. № 8. С. 4.

[3] Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В. Выбор метода для автоматизации контроля состояния режущего инструмента // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 3 (7). С. 53-55.

[4] Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Федоров В.А. Влияние шероховатости исходной поверхности на силу алмазного выглаживания // Машиностроение и компьютерные технологии. 2014. № 12. С. 171-180.

[5] Калмыков В.В., Барков А.В. Аналитическое и статистическое оценивание упругих деформаций при фрезеровании по контуру // Фундаментальные исследования. 2016. № 8-1. С. 34-38.

[6] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Авраменко М.Ю. Технологические предпосылки повышения эксплуатационных характеристик направляющих элементов // Фундаментальные исследования. 2016. № 8-1. С. 55-58.

[7] Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N. Experimental research of variability of surface energy value of Fe37-3FN, C45 and 41Cr4 steels // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 17. С. 6428-6433.

[8] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Савина Ю.А. Математическое моделирование качественных характеристик при обработке конструкционных материалов на основе железа // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 5. С. 74-77.

[9] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Герасимова Н.С., Малышев Е.Н. Остаточные напряжения в энергетической теории процесса схватывания поверхностей деталей машин // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 12-2. С. 311-314.

[10] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Малышев Е.Н., Антонюк Ф.И. Влияние технологического воздействия на энергетическое состояние поверхностного слоя деталей // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1-1. С. 59.

[11] Калмыков В.В., Мусохранов М.В., Логутенкова Е.В., Герасимова Н.С. Энергия поверхностей в формировании сопряжений при сборке изделий // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 5-2. С. 249-252.

[12] Зенкин Н.В., Щелупова О.А. Исследование влияния технологических факторов на качество поверхности обработанной фрезами с двумя режущими кромками // *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2012. № 8. С. 1.

[13] Мусохранов М.В. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя направляющих элементов машиностроения: дисс. канд. техн. наук – М. 2006. – С. 65.

Логутенкова Екатерина Владимировна – старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: iwtbhn@mail.ru

Мельников Ярослав Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: melnickov.yar2017@ya.ru

Е.Н. Малышев, Е.Д. Степанов

ВИДЫ УНИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕССОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В современном машиностроении, где при общей сложности производимой продукции и большой номенклатуре сходных по конструкции изделий, появляется необходимость и в большом количестве конструкторской документации. Это приводит к увеличению загруженности инженеров помимо разработки изделий и ведения большого количества сопроводительной документации. Следовательно, возникает необходимость внедрения научнообоснованных подходов и методик, позволяющих уменьшить трудоемкость конструкторско-технологической подготовки производства. Одним из таких методов является метод написания унифицированных технологических процессов, которые представляют собой один технологический процесс на группу изделий, близких по конструкции и выполняющих одинаковые задачи.

Существуют следующие виды технологической унификации:

- Типовая
- Групповая
- Модульная

Первым видом технологической унификации была типовая. Разработка типовых процессов базируется на классификации изделий. Класс представляет собой множество изделий схожей конструкции, связанных общностью технологических задач. Изделия одного класса собирают по типовым технологическим процессам, которые характеризуются единообразием содержания и последовательности выполнения большинства технологических переходов. Типовые технологические процессы для обработки классов конструктивно подобных заготовок предложил проф. А. П. Соколовский [1].

Этот вид унификации получил наибольшее распространение в авторемонтном производстве в виде типовых технологических процессов листовой штамповки, нанесения металлических и лакокрасочных покрытий, обработки заготовок резанием и сборки.

Групповая обработка устанавливает идентичные способы обработки заготовок с одинаковыми технологическими, но разными конструктивными признаками с использованием быстропереналаживаемых средств технологического оснащения. Групповую обработку заготовок предложил проф. С. П. Митрофанов [2].

Сущность модульной технологии заключается в создании процессов из блоков (модулей), сочетание которых определяется конкретными задачами и условиями производства. Модульная технология основана на представлении детали совокупностью геометрических модулей, под которыми понимают сочетание поверхностей, предназначенных для совместного выполнения служебной функции. Модульный принцип формирования техники разработал проф. А. Л. Васильев, а модульную технологию предложил и развил проф. Б. М. Базров [3].

Уровень специализации машиностроительных объединений и предприятий и их подразделений определяется сочетанием двух основных факторов – объемом производства и трудоемкостью продукции, которые во многом определяют и организационно-производственную структуру предприятия. Существует ряд исследований, посвященных вопросам унификации технологических процессов [4–10]. Можно выделить три типа машиностроительных объединений и предприятий, специализирующихся на выпуске готовых изделий:

- Предприятия с полным технологическим циклом, располагающие всей совокупностью заготовительных, обрабатывающих и сборочных цехов
- Предприятия механосборочного производства, получающие необходимые заготовки в порядке кооперирования с других заводов
- Предприятия сборочного типа, выпускающие готовые изделия из деталей, изготовленных на других предприятиях

Применение модульных технологий наиболее эффективно при подготовке многономенклатурного производства. Это позволяет широко использовать отдельные средства и процессы при ремонте сложной техники.

На предприятии ОАО «КАДВИ» одним из производимых агрегатов является топливный насос, который имеет четыре модификации базирующихся на конструктивно подобных или идентичных элементах. Эти четыре модификаций делятся, в свою очередь, на пять подтипов необходимых для выполнения определенных задач. Внутри модификации подтипы достаточно идентичны по конструкции. В данных насосах идентичными являются такие элементы как клапаны, прокладки, крепежные элементы, электронные датчики. Различия между моделями заключается в наличии или отсутствии рабочих узлов, представляющих из себя корпусную деталь с установленными в неё типовыми датчиками и электроаппаратурой.

Написание такого количества технологических процессов трудозатратный процесс, а их хранение потребует определенного места в техническом отделе. Вследствие этого для них целесообразно написание типового технологического процесса сборки.

Список литературы

[1] Соколовский А.П. Курс технологии машиностроения. Ч. 1. Общие вопросы технологии механической обработки: учебник для втузов /А.П. Соколовский; М.; Л., 1947.

[2] Митрофанов С. П. Научные основы организации группового производства. – М.-Л., 1963. – 308 с

[3] Базров Б. М. Модульная технология в машиностроении. М. Машиностроение, 2001.

[4] Бысов С.А., Малышев Е.Н. Выявление и анализ организационно-технологических факторов, влияющих на результативность технологических систем, организованных на основе концентрации обрабатывающих и сборочных процессов // Машиностроение и компьютерные технологии. 2012. № 3. С. 3.

[5] Малышев Е.Н., Бысов С.А. Реализация комплекса операций обработки и сборки на одном станке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 1. С. 14-21.

[6] Малышев Е.Н., Бысов С.А. Обоснование принятия решения о концентрации обработки и сборки на одном станке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 11. С. 41-46.

[7] Малышев Е.Н., Малышев А.Н. Повышение эффективности использования обрабатывающего оборудования путем расширенной реализации его технологических возможностей // Инженерный вестник. 2012. № 8. С. 3.

[8] Малышев Е.Н., Бысов С.А. Создание автоматизированных технологических систем на основе концентрации обрабатывающих и сборочных процессов // Автоматизация. Современные технологии. 2012. № 4. С. 26-32.

[9] Малышев Е.Н., Калмыков В.В., Золотайкина А.В., Малышев И.Е., Крюков М.В. Проектирование средств оснащения сборочных операций на основе анализа сборочных связей // Фундаментальные исследования. 2016. № 4-3. С. 512-516.

[10] Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N. Experimental research of variability of surface energy value of Fe37-3FN, C45 and 41Cr4 steels // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 17. С. 6428-6433.

Малышев Евгений Николаевич – канд. техн. наук, зав. кафедрой КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1.kf@yandex.ru

Степанов Евгений Дмитриевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 20jenya04@mail.ru

Т.Ю. Карабахина, В.Г. Карабахин

ВОЗДЕЙСТВИЕ МЕТОДОВ ЗАКРЕПЛЕНИЯ НА МАТЕРИАЛ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ В ТРУБНЫХ РЕШЕТКАХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В современном судостроении, химическом и энергетическом машиностроении теплообменная аппаратура неотъемлемый элемент энергетических установок, основным конструктивным узлом которой является соединение труба – трубная решетка. Теплообменные аппараты, работающие с химически агрессивными средами, изготавливают из титановых сплавов с применением тонкостенных труб.

Для закрепления труб в трубных решетках теплообменных аппаратов разработано достаточно большое количество методов. Наиболее широкое применение в промышленности при изготовлении теплообменного оборудования ответственного назначения получили методы механической развальцовки, раздачи с применением источников импульсного давления, гидрораздачи, прессовой раздачи упругим элементом.

Несмотря на широкую известность и продолжительность применения этих способов в промышленности, а также существующие рекомендации по их использованию, в литературе фактически отсутствуют сведения о характере воздействия методов закрепления на материал трубы и трубной решетки теплообменных аппаратов. Силовое воздействие этих методов определяет прочность закрепления труб в трубных решетках, оказывает значительное влияние на возникновение внутренних напряжений в материале и на величину деформации самой трубной решетки.

В настоящей работе представлены результаты исследования воздействия методов закрепления на материал трубы и трубной решетки в зоне закрепления тонкостенных труб из титановых сплавов. В качестве способов закрепления использовали механическую развальцовку[1], раздачу энергией взрыва детонирующим шнуром[2] и прессовую раздачу упругим элементом [3]. Крутящий момент, тип заряда и рабочее давление при закреплении труб выбирали исходя из условия обеспечения степени раздачи трубы в диапазоне 4÷7%. При этом проводили сравнительный анализ микроструктуры, микротвердости.

Анализ полученных замеров значений микротвердостей показывает, что применение и механической развальцовки, и энергии взрыва привело к увеличению микротвердости материала трубы и трубной решетки в зоне закрепления на 8%. Этот факт подтверждает изменение и механических свойств материала [4] [5]. При использовании метода прессовой раздачи упругим элементом изменений микротвердости не зафиксировано.

Микроструктура металла на участках труб, не подвергавшихся деформации в процессе закрепления, представляет собой полиэдрические зерна α -фазы с темной оторочкой β -фазы отдельных зерен.

В микроструктуре металла труб в области, подвергавшейся деформации в процессе закрепления методами механической развальцовки и с использованием энергии взрыва отмечено наличие значительного количества пластин α -фазы внутри зерен, имеющие оторочку β -фазы, так называемых двойников. Наличие двойников является свидетельством, что материал находится в состоянии наклепа, т.е. претерпел пластическое деформирование.

Микроструктура труб, закрепленных с использованием метода прессы раздачи упругим элементом на деформированных участках не имеет существенных отличий от исходной структуры участков, не подвергавшихся деформации. Таким образом, в зоне закрепления труб в трубных решетках с использованием метода механической развальцовки или применением источников импульсного давления приводит к локальному изменению механических свойств и структурной неоднородности материалов. При закреплении труб в трубных решетках с использованием метода прессы раздачи упругим элементом таких изменений не выявлено.

Список литературы

[1] Юзик С.И. Развальцовка труб в судовых теплообменных аппаратах. – Л.: Судостроение, 1978. – 144с.

[2] ГОСТ 23691-79 – ГОСТ 23693-79. Соединение труб с трубными решетками и коллекторами теплообменных аппаратов. Запрессовка труб с применением источников импульсного давления. – Введ. 01.01.1981. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 64 с.

[3] Пат. 118893 РФ, МПК В21D39/06. Устройство прессы раздачи труб в отверстиях трубных решеток/ В.Г. Карабахин, Т.Ю. Карабахина – Изобретения. Полезные модели. – 2012. – №22.

[4] Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.

[5] Вульф Б.К., Ромадин К.П. Авиационное металловедение. – М.: Оборонгиз, 1962. – 504с.

Карабахина Татьяна Юрьевна – ст. преподаватель кафедры "Технологии обработки материалов" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: karabakhina@ya.ru

Карабахин Владимир Геннадиевич – канд. техн. наук, начальник бюро ОАО КТЗ. E-mail: karabakhina@ya.ru

А.Н. Малышев, С.А. Бысов, О.В. Макеева

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ СИЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЗАГОТОВКУ ПРИ ВЫТЯЖКЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Совершенствование процессов обработки металлов давлением предполагает постоянную их интенсификацию, разработку новых прогрессивных схем пластического деформирования металлов, что позволит снизить трудозатраты на производство изделия в целом, повысить качество при снижении материалоемкости процесса. Одним из направлений совершенствования является силовая интенсификация, которая заключается в приложении дополнительных силовых воздействий на заготовку или ее часть, что ведет к изменению напряженно-деформированного состояния в очаге пластической деформации за счет изменения граничных и контактных условий и увеличению предельно допустимой степени деформации заготовки за один переход.

Для реализации операции «вытяжка» применяются следующие способы дополнительного силового воздействия на заготовку: прижим части заготовки; боковой подпор при первом и последующих переходах; прижим и проталкивание при первом переходе; прижим, проталкивание и боковой подпор при первом и последующих переходах (в том числе при вытяжке с утонением) [2].

Одним из самых распространенных и доступных для реализации является способ передачи дополнительного силового воздействия на заготовку посредством прижима при выполнении операции «вытяжка». Режим дополнительного силового воздействия, особенно динамика его изменения в процессе деформирования, существенно влияет на протекание процесса вытяжки. Например, при завышенном усилии прижима процесс вытяжки будет сопровождаться разрывами материала, при недостаточном же усилии будет наблюдаться гофрообразование, что тоже приведет к потере устойчивости вытягиваемой детали. При вытяжке часто происходит потеря устойчивости на сжатых и сжато-растянутых участках листовой заготовки в виде волнистости, что приводит к искажению формы изделия и последующему разрушению. Листовой материал, полученный прокаткой, обладает анизотропией механических свойств, и согласно исследования [8], где используя энергетический метод разработан критерий потери устойчивости в виде складкообразования при вытяжке заготовок из анизотропного материала, показано влияние технологических параметров и анизотропии механических свойств материала заготовки на образование складок при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала.

Исследования по управлению усилием прижима в ходе реализации операции «вытяжка» привели к становлению целого направления в листовой штамповке – пульсирующей вытяжки, где усилие прижима периодически варьировалось от максимального значения до нуля и обратно [5], что позволило увеличить степень вытяжки по сравнению с общепринятой схемой штамповки.

Известен процесс вытяжки [2] с преднамеренным гофрированием и разглаживанием фланца. При пульсирующем режиме работы прижима допустимый коэффициент вытяжки составляет 2,5–2,9, а высота деталей, получаемых за одну многопереходную операцию, в 2–2,5 раза больше, чем при обычной вытяжке. Наиболее эффективно пульсирующую вытяжку применять при штамповке деталей коробчатой формы, при изготовлении которых допустимый угловой коэффициент вытяжки достигает 10,0–12,5, в то время как при обычной вытяжке он составляет 2,9–3,3. Это позволяет существенно сократить число операций – вместо трех-четырёх операций можно получать требуемую деталь за одну, осуществляемую в условиях пульсирующего режима [1].

Дополнительное силовое воздействие, которое передается на заготовку через прижим, может создаваться посредством упругих элементов конструкции непосредственно штампа (резина, полиуретан, пружины, газовые цилиндры и т.д.) либо посредством передачи усилия от узлов пресса («подушки ползуна» или «нижней подушки» пресса). В первом случае силовой режим работы прижима может быть с определенной точностью рассчитан, однако практически быть слабо управляемым по ходу движения деформирующей поверхности. При передаче усилий на прижим от узлов пресса прогрессивные технические решения и конструктивные особенности современных механических прессов позволяют развивать высокие усилия «нижней подушки» и обеспечивать контроль регулирования силы прижима с высокой точностью для обеспечения оптимального режима пластической деформации материала; к тому же «нижняя подушка» имеет возможность перемещения в режиме «предускорение», что позволяет избежать удара верхней и нижней частей при смыкании штампа, посредством выравнивания скоростей ползуна и рабочих органов «нижней подушки»[3].

В настоящее время современное штамповочное производство начинает осваивать новое поколение прессового оборудования – сервопрессы, которые позволяют совмещать скорость и усилие, используя для этого кривошипный привод, причем функциональность механического пресса приобрела все возможности гидравлического привода, сохранив при этом производительность механического пресса; к тому же позволяют программировать зависимость «усилие-перемещение» под конкретные задачи [7]. Основной особенностью прессов с сервоприводом является уменьшение силы инерции маховика и его замена прямой муфтой между основным двигателем пресса и трансмиссией ползуна. Упрощение механизма транс-

миссии в комбинации с передовой системой управления, а также использование серводвигателей высокой мощности обеспечивают преимущества сервопрессов в процессах, где положение и скорость ползуна должны контролироваться в режиме реального времени [9].

Развитие современной технологии обработки материалов давлением предполагает совершенствование известных и разработку новых схем и приемов дополнительного силового воздействия на заготовку, а также требует исследования параметров силового режима формообразующих операций с учетом анизотропии материала и прогрессивных возможностей современного кузнечно-прессового оборудования.

Список литературы

[1] Богуславский Б.З., Сизов Е.С., Шальнев А.Е., Рогожников и др. Пульсирующая вытяжка листовых деталей с чередованием деформирования кольцевых участков фланца заготовки. Москва-Пермь. Изд.: РАЕН. Западно-Уральское отделение. 1996г.

[2] Казаченок В.И. и др. Разработка и исследование эффективных способов формоизменения в процессах объемной и листовой штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. – 1981. - №2. - С.22-26.

[3] Lauke A. Draw cushions for mechanical presses. Features and developments. // STAMPING Journal. – 2005. - №12. – p. 24-28

[4] Малышев А.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния при вытяжке квадратных коробчатых деталей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 5. С. 16-22.

[5] Норицын И.А. Пульсирующая вытяжка листового металла: Дисс. кан. техн. наук: Москва. – 1946. ДК 48/4883

[6] Попков В.М., Космынина Е.В., Логутенкова Е.В. Изменение размеров заготовки на начальном этапе гидромеханической вытяжки // Инженерный вестник. 2012. № 8. С. 1.

[7] Jun-Kun Lee, Hyun-Cheon Kim. The Optimization of Servo Press Method for Sheet Metal Forming // 13-th International. LS-DYNA Users Conference

[8] Яковлев С.С., Ремнев К.С. Складкообразование при вытяжке осесимметричных деталей из анизотропного материала. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. - №9.- С.39-48.

[9] [Электронный ресурс]: Прессы и штамповочные комплексы. FAGOR. <http://www.fagorarrasate.com> (дата обращения 12.10.2017 г)

Малышев Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 1m-kf.mgtu@inbox.ru

Бысов Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 1m-kf.mgtu@inbox.ru

Макеева Ольга Владимировна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: olechka_poops@icloud.com

В.В. Калмыков, И.Р. Насевич, Н.Г. Букреева

ЗАВИСИМОСТЬ СМАЗЫВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МАСЕЛ ОТ ИХ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одной из основных эксплуатационных характеристик жидких смазочных материалов является смазывающая способность.

Смазывающая способность – это проявление взаимодействия молекул на трехфазной границе: твердой, жидкой и газообразной. Она определяется коэффициентом смачиваемости θ и может быть определена с помощью второго закона капиллярности (смачиваемости) – равенства Юнга (1). На рис. 1 представлена силовая схема краевого угла смачивания.

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{1,3}$ – поверхностное натяжение на границе твердое тело – воздух;

$\sigma_{2,3}$ – поверхностное натяжение на границе твердое тело – жидкость;

$\sigma_{1,2}$ – поверхностное натяжение на границе жидкость – воздух.

Различают смачиваемую (гидрофильную, $\theta < 90^\circ$) и не смачиваемую поверхность (гидрофобную, $\theta > 90^\circ$).

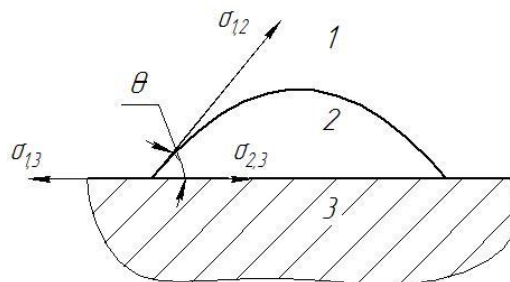


Рис. 1. Факторы определяющие краевой угол смачивания
1 – воздух; 2 – жидкость; 3 – твердое тело

Коэффициентом поверхностного натяжения называется физическая величина, численно равная силе поверхностного натяжения G_S (2), которая действует на линию разрыва единичной длины [1]. Наиболее ярким примером является поверхностное натяжение жидкости на границе с газом.

Поверхностное натяжение – это удельная свободная поверхностная энергия. Оно существует на границе твердых, жидких и газообразных тел. Поверхностное натяжение образуется из-за молекул жидкости, которые находятся вблизи поверхности и, следовательно, имеют избыток потенциальной энергии P , по сравнению с молекулами, которые располагаются внутри жидкости [2; 3].

$$G_S = \sigma \cdot S, \quad (2)$$

где σ – поверхностное натяжение; S – поверхность.

Снижение поверхностного натяжения может наблюдаться при тепловых, механических, химических и электрических процессах.

Наиболее распространенным методом определения поверхностного натяжения является метод счета капель (сталагмометрический метод). Для

определения числа капель пользуются сталагмометром [4]. Он представляет собой стеклянную трубку, заканчивающийся капилляром, из которого исследуемая жидкость вытекает каплями.

Определение поверхностного натяжения этим методом [5] заключается в сравнении количества капель при истечении из сталагмометра исследуемой жидкости и жидкости с известным поверхностным натяжением.

В рамках представляемой работы было измерено поверхностное натяжение масел Lukoil Standart 10w-40 и OILRIGHT ТАД-17и 80w-90. Результат расчетов показал: $\sigma_1 = 34,44 \text{ Н/м}$; $\sigma_2 = 42,47 \text{ Н/м}$ соответственно [6].

После этого, данные масла наносились на подложки из стали 45 и измерялся краевой угол смачивания. Среднее значение этого угла составило $20,37^\circ$ для Lukoil Standart 10w-40 и 22° для OILRIGHT ТАД-17и 80w-90. Подобный анализ проводился и для подложек из других конструкционных материалов. Эксперимент показал прямую зависимость краевого угла смачивания от величины поверхностного натяжения. Результаты экспериментов оценивались согласно методики, описанной в работе [7].

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что масла с наименьшим значением поверхностного натяжения обладают наилучшей смазывающей способностью. Проведенные исследования могут быть полезны при выборе смазывающих веществ, обладающих наилучшей смачиваемостью.

Список литературы

[1] Логинова А.Ю., Герасимова Н.С. Измерение поверхностного натяжения жидкостей / Методические указания по курсу «Спецглавы химии». – Калуга. – 2001. – 15 с.

[2] Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А., Коллоидная химия. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, – 2004. – 445 с.

[3] Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, – 1989. – 464с.

[4] Фролов Ю. Г., Гродский А. С., Назаров В. В., Моргунов А. Ф. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии. – М.: «Химия», под редакцией Ю. Г. Фролова и А. С. Гродского, – 1986. – 216с.

[5] Бурых Г.В. Образование, устойчивость и свойства дисперсных систем: методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Коллоидная химия». – Курск. – 2015. – 16 с.

[6] Калмыков В.В., Мельников Д.А., Горбачева М.С., Сухарева А.А. Исследование зависимости смазываемости конструкционных материалов от величины поверхностного натяжения масел // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 6. С. 47-51.

[7] Калмыков В.В., Федорова О.С. Основные статистические методы анализа результатов экспериментов // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 1 (5). С. 68-75.

Калмыков Вадим Владимирович – ст. преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sorat-vad@yandex.ru

Насевич Илья Русланович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nasevich98@mail.ru

Букреева Наталья Григорьевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tacha.bukreeva.1@gmail.com

А.Г. Вяткин, Е.С.Куделина

ИЗНОС УСТАНОВОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Износ – изменение размеров, формы, массы твердых тел или состояния их поверхностей вследствие либо остаточной деформации от постоянно действующих нагрузок, либо разрушения поверхностного слоя при трении. [1, с. 4]

Изнашивание классифицируется как процесс отделения материала с поверхности твердого тела и увеличения его остаточной деформации. [2, с. 3] Следует отметить, что изнашивание – это прежде всего процесс взаимодействия поверхностей, который сопровождается не только их микрорезанием, деформированием и нагреванием, но также и изменением механических свойств, структуры, фазового состава и химической активности поверхностных слоев.

Принят ряд классификаций по видам износа при трении, построенных в основном на базе внешних условий и признаков процесса.

Виды механического изнашивания:

- абразивное изнашивание - механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц
- гидроабразивное изнашивание (газоабразивное) - абразивное изнашивание в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости (газа),
- гидроэрозионное изнашивание (газоэрозионное) - изнашивание поверхности в результате воздействия потока жидкости (газа),
- кавитационное изнашивание - механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает местное высокое ударное давление или высокую температуру,
- усталостное изнашивание - механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя,
- изнашивание при фреттинге - механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении,
- изнашивание при заедании - изнашивание в результате схватывания, глубинного слоя материала вырывания, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность [2, с. 4-5]

Виды коррозионно-механического изнашивания:

- окислительное изнашивание - коррозионно-механическое изнашивание, при котором преобладает химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой
- изнашивание при фреттинг-коррозии - коррозионно-механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях [2, с. 5]

Виды изнашивания при действии электрического тока:

- электроэрозионное изнашивание - эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока. [2, с. 5]

При эксплуатации установочных элементов усталостный износ окажет влияние после многократных установок и извлечений заготовки из приспособления. Во время работы могут возникать вибрации, вследствие чего закрепленная заготовка и приспособление будут колебаться друг относительно друга и появиться износ при фреттинге. При установке заготовки необработанной базовой поверхностью на опоры окажет влияние износ при заедании. Окислительное изнашивание появится, если приспособление изготовить из конструкционной стали и не защитить поверхность от коррозии.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что больше всего изнашиваются постоянные и регулируемые опоры, у которых контакт с заготовкой осуществляется по малым площадям. Сильно изнашиваются боковые поверхности призм, контактирующие с заготовкой по узкой площади контакта. Менее интенсивно изнашиваются опорные пластины и круглые пальцы. При контакте с необработанными поверхностями заготовок со следами окалина и формовочного песка опоры приспособлений изнашиваются сильнее, чем при контакте с обработанными поверхностями. [3, с. 9] Скорость изнашивания возрастает с увеличением массы заготовки и сдвига по опорам при ее установке в приспособлении. Изнашивание неравномерно во времени и носит местный характер. Опорные пластины больше изнашиваются в середине и с одного края, а пальцы со стороны установки заготовки. [1, с. 19]

Изнашивание опор с малой поверхностью контакта с заготовкой определяется зависимостью:

$$u = \beta_1 N^n \quad (1)$$

где N – число контактов заготовки с опорой, β_1 - константа, определяемая из таблицы 1, n , приближенно равна 0,5. Изнашивание опор с развитой несущей поверхностью протекает более равномерно и определяется следующим соотношением:

$$u = \beta_2 N \quad (2)$$

Данные Таблицы 1 приведены для опор из стали 20, 20Х, 45. Износ опор из стали У8А уменьшается на 10-15%, хромированных – в 2-3 раза и

наплавленных твердым сплавом – в 7-10 раз. При достижении расчетной величины износа опоры меняют или дорабатывают. [1, с. 22]

Таблица 1

Значения коэффициентов β_1 и β_2

| Вид опор | β_1 | Вид опор | β_2 |
|-------------------------|-----------|-----------------------|-------------|
| Со сферической головкой | 0,5-2,0 | С плоской головкой | 0,4-0,8 |
| С рифленной головкой | 0,6-2,5 | Пластинки опорные | 0,002-0,004 |
| Призмы | 0,3-0,8 | Пальцы цилиндрические | 0,001-0,002 |
| Пальцы ромбические | 0,2-0,6 | | |

Определены факторы, влияющие на износ, но характер влияния в процессе эксплуатации математическими или экспериментальными методами не были установлены. Были выведены математические зависимости между износом и количеством установок и даны рекомендации (Таблица 1), но величина разброса коэффициентов β_1 и β_2 очень велика, а также нет конкретных рекомендаций в каком случае какой коэффициент брать для расчета. Исходя из вышеизложенного, существует необходимость определения влияния конкретного фактора на величину критического износа в течение времени для надежного прогнозирования износа в процессе эксплуатации.

Список литературы

[1] Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений. – Москва. Машиностроение. 1983. – 277с.

[2] ГОСТ 27674-88, Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения

[3] Под редакцией Вардашкина Б.Н. и Шатилова А.А. Станочные приспособления: Справочник в двух томах. Том 2. – Москва. Машиностроение. 1983. – 653с.

Вяткин Андрей Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: and-vyatkin@mail.ru

Куделина Екатерина Сергеевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivan4enko.katerina@gmail.com

В.В. Калмыков, В.Н. Атрощенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время, когда машиностроительная промышленность развивается быстрыми темпами, немаловажную роль играет жизненный цикл продукции. Основные этапы жизненного цикла продукции: разработка, производство, эксплуатация, утилизация. Необходимо уменьшать время на разработку, производство и утилизацию, при этом увеличивать время эксплуатации. На срок эксплуатации напрямую влияет износостойкость деталей, входящих в изделие. Увеличение износостойкости приводит к более длительному периоду эксплуатации изделия до ремонта. Существуют следующие виды естественного износа: механический, молекулярно-механический и коррозионно-механический. Наиболее важным в машиностроении является молекулярно-механический износ, т.к. он происходит при схватывании частиц между собой с разрушением связи между ними. Например, зубчатые передачи. Среди методов улучшающих износостойкость поверхностей наиболее распространены технологии нанесения тонких покрытий на поверхности изделий. Кроме того, они улучшают коррозионную стойкость и придают поверхности декоративный вид.

Несмотря на высокий уровень развития в области машиностроения, в технической литературе недостаточно внимания уделено влиянию способа получения поверхности до нанесения тонких покрытий на износостойкость. Существует ряд исследований, показывающих влияние микрогеометрии поверхностей на эксплуатационные свойства [1; 2]

В таблице 1 приведены данные о качественной взаимосвязи эксплуатационных свойств поверхностей с геометрическими параметрами их шероховатости [3].

Таблица 1

Взаимосвязи эксплуатационных свойств поверхностей с геометрическими параметрами их шероховатости

| Эксплуатационные характеристики | Ra | R _{max} | S |
|---------------------------------|----|------------------|---|
| Износостойкость | + | + | + |
| Коэффициент трения | + | + | + |
| Усталостная прочность | + | + | |
| Прочность посадок | + | + | |
| Коррозионная стойкость | + | + | + |
| Контактная жёсткость | + | + | + |
| Трение в вакууме | + | + | + |
| Сопrotивление схватыванию | + | + | + |
| Теплоотражение | + | + | |

На параметры шероховатости обработанных поверхностей деталей машин оказывают влияние технологические факторы: геометрия инструмента, режимы резания, схема формообразования, материал заготовки и инструмента и т.п. В ряде работ [4-7] показано, что при идентичных параметрах шероховатости эксплуатационные свойства деталей из одного материала могут отличаться. Разные виды технологического воздействия формируют разный уровень остаточных напряжений, микротвердости, поверхностной энергии и др.

В рамках данной работы планируется проведение эксперимента для определения степени влияния параметров поверхностей с идентичной шероховатостью на износостойкость. Экспериментальная установка, представленная на рисунке 1, основана на идее предложенной Ю.Г. Шнейдером в работе [8].

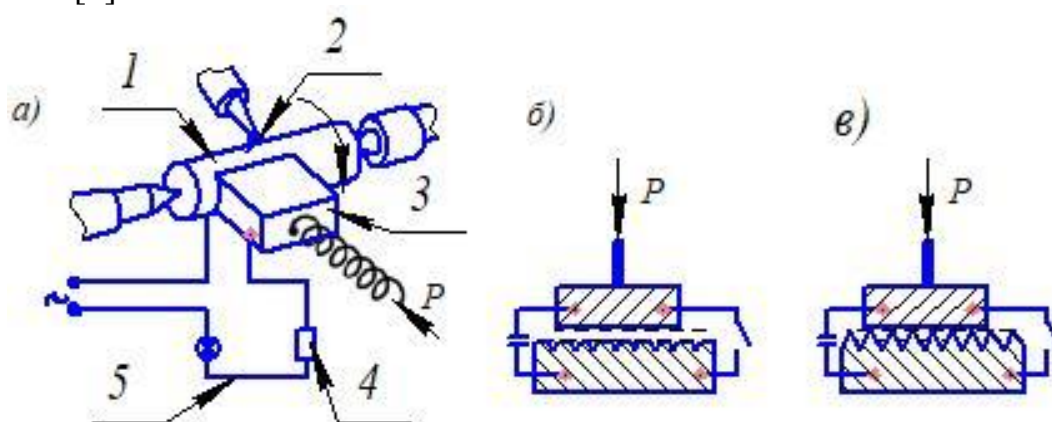


Рис. 1. Схема испытания трущихся поверхностей на приработку

Сущность способа состоит в том, что испытуемые образцы 1 и 3 (рис. 1, а), электрически связанные с сигнальным устройством 5 и регистрирующим прибором 4, подвергаются трению исследуемого вида в условиях обильной подачи смазывающей жидкости 2 в зону контакта образцов. В начальный момент контакты испытуемых образцов электрической цепи сигнального и регистрирующего устройств замкнуты (рис. 1, б), загорается сигнальная лампа, включаются электрочасы. В момент окончания приработки, когда опорные поверхности трущихся образцов настолько возрастут, что исходное давление окажется недостаточным, чтобы прорвать образовавшуюся между ними масляную пленку, контакт между ними нарушается и выключается сигнальная лампа и электрочасы (рис. 1, в).

Износ определяется по изменению массы образцов, высоты исходных неровностей и диаметрального размера образцов. Будет установлена зависимость длительности приработки и приработочного износа от способа обработки поверхности перед нанесением покрытий.

Таким образом, теоретически и экспериментально будет определён вклад влияния геометрических параметров шероховатости, полученных разными методами обработки поверхностей, на износостойкость.

Список литературы

[1] Маталин А. А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности “Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты”. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с., ил.

[2] Суслов А.Г. Технология машиностроения: учебник. – М.: КНО-РУС, 2013. – 336 с.

[3] Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N. Experimental research of variability of surface energy value of fe37-3fn, c45 and 41cr4 steels // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 17. С. 6428-6433.

[4] Мусохранов М.В., Антонюк Ф.И., Калмыков В.В. Поверхностная энергия и процесс схватывания контактирующих поверхностей // Машиностроение и компьютерные технологии. 2014. № 11. С. 45-51.

[5] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Герасимова Н.С., Малышев Е.Н. Остаточные напряжения в энергетической теории процесса схватывания поверхностей деталей машин // Фундаментальные исследования. 2015. № 12-2. С. 311-314.

[6] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Малышев Е.Н., Зенкин Н.В. Энергия поверхностного слоя металлов как инструмент воздействия на величину коэффициента трения // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-2. С. 251-254.

[7] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Авраменко М.Ю. Технологические предпосылки повышения эксплуатационных характеристик направляющих элементов // Фундаментальные исследования. 2016. № 8-1. С. 55-58.

[8] Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 247 с.

Калмыков Вадим Владимирович – ст. преподаватель кафедры “Технологии машиностроения” КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sorat-vad@yandex.ru

Атрощенко Виктор Николаевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: atroschenkoviktor@gmail.com

Р.О. Ермачков, Ф.И. Антонюк

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБОВ НАЛАДКИ НА ТОЧНОСТЬ РАЗМЕРОВ ЗАГОТОВОК ПРИ ОСАДКЕ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОМ ПРЕССЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Для основных формоизменяющих операций холодной объёмной штамповки, выполняемой на прессах, применяют штучные заготовки. Как правило, в целях экономии материала такие заготовки отрезают заведомо большей длины и меньшего диаметра, после чего производят осадку. Осадка – наиболее распространённый метод увеличения диаметра заготовки и уменьшения её длины перед основной формоизменяющей операцией холодной объёмной штамповки [10].

Главным показателем, характеризующим процесс формоизменения при осадке, является бочкообразность боковой поверхности осаживаемого цилиндра, которая возникает в результате действия сил трения на торцах цилиндра.

Количественной оценкой данного параметра может служить разность наибольшего диаметра выпуклости в срединном сечении (d_σ) и наименьшего – (d_κ) – на контактной поверхности торцов осаживаемой заготовки с плоской плитой. (рис.1).

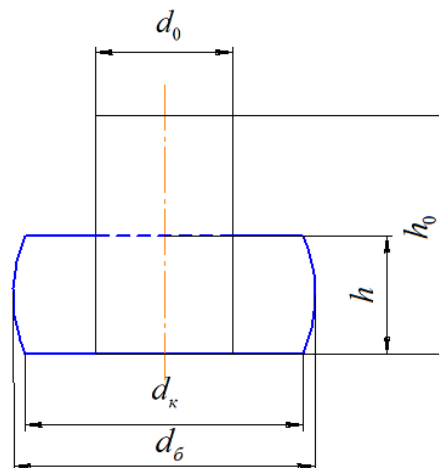


Рис. 1. Параметры формоизменения цилиндрической заготовки в процессе осадки

Явление бочкообразования подробно изучено на теоретическом и экспериментальном уровне для условий горячей штамповки. В частности, определены влияние степени деформации осажённых заготовок и их относительной длины на величину бочкообразности, установлены некоторые зависимости между этими параметрами [12].

Изучение процесса бочкообразования при холодной осадке также находит отражение в работах исследователей [1-3]. В ходе экспериментов были изучены факторы, влияющие на точность осажённых заготовок, рассмотрена форма поверхности поковок после осадки, разработаны некоторые способы повышения точности [5-8, 11].

Кроме того, были выявлены степень и характер влияния относительной высоты ($\frac{d}{h}$), степени деформации исходных заготовок ($\varepsilon = 1 - h/h_0$), скорости деформирования (v), коэффициента контактного трения (μ) на исследуемую величину относительной бочкообразности осаживаемых поковок [4].

На основе выполненных многофакторных экспериментов с помощью регрессионного и дисперсионного анализа определена эффективность повышения скорости деформирования для уменьшения бочкообразования холодной осадки цилиндрических заготовок. Данная скорость во многом зависит от выбора пресса, на котором будет происходить деформирование.

Осадку может производиться на различных типах прессов (кривошипных, гидравлических и винтовых).

Перед началом процесса осадки необходимо произвести наладку технологической системы. Способ наладки – один из менее изученных факторов, влияющих на точность размеров при осадке. При наладке любой технологической системы неизбежно возникает погрешность наладки, так как нельзя каждый раз добиться одного и того же значения регулируемого параметра. Наладка любого пресса заключается в установлении основного параметра, при котором размеры штампуемых поковок находились бы в пределах, ограниченных полем допуска.

В статье [9] изучено влияние наладки винтового пресса на точность высотных размеров поковки при осадке. В результате исследований были сделаны выводы, что с увеличением жёсткости поковок влияние погрешности наладки на точность высотных размеров повышается, то есть при осадке жёстких поковок точности наладки надо уделять особое внимание.

Однако, как было сказано выше, скорость деформирования оказывает значительное влияние на точность осадки, соответственно при разном выборе пресса точность размеров осажённых заготовок будет разной. Исходя из этого, можно предположить, что и способ наладки пресса будет оказывать существенное влияние на точность размеров (как высотных, так диаметральных) заготовок.

Таким образом, целью моей работы будет исследовать влияние способов наладки на точность размеров заготовок при осадке на гидравлическом прессе. По этой причине планируется провести ряд экспериментов, выполнить регрессионный и дисперсионный анализ и на их основе сделать выводы по данному вопросу. Для реализации поставленных задач для начала нужно будет выделить факторы, которые будут влиять на погрешность размеров осажённой заготовки.

Список литературы

- [1] Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г., Точность холодной осадки цилиндрических заготовок //КШП.ОМД. – 2000. №10. С.16-21.
- [2] Антонюк Ф.И., Зенкина И.А., Кузнецов И.В. Повышение точности диаметральных размеров цилиндрических поковок при холодной осадке // Фундаментальные исследования. 2017. № 2. С. 9-15.
- [3] Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Мкртчян А.Б. Применение статистических методов анализа к оценке изменения диаметра цилиндра при холодной осадке // Фундаментальные исследования. 2016. № 8-1. С. 9-13.
- [4] Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Сорокина И.И., Формоизменение цилиндрических заготовок при холодной осадке на кривошипном и гидравлическом прессах // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. №6. С. 13-18.
- [5] Антонюк Ф.И., Кузнецов И.В., Мкртчян А.Б. Оценка формы боковой поверхности цилиндрических заготовок из меди м1 при холодной осадке // Фундаментальные исследования. 2017. № 7. С. 9-14.
- [6] Антонюк Ф.И., Логутенкова Е.В. Верхняя оценка удельных сил холодной штамповки выдавливанием стержневых изделий с фланцами // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 49.
- [7] Антонюк Ф.И., Логутенкова Е.В., Малышев А.Н. Параметры формоизменения стержневых изделий с фланцами при закрытой осадке с выдавливанием // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. №3. С. 18-22.
- [8] Антонюк Ф.И., Логутенкова Е.В., Малышев А.Н. Анализ точности холодной штамповки выдавливанием стержневых изделий с фланцами на кривошипных прессах // Фундаментальные исследования. 2015. № 4-0. С. 11-15.
- [9] Вяткин А.Г., Матвеев С.В., Влияние погрешности наладки винтового пресса на точность высотных размеров поковки при осадке// Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. №7. С. 22-25.
- [10] Ковка и штамповка: справочник. В 4-х т. Т.3 Холодная объемная штамповка/ под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. – 384с.
- [11] Логутенкова Е.В., Антонюк Ф.И. Повышение точности стержневых поковок с фланцами, изготавливаемых холодной штамповкой выдавливанием на гидравлических прессах // Фундаментальные исследования. 2015. № 12-3. С. 468-473.
- [12] Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства: учеб. Для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Машиностроение, 1987. – 384 с.

Ермачков Роман Олегович – студент КФ МГТУ имени Н.Э. Баумана. E-mail: don.ermachskow2015@yandex.ru

Антонюк Феликс Иванович – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: antonyukfi@yandex.ru

И.В. Лаковщикова, И.В. Баранникова, Е.В. Логутенкова

ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ МЕТРА КАК МЕРЫ ДЛИНЫ И ЭТАЛОНА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

На протяжении всей истории развития человеческой цивилизации, разными народами использовались собственные меры длины. С ростом численности населения и расселения на обширные территории возникали товарные отношения. Требовались идентичные меры веса, длины, расстояний и т.п. Например, японский «лошадиный башмак» - это время, в течение которого у лошади могла износиться соломенная подкова; сибирская «бука» это расстояние, на котором человеческий глаз перестает различать рога быка; древние арабы эталоном длины считали волос из ослиной морды; греческий «стадий» - величина, пройденная спокойным шагом за интервал времени от начала восхода до полного появления солнца над горизонтом; персидский «фарсах» - расстояние, которое можно преодолеть пешком за час; «несколько дней пути». Приведенные выше примеры указывают на исключительно индивидуальный характер и зависят от огромного ряда факторов [2].

В период Киевской Руси для поддержания единства практических значений использовались «образцовые меры», которые являлись собственностью князей, как пример - «золотой пояс» князя Святослава Ярославовича: «Се мера и основание»

Наиболее востребованным и широкоупотребляемым «измерительным прибором» давних времен являлись части тела человека и его физические возможности: ступень, пядь, сажень, фут, дюйм, шаг, горсть, локоть, обхват, что подтверждается конкретными примерами литературы, описывающей жизнь человека в древности.

Русь от других народов отличалась своими описательными выражениями при определении расстояний – «вержение камня», «полет стрелы», «день пути». Однако эти метафорические значения возможно было применять индивидуально к конкретному источнику, который совершал определенные действия. В летописях указывают и такие как: «поприще» – расстояние, равное 20 верстам, – описывается у православного святого Епифания Премудрого, который жил в конце XIV – начале XV века. «Четверть» – полтора гектара – применялась при царе Иване Грозном [1].

В некоторой степени английская метрическая система была утверждена в России еще в период правления Петра Первого. В то время Петербургская академия наук занялась воссозданием угловых единиц, единиц времени и температуры. Для создания эталонов в работе использовались образцовые меры и копии эталонов туаза и фунта. Интересно, что расстояние между Охотским и Якутским морями по-прежнему так и определялось «парусный побег» или «нартенный ход».

Позднее российская система мер и весов была определена указом при Николае I в октябре 1835 года. Свое согласие на Метрическую конвенцию представители царской России выразили только весной в конце мая 1875 года. И в общем, метрическая система в России определена как обязательная только в 1917 году.

До принятия единой метрической системы в 1917 году Николаем I в России применялись следующие единицы измерения длины: перст – составляет приблизительно 2 сантиметра; палец – чуть более 1 сантиметра; четверть – 17,8 сантиметра; локоть – по разным данным от 38 до 47 сантиметров; фут – около 30,5 сантиметра; сажень – 2,14 метра (было принято деление на косую сажень – 2,5 метра и маховую – 1,76 метра); вершок – примерно 4,5 сантиметра; аршин – 71,12 сантиметра; 1 верста – 1,07 километра [2]. Однако, было ясно, что применение эталонных мер, которые были созданы от каких-либо произвольных вещей, это просто нецелесообразно и неудобно. О важности создания международной единой системы мер неоднократно задумывались высшие умы тех лет. Однако, новаторами в данной области признаются Французы.

Впервые определение «метр» прозвучало в период Великой французской революции во Франции. Буквально взяв из природы, учёные умы того времени придумали использовать единицу измерения длины. Специально образованная комиссия Французской академии наук рекомендовала взять длину одной десятимиллионной расстояния от северного полюса до экватора по поверхности земного эллипсоида на долготе Парижа. В результате полученных измерений выявленную величину назвали метром. После, проводя измерения длины дуги Парижского меридиана между Дюнкерком и Барселоной, изготовили образец (сейчас это именуется эталон) метра в виде платиновой линейки – концевой меры, ширина которой составляла 25 мм, а толщина 4 мм. Сейчас полученный образец называется «архивным метром», поскольку он был сдан в архив Французской республики. Впрочем, вскоре выяснилось, что в результате постоянно возрастающей точности геодезических измерений показания значения метра и конкретной части меридиана, эти так называемые «постоянные» будут расходиться. Здесь следует учесть тот момент, что длина меридианов по определению не может оставаться фиксированной величиной, поскольку смещения полюсов происходят постоянно. Тогда пришли к выводу, что будет нецелесообразно связывать значение меры длины с одной сорокамилионной частью Парижского меридиана. Так метр перестал являться «природной» мерой длины.

В 1870 году Французская Академия наук предложила принять участие всем государствам принять в Международной комиссии по изготовлению образцов метрической системы, которая в перспективе будет использоваться всеми народами. На базе Международной комиссии был создан постоянный комитет, обязанностью которого была проработка создания новых прототипов метра. По мнению комиссии, один из эталонов метра планировалось признать международным, а все остальные распределить между государствами как национальные прототипы, согласно жребия.

Для изготовления эталонов длины была использована иридиевая платина – это был сплав, в состав которого входит около 90% платины и порядка 10% иридия, данный сплав отличается особенно большим удельным весом, способностью противостоять внешнему физическому воздействию и особыми химическими свойствами, которые позволяли не вступать в реакцию с другими веществами. Эталон метра визуально представлял собой стержень, в разрезе напоминающий букву «х». Вблизи концов нейтральной плоскости данного эталона нанесено по 3 штриха. Эталон метра воспроизводил длину «архивного метра» с точностью до 0,001 мм [3]. К эталону добавили еще 4 так называемых эталона–свидетеля, которые были оставлены в Международном Бюро.

В 1889 году на I Генеральной конференции по мерам и весам изготовленный эталон был принят в качестве международного прототипа метра. Всего таких стержней – эталонов было изготовлено 31. Тогда России досталось два эталона, а именно № 11 и № 28, два были оставлены как «эталон–копия» и «эталон–свидетель», а оставшиеся были распределены, как оговаривалось ранее, по жребию между другими странами-участниками I Генеральной конференции. Эталон № 28 стал впоследствии национальным эталоном России, поскольку именно тот наиболее точно был приближен к международному прототипу. Международные прототипы метра помещены в Бретейльский павильон. А в России эталон до сих пор хранится во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в Санкт-Петербурге и используется только в качестве сравнения с ним вторичных эталонов или эталонов-копий (дубликатов) [4].

Метр служит одной из семи основных единиц измерения, входящих в Международную систему единиц (СИ) и является наиболее широко употребляемой системой единиц в мире как в науке, так и в повседневной жизни.

На сегодняшний день стремительное развитие фундаментальных наук требует постоянного совершенствования методологий и измерительных средств, поэтому не вызывает сомнения актуальность вопроса определения меры длины с максимально достижимой точностью.

Список литературы

[1] Голубеев А. В погоне за точностью: единый эталон времени - частоты - длины. Наука и жизнь, 2009, №12 с. 93-99.

[2] Пронкин Н.С. Основы метрологии. Практикум по метрологии и измерениям. Учебное пособие для вузов. Изд-во Логос, 2007, с. 37.

[3] Сергеев А.Г. Метрология. История, современность, перспективы. Учебное пособие. Изд-во Логос, 2011, с. 44-50.

[4] Дьяконов В.П., Афонский А.А. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. Изд-во Солон-пресс, 2017, с. 78-90.

Лаковщикова Иван Витальевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lakovshikov@gmail.com

Баранникова Ирина Викторовна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: barannikova995@gmail.com

Логутенкова Екатерина Владимировна – ст. преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: iwtbhn@mail.ru

В.В. Калмыков, Д.А. Барина, И.В. Кузнецов

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ ОБСЛУЖИВАНИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

На всех этапах развития машиностроения особое внимание уделялось вопросам оптимизации нормирования операций. Это подтверждает большое количество публикаций в специальных журналах на данную тематику [1-8].

Одним из актуальных направлений оптимизации времени обслуживания рабочего места является уменьшение времени замены затупившихся инструментов посредством корректировки режимов резания, которая позволит одновременно менять весь комплект инструментов, с помощью автоматических устройств смены инструментов (АУСИ).

Большинство решений нашли свое применение и в оборудовании, и в инструменте, и в новых схемах технологических операций. Однако, несмотря на разнообразие идей, немногие авторы касались вопросов оптимизации времени обслуживания рабочего места. В частности, в работе [4] исследовали возможности сокращения времени на смену инструмента путем совершенствования конструкций инструментальных магазинов, обеспечивающих высокую скорость работы. Предлагаемая конструкция позволяет существенно повысить быстродействие инструментального магазина при двукратном увеличении его емкости, в пределах существующих габаритов станка. Однако, данное решение требует изменения конструкции инструментального магазина и, следовательно, является дорогостоящим.

Оптимизация по времени смены инструмента рассматривалась в работе Н.Л. Коппини и М.С.А. Батокью [6]. Они установили связь между скоростями резания, обеспечивающими максимальную производительность и минимальную себестоимость процесса механической обработки деталей.

Степанов М.С. и Иванова М.С. разработали математическую модель выбора наивыгоднейших режимов резания для комбинированного осевого инструмента с учетом производственных условий. Полученная модель позволяет находить такое сочетание параметров режима резания, которое удовлетворяет всем трем условиям: минимальное среднеквадратическое отклонение от средней скорости резания; минимальное среднеквадратическое отклонение от средней подачи на оборот и минимальное время обработки при этом, обеспечивая требуемые параметры точности обработки отверстий [5].

В [8] с целью оптимизации режимов резания для станков с ЧПУ типа обрабатывающий центр была разработана математическая модель оптимизации, дающая возможность учитывать зависимость показателей степени от подачи при расчёте скорости резания. Это позволяет определить режи-

Оптимизация вспомогательного времени по представленной методике позволит значительно снизить себестоимость продукции за счет рационального использования дорогостоящих инструментов.

Список литературы

[1] Дибиров С.Ю. Оптимизация режимов резания для станков с числовым программным управлением типа обрабатывающий центр/ Неделя науки: Издательство КИТ, 2015. – 29-38 с.

[2] Калмыков В.В., Космынина Е.В., Сорокин П.С. Выбор методов оценки точности технологических процессов // Инженерный вестник. 2012. № 8. С. 4.

[3] Калмыков В.В., Малышев А.Н., Покровская М.Э. Анализ способов точного позиционирования рабочих органов станков с ЧПУ // Инженерный вестник. 2012. № 7. С. 1.

[4] Рапацкий Ю.Л., Федоренко С.Н. Снижение затрат времени на смену инструмента в многоцелевом станке с ЧПУ на основе применения инструментального магазина новой конструкции/ Севастополь: СевНТУ, 2010. – 229 с.

[5] Степанов М.С., Иванова М.С. Разработка математической модели выбора наиболее выгодных режимов резания комбинированным осевым инструментом/ М.: Технологический аудит и резервы производства, 2015. – 69-72 с.

[6] Coppini N. L., Batocchio M. C. A. Cutting conditions optimization based on expert system 3th CEM-NNE/ Bel m, Brazil, 1994. – P. 564–567.

[7] Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N. Experimental research of variability of surface energy value of Fe37-3FN, C45 and 41Cr4 steels // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 17. С. 6428-6433.

[8] Qudeiri J. A., Yamamoto H., Ramli R. Optimization of operation sequence in CNC machine tools using genetic algorithm / Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2007. – P. 272–282.

Калмыков Вадим Владимирович – ст. преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sorat-vad@yandex.ru

Барина Дарья Андреевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: daria.barinova2016@yandex.ru

Кузнецов Иван Васильевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: van-cuznetsow@yandex.ru

О.С. Федорова, А.А. Рожнов, А.А. Сухарева

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Современные условия машиностроения связаны с постоянным ростом инноваций, необходимых для удержания позиций на рынке. Для успешного запуска в производство новых и усовершенствованных изделий, их необходимо подвергать тщательному контролю, а также многократно корректировать технологический процесс их изготовления на первых и последующих этапах разработки. В связи с этим роль проведения эксперимента, а также последующая его математическая обработка становится основополагающей. Как известно, различные статистические методы анализа технологических процессов обладают разной степенью сложности и требуют разного количества времени для их осуществления, что делает выбор того или иного метода весьма ответственным. Поэтому ставится задача сравнения различных путей решения и выбор наиболее оптимального для каждой инженерной задачи [1-4,7].

Был проведён полный факторный эксперимент, в котором факторы установлены на двух уровнях. В качестве независимых факторов выбраны твердость, трение и толщина дна стаканчиков. Поковки выдавливали на кривошипном прессе модели К2330.02 номинальной силой 1000 кН.

Твёрдость сплава (НВ) изменяли от 180 МПа $X_1(-1)$ до 240 МПа $X_1(+1)$; фактор трения (μ) – от 0,1 $X_2(-1)$ до 0,3 $X_2(+1)$. Толщина дна t для уровней факторов +1 и -1 принималась равной h_0 и $0.5h_0$ соответственно (h_0 – высота очага пластической деформации). Высоту очага деформации рассчитывали по формуле:

$$h_0 = 0,5d \sqrt{\frac{(R^2 - 1)(1 + 2\mu)}{1 + 2\mu R}}$$

где $R = D/d$ D и d – наружный и внутренний диаметры поковок соответственно.

В качестве отклика (Y) фиксировалась относительная погрешность высоты дна стакана (δt).

Все опыты в эксперименте повторены по 3 раза и их последовательность рандомизирована.

После статистической обработки получено уравнение регрессионного анализа в нормализованном масштабе:

$$Y(\delta t) = 19,5 + 11,4X_1(НВ) + 8,5X_2(\mu) - 6,5X_3(t) - \\ - 3,44X_1X_3 - 3,15X_2X_3 + 1,4X_1X_2$$

На основе полученной модели можно сделать следующие выводы:

- Наибольшее влияние на относительную погрешность высоты дна стакана (δt) оказывает твердость материала, степень воздействия которого в несколько раз сильнее влияния трения и толщины дна.
- С увеличением твердости и трения относительная погрешность высоты дна стакана (δt) увеличивается, а увеличение толщины дна приводит к уменьшению отклика.

Дополнительно был проведен дисперсионный анализ. Дисперсионный анализ позволяет, при исследовании технологических систем, определить вклад каждого фактора в дисперсию отклика. Сущность его заключается в разложении суммы квадратов отклонений выходного параметра системы от общего среднего на компоненты, соответствующие предполагаемым источникам изменчивости выходного значения. Наиболее результативен дисперсионный анализ в экспериментах с одновременным изучением двух и более факторов. Дисперсионный анализ показал, что фактором твердости материала обусловлено 48,44% дисперсии отклика (δt), 27,06% - трением, и 15,58% дисперсии отклика вызвано влиянием толщины дна стаканчика [5-6].

Был проведен анализ методом сигнал/шум. В настоящей задаче отклик – относительная погрешность высоты дна стакана (δt), выполняется условие «как можно меньше».

Отношение сигнал/шум (с/ш) определяется по формуле:

$$c / ш = -10 \lg \left[1 / n \sum_{i=1}^n 1 / y_i^2 \right]$$

где n – число повторных опытов в каждой строке плана ПФЭ; y_i – значение отклика в каждом повторном опыте строки плана.

Сравнивая опытные данные для одинаковых уровней факторов H_B и μ при различной величине толщины дна можно сделать вывод, что наибольшая робастность, т.е. устойчивость оцениваемого параметра t , обеспечивается, когда толщина соответствует нижнему уровню [5-6].

Список литературы

[1] Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Мкртчян А.Б. Применение статистических методов анализа к оценке изменения диаметра цилиндра при холодной осадке // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 8-1. С. 9-13.

[2] Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В. Определение оптимального количества классов группирования экспериментальных данных при интервальных оценках // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2014. № 3 (7). С. 56-58.

[3] Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В., Малышев Е.Н. Организация статистического приемочного контроля качества продукции по количественному признаку // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6. С. 162.

[4] Калмыков В.В., Космынина Е.В., Сорокин П.С. Выбор методов оценки точности технологических процессов // Инженерный вестник. 2012. № 8. С. 4.

[5] Калмыков В.В., Федорова О.С., Малышев И.Е. Исследование статистических методов анализа технологических факторов при токарной обработке // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 48-52

[6] Калмыков В.В., Федорова О.С. Основные статистические методы анализа результатов экспериментов // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 1 (5). С. 68-75.

[7] Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N. Experimental research of variability of surface energy value of Fe37-3FN, C45 and 41Cr4 steels // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 17. С. 6428-6433.

Федорова Оксана Сергеевна – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: oksana.fedorova.92@gmail.com

Рожнов Андрей Александрович – ст. преподаватель КГУ им. К.Э. Циолковского. E-mail: roznov1976@yandex.ru

Сухарева Александра Алексеевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alexandra.sukhareva17@gmail.com

А.Д. Левин

НЕДОСТАТКИ МЕТОДА КООРДИНАТНОЙ ШТАМПОВКИ ПЕРЕД ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКОЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Применение разделительных операций, преимущественно в качестве заготовительных, является неотъемлемой частью производства во многих отраслях промышленности, таких как, например, автомобилестроение или станкостроение и т.д. В наши дни, существует многообразие методов раскроя листового материала. Таким образом, при технологической подготовке нового машиностроительного производства или же при модернизации уже существующего приходится сталкиваться со сложным выбором, так как каждый метод обладает своими преимуществами и недостатками.

Выбор метода выполнения разделительных операций зависит от множества факторов, таких как, например, толщина и марка материала, сложность формы контура, требования, предъявляемые к кромкам деталей. Наибольший интерес, а также актуальность в условиях серийного производства представляет собой выбор между лазерным раскроем материала и вырубкой на координатно-револьверных прессах.

При условии правильно подобранных оптимальных режимов обработки для обоих рассматриваемых методов, лазерная резка позволяет получить лучшее и стабильное качество кромок, в то время как при координатной штамповке возникает заусенец, увеличивающийся на протяжении всего срока службы штампа. В дополнение, метод координатной штамповки из-за того, что комплект инструментов нормализован, не позволяет проводить обработку по сложным контурам малых радиусов.

Процесс координатной штамповки характеризуется интенсивным воздействием инерционных сил и сил резания на лист материала, что может повлечь за собой хаотичное движение отделенных частей материала по рабочей области станка, отсюда возникает необходимость введения в конструкцию деталей перемычек, которые впоследствии потребуются удалить. Следует учитывать, что для удаления перемычек потребуется ввести дополнительную операцию в маршрут изготовления детали, при этом возникает вероятность повреждения деталей, а также уменьшение общей производительности процесса.

Стоит заметить, что величина заусенца, по предположению, не зависит от толщины листового материала. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что величина заусенца при маленьких толщинах листового материала (до 0,5 мм) становится значительной относительно толщины детали. В этой связи могут возникнуть трудности при дальнейшей обработке, например, затрудненный съем деталей с пуансона после выполнения фор-

мообразующих операций методом штамповки, или сборке с малыми величинами зазора, которые будут частично перекрываться этим заусенцем.

К факторам, влияющим на высоту заусенца при вырубке относятся конструктивные параметры, технологические параметры и физико-химические характеристики обрабатываемого материала. Главным конструктивным параметром, помимо конструкции штампа, является величина зазора между матрицей и пуансоном. Технологическими параметрами считаются степень износа поверхностей пуансонов и матриц, наличие смазки и скорость выполнения операции.

Следующие способы направлены на решение проблем, связанных с возникновением заусенца: уменьшение величины заусенца посредством обеспечения меньшего зазора между пуансоном и матрицей, что приведет в свою очередь к сокращению срока службы комплекта инструмента; введение в технологический процесс изготовления деталей дополнительной шлифовальной операции, на которой заусенцы будут удаляться полностью. Существуют также случаи, когда наличие заусенца не требует его удаления, так, например, если предусмотрена дальнейшая лакокрасочная обработка, заусенец может быть скомпенсирован каким-либо покрытием, или же если на кромку в дальнейшем предусматривается установка декоративного канта.

При технологической подготовке производства с использованием координатной штамповки необходимо учитывать, что величина заусенца возрастает со степенью износа инструмента. Таким образом, следует предусматривать последовательность обработки деталей от наиболее ответственных к менее ответственным, согласно с величиной износа инструмента, что требует дополнительных затрат времени и отрицательно сказывается на производительности процесса в целом.

Также стоит уделить внимание тому, что при критическом износе инструмента заусенец на кромках деталей является крайне травмоопасным, так как обладает высокой твердостью и малым радиусом при вершине.

Подводя итоги, если рассматривать межоперационное качество, как меру удовлетворения последующих операций обработки, то лазерная резка является наиболее предпочтительным методом. Но, без учета возможного введения в процесс изготовления дополнительных операций и возможных экономических затрат, непосредственно процесс резания методом координатной штамповки является более производительным. Таким образом, выбирать лазерную резку рекомендуется в тех случаях, когда координатная штамповка невозможна, например, при толщинах материала более 6 мм, или же связана с экономическими затратами и увеличением трудоемкости, что подразумевает закупку специального инструмента и введение дополнительных операций обработки.

Список литературы

[1] Сапрыкин Л.Г. Лазерное оборудование для обработки материалов. Технический Альманах "Оборудование", 2006, №4.

[2] Вдовин С.И. Исследование очага пластической деформации при вырубке листового материала / С.И. Вдовин, Н.А. Акастелов; изв. вузов: Машиностроение, 1989. - №8. - с. 90-92

[3] Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. - Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1986. - 688 с.

[4] Попов Е.А. Основы листовой штамповки / Е.А. Попов. - М.: Машиностроение, 1977. - 278 с.

Левин Артем Дмитриевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: doolciamanti@gmail.com

А.В. Волков, И.К. Устинов

О ТОЧНОСТИ ФОРМУЛ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ РЕЗАНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В соответствии с результатами проведённых ранее работ по анализу расчётных и экспериментальных формул определения сил резания с привлечением теории измерений [1], нами показано, что, несмотря на весьма малое количество исследований, в которых металлообработчиками полностью учтены современные требования теории измерений, сопоставление работ по параметрам усилия резания и критериям адекватной оценки погрешностей расчёта всё же может быть реализовано. [2,3]:

Целью работ являлся сбор, анализ, оценка статистической достоверности расчётных и экспериментальных алгоритмов определения сил резания с позиций теории измерений. В качестве источников использовали научную и учебную литературу, практические справочники за период с 1940 г. по настоящее время – всего более сорока наименований, как то: - Долматовский Г.А. (1940г.); - Грановский Г.И. и др. (1954, 1985г.г.); - Розенберг А.М. и др. (1956, 1990г.г.); - Зорев Н.Н. (1958, 1967г.г.); - Панкин А.В. (1961г.); - Клушин М.И. (1958г.); - Подураев В.Н. (1965г.); - Вульф А.М. (1973г.); - Петруха П.Г. (1974г.); - Монахов Г.А. (1974г.); - Филоненко С.Н. (1975г.); - Бобров В.Ф. (1975г.); - Армарега И.Дж.А., Браун Р.Х. (1977г.); - Е.М. Трент (1980, 2000г.г.); - Силин С.С. (1980г.); - Ящерицын П.И. и др. (1981, 2007г.г.); - Абрамов Ф.Н. и др. (1983г.); - Г. Шпур, Т. Штеферле (1985г.); - Панов А.Л. и др. (1988г.); - Нормативы режимов резания (1990г.); - Барановский Ю.В. и др. (1995г.); - Розенберг Ю.А. и др. (1995, 2003г.г.); - Петрушин С.И. (1999г.); - Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С., (2001г.); - Дальский А.М. и др. (2001г.); - Ермаков Ю.М. (2005г.); - Гузеев В.А. (2005г.); - Даниленко Б.Д., Зубков Н.Н. (2005г.); - Грубый С.В. (2006, 2007, 2008г.г.); - Внуков Ю.Н., Саржинская А.Г. (2007, 2008г.г.); - Воронцов А.Л. и др. (2008г.); - Рыжкин А.А. (2008г.); - Верещака А.С., Кушнер В.С., (2009г.); - Старков В.К. (2009г.); - справочник Garant, ФРГ, (2009г.); - Максимов Ю.В. и др. (2011г.).

Задачами работы являлись: - сбор сведений о формулах расчёта усилий резания и погрешностях; - сопоставление формул определения сил резания с привлечением теории измерений; - подготовка рекомендаций по использованию существующих алгоритмов определения усилий резания.

На первом этапе нами был произведён сбор алгоритмов определения усилий резания, хотя бы частично содержащих сведения об оценке их точности по любым критериям. При этом учитывали установленный ранее факт оценки достоверной погрешности измерения усилий резания в реальных условиях величиной доверительной вероятности $P_0 \leq 0,8$ (при $n \leq 20$) [2].

Кратко остановимся на методических особенностях подхода ряда известных авторов к точности определения сил резания.

Грановский Г.И., и др. (1954 г.) представили уравнения сил резания в общем виде со средними значениями показателей степеней, предназначенными для обработки сталей, чугуна и ограничили их пригодность подсчетом сил при резании с прямыми срезами конструкционных сталей и чугунов.

Грубый С.В. (2007 г.) на основании работ по оптимизации режимных параметров лезвийной обработки при точении конструкционных сталей и сплавов дана оценка коэффициента корреляции расчетных по физической модели составляющих силы резания P_x, P_y, P_{xr} – 0,97, 0,90, 0,93 соответственно. По результатам проведенных исследований автором сделан вывод о том, что имитационное моделирование является эффективным инструментом статистической оценки не только натуральных, но и теоретических (математических) моделей, в том числе процессов резания и изнашивания инструмента.

А.Л. Воронцов и др. (2008 г.), провели теоретические расчёты коэффициента утолщения стружки, например, для свинца, и показали отличие теоретического (по алгоритму авторов) от экспериментального значения $k_{c,э} = 5,3$, т.е. всего на 6 %. Авторы отмечают, что погрешность расчёта коэффициента утолщения стружки, например, для латуни составила 8,6%.

В работе Внукова Ю.Н. и Саржинской А.Г. (2009 г.) проанализированы алгоритмы определения сил резания по Н.Н. Зореву (1958, 1967г.г.), - А.М. Розенбергу (1956, 1990г.г.), - В.С. Кушнеру (2009г.), а также и рекомендуемые авторами. Было показано, что наибольшей точностью из рассмотренных должны обладать алгоритмы авторов Внукова Ю.Н. и Саржинской А.Г. Наша предварительная статистическая оценка результатов А.М. Розенберга показала, что выборка из всех проверенных им сталей даёт нестабильную корреляцию ($\rho = 0 - 0,66$) при $\gamma_s = 43 - 133\%$, что не даёт достаточных оснований для подтверждения достоверности его результатов при относительно широком диапазоне изученных материалов [4].

Старков В.К. (2009 г.) обосновал тезис, что по Н.Н. Зореву, тангенциальная P_z и нормальная P_y составляющие силы резания возможно рассчитать через механические свойства материала обрабатываемой детали: его предел прочности σ_b и относительное сужение ψ , а также через параметры геометрии резца и режима обработки. Коэффициент трения инструмента с материалом по задней поверхности в расчётах был принят $\mu_s = 0,41$, а по передней поверхности - $\mu_n = 0,7$. Авторская экспериментальная проверка показала, что в случае угла сдвига $\theta = 65^\circ$ расхождение опытных значений P_z и P_y с расчетными составляет при точении 23 и 11% соответственно.

Максимов Ю.В. и др. (2011 г.) показали, что для токарного резца в интервале значений главного переднего угла $\gamma = -15^\circ \dots + 7^\circ$, вычисленные ими по авторскому алгоритму значения практически совпадают с экспериментальными. При этом расчеты выполнялись при следующих условиях: сталь 15X,

$$s = 0,25 \text{ мм / об}; t = 3,5 \text{ мм}; \phi = 45^\circ; \phi_1 = 6^\circ; h = 0,2; h_1 = 0,2; \sigma = 40 \text{ кгс / мм}^2; B = 0,43; \\ a_n = 5,5 \text{ кгс / мм}; \lambda = 0; \mu = 0,12.$$

Что касается сведений, приведённых в справочной литературе по режимам резания, то следует отметить, что универсальные справочные формулы для чисто экспериментального определения сил резания, базирующиеся на степенных зависимостях, не учитывают взаимного влияния их составляющих. Это означает, что по весьма приблизительной оценке справочные формулы расчёта сил резания имеют точность не выше 10% - 35%, а потому по большей части недостаточно пригодны для получения приемлемых результатов без проведения дополнительной экспериментальной проверки в сугубо конкретных условиях.

Расширенный анализ литературных источников с данными по изучению практических результатов измерения усилий резания различных материалов и предложенными алгоритмами для определения усилия резания показал, что реально сопоставимыми по точности расчётов и измерений является всего несколько работ: это работы Г.И. Грановского, Н.Н. Зорева, А.М. Розенберга, а также работы современных учёных – В.К. Старкова, А.Л. Воронцова, Ю.Н. Внукова, Максимова Ю.В., и некоторых других.

Выводы

1. Судя по авторским оценкам, наиболее продвинулись в разработке эффективных аналитических формул для расчёта сил резания: - Н.Н. Зорев ($\Delta_{cp} = 10\%; \gamma_{эн} = 8\%$); - А.Л. Воронцов ($\gamma_{эн} = 8\%$), - С.В. Грубый (коэффициент корреляции расчетных по физической модели составляющих силы резания P_{xz}, P_{yz}, P_{xr} -0,97, 0,90, 0,93 соответственно), а также А.М. Розенберг. По сведениям Ю.Н. Внукова и др. формулы А.М. Розенберга дают среднюю погрешность расчета не более 11%, а максимальную – 25%. Однако наша предварительная статистическая оценка результатов А.М. Розенберга показала, что выборка из всех проверенных им сталей даёт нестабильную корреляцию ($\rho = 0 - 0,66$) при $\gamma_s = 43 - 133\%$, что не даёт достаточных оснований для подтверждения достоверности его результатов в относительно широком диапазоне изученных материалов [4].

2. Наибольших успехов в оптимизации режимов резания и использовании сил резания для управляющих воздействий в автоматизированном производстве достигли отечественные исследователи: – С.В. Грубый и В.К. Старков (у последнего расхождение опытных значений P_z и P_y с расчетными составляет при точении 23 и 11 %).

3. В связи с недостаточным количеством реально сравнимых данных в доступных литературных источниках (например, по величине усилия резания материалов при точении и его доверительной погрешности), полезно продолжить работу по анализу погрешностей алгоритмов определения усилий резания распространённых сталей и сплавов с целью введения в программы станков с ЧПУ алгоритмов стабилизации усилий резания при точении.

Список литературы

[1] Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1991. – 304 с.

[2] Волков А.В., Устинов И.К. О реальных погрешностях определения сил резания с позиций теории измерений // Электронный журнал: наука, техника и образование. - 2016. - №4/2016. – с. 32-41. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/d3fad327c2a0c11eb0d843470766aa99.pdf> (дата обращения 13.01.2017).

[3] Волков А.В., Устинов И.К. «О критериях оценки погрешностей определения усилия резания». Научно-технические технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 15 – 17 ноября 2016 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – С. 48-52.

[4] Бриченков С.Н., Волков А.В. «О точности алгоритмов аналитического расчёта сил резания». Научно-технические технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции. 6 – 12 декабря 2013 г. Т. 1. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014 г., С. 79-84.

Волков Александр Владимирович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: volkovkfmgtu@yandex.ru

Устинов Игорь Кириллович – канд. техн. наук, зав. кафедрой КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m4kf-kafedra@rambler.ru

А.А. Бурмистров, А.Г. Вяткин

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВЫСОТНЫХ РАЗМЕРОВ ПОКОВОК ПРИ ОСАДКЕ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОМ ПРЕССЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В связи с тем, что механическая обработка заготовок на станках является достаточно дорогим методом получения деталей, встает вопрос о повышенной точности применяемых заготовок, а именно приближении массы заготовки к массе детали. Для достижения высокого коэффициента использования материала нужно использовать современные и эффективные методы получения заготовок. Малоотходность и ресурсосбережение можно обеспечить за счет применения прогрессивных технологических процессов холодной объемной штамповки.

Холодная объемная штамповка (ХОШ) – это процесс обработки металла посредством давления, который происходит обыкновенно без увеличения температуры исходной заготовки [1]. Сущность холодной штамповки состоит в деформации объемных заготовок, имеющих цилиндрическую, призматическую или другую простейшую форму. Результатом этого процесса становится появление более сложных изделий, форма которых полностью соответствует форме полости штампа, использовавшегося для их создания.

В техническом отношении ХОШ позволяет [2]:

1) получать заготовки с высокими физико-механическими свойствами, благодаря холодному течению металла в штампе, при небольшом расходе материала;

2) получать взаимозаменяемые детали с достаточно высокой точностью размеров и малой шероховатостью ($Ra=5$ мкм), преимущественно без последующей механической обработки.

В экономическом отношении ХОШ обладает следующими преимуществами по сравнению с другими методами обработки металлов:

1) экономным использованием материала и сравнительно небольшими отходами;

2) весьма высокой производительностью оборудования, с применением механизации и автоматизации производственных процессов;

3) низкой стоимостью изготавливаемых изделий.

Одной из наиболее простых и распространенных операций объемной штамповки является осадка [3]. Осадкой называется операция, при которой происходит уменьшение высоты заготовки в направлении действующей силы с одновременным увеличением ее поперечных размеров в перпендикулярном направлении. Осадка применяется для: получения требуемой формы поковки; получения соответствующего волокна в поковках; облегчения последующих операций ХОШ; устранения ликвидации и анизотропии механических свойств. На рисунке 1 приведены основные схемы осадки: а) между плоскими плитами; б) между плоской и кольцевой плитами; в) между двумя кольцевыми плитами.

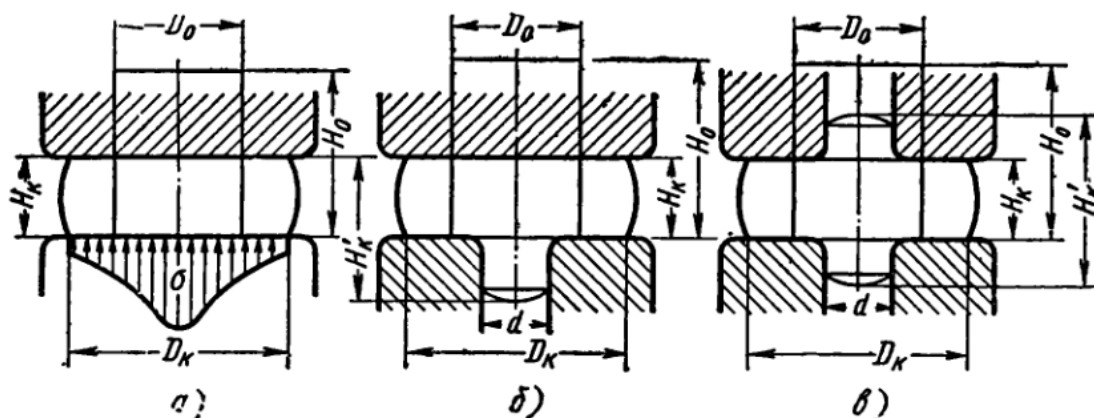


Рис. 1. Основные схемы осадки

Одним из основных критериев точности плоской осадки является погрешность высоты поковки. Было установлено, что при осадке на гидравлическом прессе данная погрешность значительно варьируется в зависимости от материала заготовки, её конфигурации и погрешности объема исходной заготовки. В связи с этим возникла необходимость в изучении факторов, влияющих на точность осадки [4].

В общем случае на погрешность высоты поковки оказывает влияние ряд факторов, которые условно можно разделить на три группы [5]:

1) факторы, характеризующие исходную заготовку: погрешности ее высоты и диаметра, возможные колебания напряжения текучести материала заготовки, а также параметры заготовки, влияющие на величину коэффициента трения;

2) факторы, отражающие силовой режим процесса деформирования поковки: степень деформации исходной заготовки по высоте и отношение диаметра поковки к ее высоте;

3) факторы, характеризующие оборудование: коэффициент жесткости системы пресс-штамп и скорость деформирования, которая может оказывать влияние на величину напряжения текучести.

Целью исследования является разработка рекомендаций по повышению точности высотных размеров поволок, изготавливаемых осадкой на гидравлическом прессе.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- проанализировать литературные источники по теме исследования;
- рассмотреть влияние ряда факторов на погрешность высотного размера и выявить наиболее значимые факторы, выполнив соответствующие эксперименты;
- определить факторы, с помощью которых можно управлять точностью высотного размера поковки;
- разработать рекомендации по повышению точности высотных размеров поволок.

Список литературы

[1] Брюханов А.Н. Ковка и объемная штамповка: Учебное пособие для машиностроительных вузов. М.: Машиностроение, 1975. – 408 с.

[2] Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Сравнительный анализ точности холодной объемной штамповки на кривошипных и гидравлических прессах // Математическое моделирование сложных технических систем: Труды МГТУ №578 - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2000. - с.3-8.

[3] Навроцкий Г.А. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. Т. 3 Холодная объемная штамповка. М.: Машиностроение, 1987. -384

[4] Антонюк Ф.И. Анализ факторов, влияющих на точность холодной объемной штамповки в закрытом штампе // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. –№ 1. - с. 3-5.

[5] Вяткин А. Г., Вяткин А. А. Факторы, влияющие на точность осадки при штамповке на гидравлическом прессе [Электронный ресурс] // Наука и образование. – Электрон.журн. – 2012. – №2. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/500313.html>

Бурмистров Алексей Алексеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alex200811burmistrov@yandex.ru

Вяткин Андрей Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: and-vyatkin@mail.ru

И.Э. Гинсар, В.В. Калмыков

ОЦЕНКА АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Наряду с электрохимическими и химическими способами защиты металлических изделий и конструкций от агрессивного воздействия окружающей среды широко применяют лакокрасочные покрытия. Этот способ получил наибольшее распространение ввиду низкой себестоимости и простоты восстановления не требующего дорогостоящего оборудования, а также позволяющего достичь желаемого внешнего вида.

Лакокрасочные покрытия представляют собой сложные химические соединения, которые образуют защитную, а также декоративную пленку после высыхания при предварительном нанесении на обработанную поверхность. Качество лакокрасочных покрытий определяется их механическими, химическими и адгезионными свойствами и самой технологией процесса окраски [1]. Существенной оценкой лакокрасочного покрытия является его адгезионная прочность. Для обработки поверхностей чаще всего используют эмали, грунтовки, шпатлевки и другие лакокрасочные покрытия.

Согласно ГОСТ 28246-2006 «Материалы лакокрасочные. Термины и определения» адгезионная прочность лакокрасочного покрытия – это совокупность сил, связывающих высохшее лакокрасочное покрытие с окрашиваемой поверхностью [2].

Разрушение защитного покрытия может происходить по адгезионному, когезионному и смешанному механизму. Следовательно, для определения адгезионной прочности необходимо выбрать методику с учетом только адгезионного разрушения соединения на границе покрытие-подложка [3]. Большинство методов определения адгезионной прочности основаны на механическом разрушении соединения на границе покрытие-подложка. Существуют следующие основные методы определения адгезионной прочности:

1. Метод отслаивания;
2. Метод Х-образного надреза;
3. Метод определения нормальным отрывом;
4. Метод решетчатых надрезов;
5. Метод решетчатых надрезов с обратным ударом;
6. Метод параллельных надрезов;
7. Метод одновременного отрыва имеет ряд разновидностей:
 - а. Грибковый метод, или метод штифтов, по отрыву диска (нормальный отрыв при растяжении или сдвиге);
 - б. Метод ультрацентрифуги (отрыв центробежной силой);
 - в. Ультразвуковой метод (вибрацией);

8. Метод автоклавного испытания;
9. Метод перегиба;
10. Метод склерометрии.

Существует широкое разнообразие методов определения адгезионной прочности, но широкое применение получили лишь немногие. Некоторые из вышеперечисленных методов стандартизованы и имеют соответствующий ГОСТ. Такое многообразие методов требует разработки рекомендаций по рациональному выбору наиболее оптимального метода оценки адгезионной прочности лакокрасочных покрытий и определение эффективной области применения. В работах [4–6] показана возможность технологического формирования эксплуатационных свойств поверхностей. В последующих исследованиях необходимо установить возможность и степень влияния технологического воздействия на адгезионную прочность.

Список литературы

- [1] Дехтеринский Л.В., Есенберлин Р.Е., Акмаев К.Х. и др. Справочник по капитальному ремонту автомобилей. Москва, Транспорт, 1989, 335 с.
- [2] ГОСТ 28246-2006. Материалы лакокрасочные. Термины и определения. Москва, Стандартинформ, 2006, 40 с.
- [3] Кравцов В.В. Коррозионные испытания полимерных материалов и покрытий. Уфа, Изд-во УГНТУ, 2004, 195 с.
- [4] Калмыков В.В., Мельников Д.А., Горбачева М.С., Сухарева А.А. Исследование зависимости смазываемости конструкционных материалов от величины поверхностного натяжения масел // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 6. С. 47-51.
- [5] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Авраменко М.Ю. Технологические предпосылки повышения эксплуатационных характеристик направляющих элементов // Фундаментальные исследования. 2016. № 8-1. С. 55-58.
- [6] Гинсар И.Э. Экспресс-анализ адгезионной прочности лакокрасочных покрытий: материалы региональной научно-технической конференции. 18 – 20 апр. 2017 г. / Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе.

Гинсар Ирина Эдуардовна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: ginsaririna2017@yandex.ru

Калмыков Вадим Владимирович – ст. преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lex-lepchenkov@yandex.ru

Д.А. Клементьев, В.Е. Хайченко

ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОШЛАКОВО КОКИЛЬНОГО ЛИТЬЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Электрошлаковое кокильное литьё относится к методам литья в постоянные литейные формы такие как: кокильное литье, литье под давлением и другие их разновидности. Особенностью данных методов литья является многократное использование литейной формы, как правило, металлической.

Электрошлаковым литьем изготавливают отливки в основном простой конфигурации, но ответственного назначения для многих отраслей промышленности.

Идея способа заключается в использовании для плавки металла печи электрошлаковым способом и последующей заливкой металла в литейную форму непосредственно из печи вместе с шлаком. Способ был разработан в Институте электросварки им. Е. О. Патона бывшего СССР. В настоящее время этот способ применяют для изготовления как фасонных отливок, так и слитков с использованием в качестве шихты отходов производства сложнелегированных сплавов (куски, стружка и др.). Достоинствами способа являются: высокое качество металла по химическому составу, плотная мелкозернистая структура получаемых отливок и слитков, малые трудозатраты на производство. К недостаткам можно отнести возможность попадания шлака в тело отливки и малая автоматизация процесса.

На рисунке 1 показана типовая конструкция для плавки металла с объемом металла от 50 до 300кг.

Установка электрошлакового кокильного литья
1- колонна,
2- плавильный тигель,
3- источник питания,
4- пылегазоулавливающая установка мокрого типа.

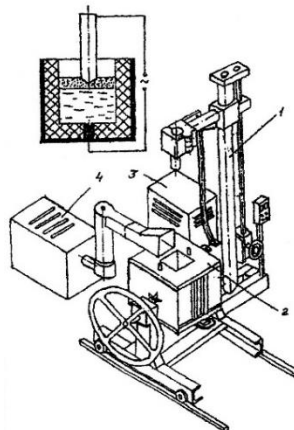


Рис. 1.

Охлажденные заготовки подаются на маятниковую пилу для отпиливания прибылей, которые используются при изготовлении расплавляемого электрода.

Процесс получения отливки электрошлаковым литьем включает следующие операции:

1. Подготовку шихты.
2. Плавка металла.
3. Заливка литейной формы.

4. Затвердевание расплава и образование отливки, что осуществляется в металлической форме.

Электрический ток подводится к переплавляемым электродам и заправке в нижней части кристаллизатора. Шлаковая ванна обладает малой электропроводностью. При прохождении через нее электрического тока выделяется большое количество тепла, что позволяет нагреть шлаковую ванну до 1700°C и выше. При этом погруженные в нее концы электродов оплавляются. Капли расплавленного металла проходят через шлаковую ванну, собираются в зоне кристаллизации, образуя под слоем шлака ванну металлического расплава. Металлическая ванна непрерывно пополняется в верхней части расплавом от плавящихся электродов и последовательно затвердевает в нижней части вследствие отвода теплоты через стенки

Накопленный производственный опыт показывает, что наиболее выгодно использовать этот процесс для получения отливок из специальных сталей и сплавов и отливок ответственного назначения, к которым предъявляются повышенные требования к качеству металла и механическим свойствам.

Схема электрошлакового переплава

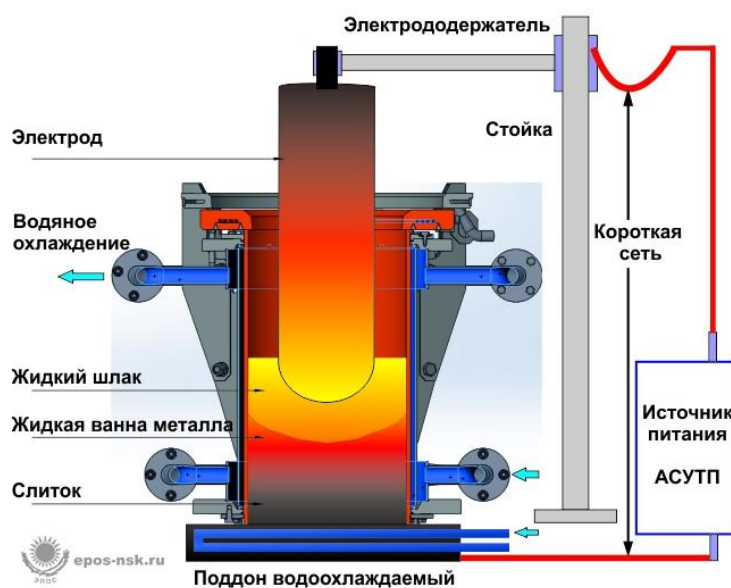


Рис. 2.



Рис. 3.

Детали, получаемые путем электрошлакового литья:



Рис. 4.

Список литературы

- [1] Специальные способы литья” Ефимов В. А.
- [2] Статья в “Большом энциклопедическом словаре” “Электрошлаковое литьё”
- [3] URL: <https://studfiles.net/preview/4412789/page:22/>

Клементьев Данил Андреевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kl19danil@gmail.com

Хайченко Виктор Ефимович – ст. преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kniizst2012@yandex.ru

М.П. Карпов, Е.Н. Малышев

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПАРОНИТА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Современная промышленность характеризуется агрессивными средами и повышенными температурами. Поэтому создается необходимость использования уплотнительных материалов, которые способны работать в тяжелых условиях.

В настоящее время широко используются детали из паронита в машиностроении (в двигателях внутреннего сгорания), электротехнике (изоляторы), металлургии (в трубопроводах), химической и нефтяной промышленности (в компрессорах), - паронит используется во многих промышленных сферах благодаря своим особым востребованным свойствам.

Паронит – листовой прокладочный материал. Он имеет сложный химический состав, в который входят преимущественно асбест, синтетический каучук и специальные наполнители. Асбест позволяет парониту показывать высокие показатели химической и термической стойкости, синтетический каучук придает дополнительную пластичность, а различный состав наполнителей придает парониту особые исключительные свойства, обеспечивающие стойкость к разным химикатам, в среде которых изделие выполняет свои функции. Кроме этого паронит не подвергается биологическим воздействиям, что позволяет расширить его область применения. Более того он официально считается безопасным для здоровья человека, что имеет большое значение.

Несмотря на большое количество положительных характеристик, паронит имеет недостаток – высокая адгезия, которая может создать трудности при ремонте изделий, но это легко исправить.

Таким образом, паронит – уникальный прокладочный материал, обладающий полным спектром необходимых свойств и характеристик, но есть и еще показатель, который оказывает значительное влияние на востребованность деталей из паронита – это качество изделий, без которого они никому не будут нужны, даже с множеством положительных характеристик. Поэтому целесообразно, чтобы качество деталей из паронита не уступали их технологическим возможностям [1].

Одним из предприятий, занимающихся производством деталей из паронита, является ОАО «Калужский двигатель». Заготовки из паронита представляют собой полотна различной толщины, преимущественно до 4 мм, размер полотна, как правило, 500х500 мм, из которого режутся полосы, а из них, в свою очередь, квадраты с будущими деталями. Марка паронита – это маслобензостойкий ПМБ ГОСТ 481-80.

На предприятии ОАО «Калужский двигатель» цех №114 занимается изготовлением деталей из листового материала, в том числе и прокладок из паронита (рис. 1) несколькими способами, основные из которых – это лазерная резка и вырубка.

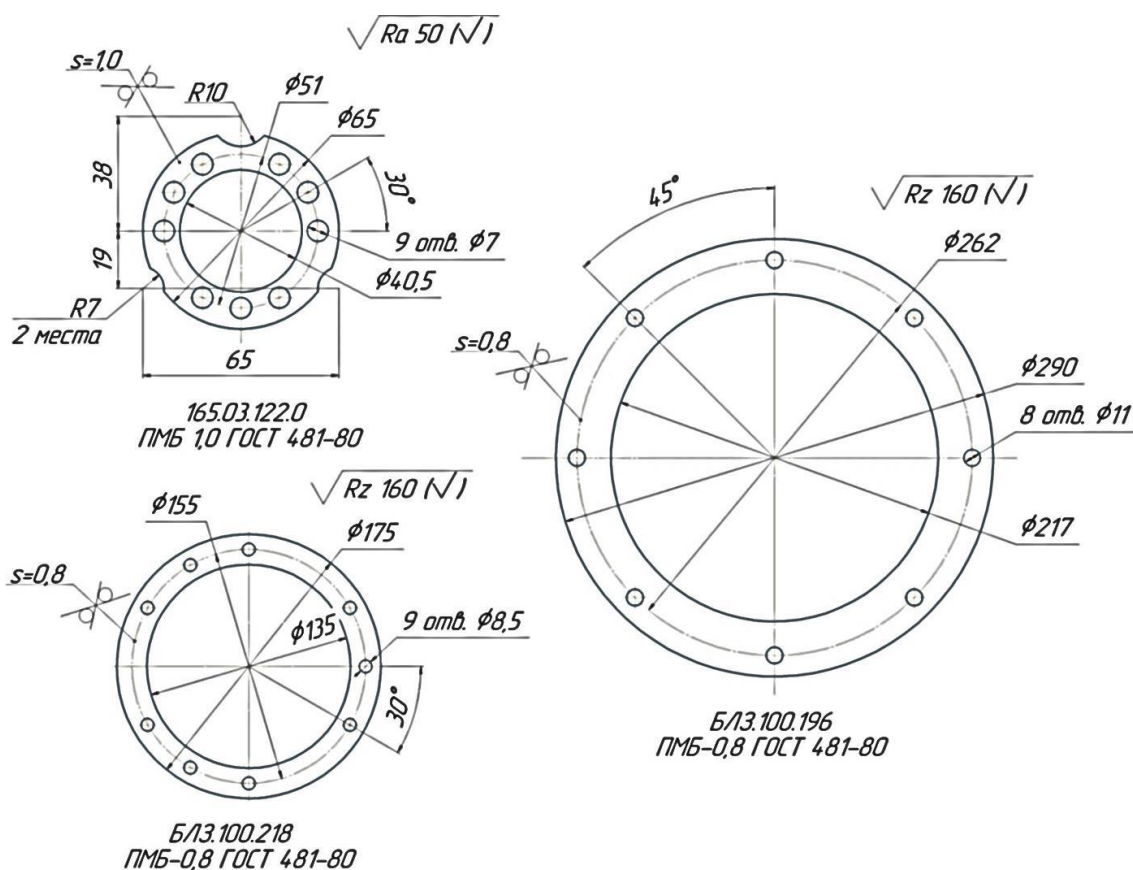


Рис. 1. Прокладки из паронита, изготавливаемые на предприятии ОАО «Калужский двигатель»

Цель исследования – выявление условий и показателей, при которых будет обеспечено высокое качество деталей из паронита при различных способах обработки заготовки в условиях ОАО «Калужский двигатель», в данном случае, при лазерной резке и вырубке [3].

Задачей исследования является решение вопросов обеспечения точности размеров, формы, расположения и качества поверхностей деталей из паронита при лазерной резке и вырубке [4].

Для решения поставленной задачи необходимо:

- проанализировать литературные источники по теме исследования;
- проанализировать используемые на производстве технологические процессы обработки деталей из паронита лазерной резкой и вырубкой;
- разработать план эксперимента по реализации обработки деталей из паронита;
- выполнить план эксперимента по реализации обработки деталей из паронита;
- сопоставить результаты теоретических и экспериментальных исследований [2];
- сделать вывод об условиях и показателях различных методов обработки, которые обеспечат высокое качество деталей из паронита на предприятии ОАО «Калужский двигатель».

Список литературы

[1] Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В., Малышев Е.Н. Организация статистического приемочного контроля качества продукции по количественному признаку // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 162.

[2] Калмыков В.В., Федорова О.С. Основные статистические методы анализа результатов экспериментов // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 1 (5). С. 68-75.

[3] Бысов С.А., Малышев Е.Н. Выявление и анализ организационно-технологических факторов, влияющих на результативность технологических систем, организованных на основе концентрации обрабатывающих и сборочных процессов // Машиностроение и компьютерные технологии. 2012. № 3. С. 3.

[4] Малышев Е.Н., Малышев А.Н. Повышение эффективности использования обрабатывающего оборудования путем расширенной реализации его технологических возможностей // Инженерный вестник. 2012. № 8. С. 3.

Карпов Максим Петрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: Maks96F@yandex.ru

Малышев Евгений Николаевич – канд. техн. наук, зав. кафедрой "Технологии машиностроения" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

А.Н. Малышев, А.Ю. Крылов, Н.Г. Букреева

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ FMEA ДЛЯ АНАЛИЗА РИСКОВ В ШТАМПОВОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Сегодня управление рисками формально существует во многих крупных и средних российских компаниях и зачастую сводится к тому, что специалист регулярно выявляет и оценивает риски и формирует их реестры, карты, паспорта; участвует в определении ответственных владельцев и разработке необходимых мероприятий. Основная проблема такого подхода заключается в оторванности от бизнеса и оперативных решений, которые руководство принимает каждый день, а не раз в месяц или квартал.

Риск-менеджеру, не обладающему достаточным опытом, может показаться, что его задача – своевременное выявление и оценка рисков, а также управление ими. На самом деле риск-менеджмент направлен на принятие управленческих решений с учетом рисков. Выявление, анализ рисков и их смягчение – не самоцель, не конечный результат, не самостоятельное действие, а промежуточный этап в процессе принятия бизнес-решений на любом из уровней организации. Задача современного риск-менеджера – помочь выстроить процессы принятия ключевых решений таким образом, чтобы риски, связанные с этими решениями, могли своевременно оцениваться и учитываться руководством. Для этого риск-менеджер должен обладать необходимыми компетенциями, участвовать в ключевых бизнес-решениях, предоставлять проактивную и независимую оценку рисков, что просто невозможно без современных инструментов и новых навыков [1].

Современное машиностроительное предприятие представляет собой систему подразделений различного рода деятельности, выпускающих продукцию, удовлетворяющую требованиям потребителя. Успешные предприятия с сертифицированной системой менеджмента качества руководствуются стандартами ИСО 9000 [2]. Деятельность любой производственной системы, в том числе машиностроительного предприятия, связано с рисками, способными проявиться в каждом из элементов этой системы с различной долей вероятности. При рассмотрении предприятия с точки зрения риск-менеджмента задача сводится к выявлению процессов, которые наиболее подвержены риску. Рассматривая предприятие в целом, наиболее рационально разделить финансово-хозяйственную деятельность на ряд крупных отдельных процессов. Нормальная реализация любого процесса зависит от ряда различных факторов, среди которых можно выделить наиболее значимые. Таковыми в рассматриваемом процессе являются: материал, оборудование, технологическая оснастка, персонал и технологический процесс.

В рамках настоящей работы рассмотрим технологический процесс штамповки детали типа «Поддон» на штамповочной автоматизированной линии, состоящей из кривошипных прессов. Целью данного процесса является получение штампованных деталей надлежащего качества. Препятствовать достижению цели могут различные факторы, возникающие на разных стадиях производственного цикла изготовления деталей, поэтому задачей является выявление и оценка этих факторов, и разработка мероприятий по снижению величины их воздействия.

Одним из вариантов решения этой задачи может быть применение методики FMEA [3], целью которой является улучшение процесса на основе анализа потенциальных несоответствий процесса с количественным анализом их последствий и причин. Область применения этой методики охватывает все этапы жизненного цикла продукции и любые технологические или бизнес-процессы. Наибольший эффект дает применение FMEA на этапах разработки конструкции и процессов, однако и в действующем производстве метод может эффективно применяться для устранения несоответствий и их причин, не выявленных при разработке или обусловленных факторами изменчивости процессов производства [4].

На основе выявленных факторов и видов риска составляется протокол анализа видов, причин и последствий потенциальных рисков в виде таблицы 1, по которой вычисляется приоритетное число риска (ПЧР) согласно формуле 1. Каждое ПЧР может иметь значения от 1 до 1000. Для приоритетного числа риска должна быть заранее установлена критическая граница (ПЧР*) [5] в пределах от 100 до 125 (в настоящем исследовании ПЧР* принимаем 120). Вычисленные значения ПЧР превышающие критическую границу ПЧР* будут указывать именно те потенциальные причины риска, которые в наибольшей степени способны вызвать его наступление.

$$\text{ПЧР} = S * O * D, \quad (1)$$

где S (значимость) – оценка наиболее серьезного последствия потенциального риска для потребителя. Для каждого последствия риска балл значимости определяется экспертным путем. Балл значимости изменяется от 1 для наименее значимых по ущербу рисков, до 10 – для наиболее значимых по ущербу рисков;

O (возникновение) – вероятность возникновения потенциальных причин рисков. Для каждой потенциальной причины риска экспертным путем определяется балл вероятности возникновения. Балл вероятности возникновения изменяется от 1 для самых редко возникающих дефектов до 10 – для дефектов, возникающих почти всегда;

D (обнаружение) – оценка способности предложенных управляющих действий обнаружить данный вид риска. Для каждого риска и каждой отдельной его причины определяют балл сложности обнаружения D , который изменяется от 10 для практически не обнаруживаемых причин и до 1 – для практически достоверно обнаруживаемых.

Таблица 1. Протокол FMEA

| № | Вид потенциального риска | Последствия потенциального риска | S | Потенциальная причина риска | O | Методы обнаружения причины риска | D | ПЧР | | | | |
|---|--|---|---|--|---|--|---|-----|-----|----|----|----|
| 1 | Несоответствие качества штампованной детали «Поддон» требованиям чертежа | <p>Последствия потенциального риска</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Невозможность выполнения отдельных технологических операций, например, «выпайки» 2. Появление непрогнозируемых (в том числе скрытых) дефектов детали и поломка оснастки 3. Неправильный процесс формоизменения детали 4. Отклонение от требуемого технологического процесса 5. Неправильное использование производственных мощностей, технологических подходов и приемов | 7 | <ol style="list-style-type: none"> 1. Дефектный материал 2. Сбои в работе оборудования 3. Просчеты в конструировании технологической оснастки 4. Ошибки рабочего персонала 5. Ошибки проектирования технологического процесса | 3 | <ol style="list-style-type: none"> 1. Входной контроль 2. Контрольный осмотр состояния оборудования, проведение ППР и включение формального исполнения 3. Контроль оснастки и деталей при проведении пуско-наладочных работ 4. Периодическая и внеплановая аттестация персонала 5. Технологический аудит процесса | 3 | 63 | 175 | 70 | 70 | 96 |

Заполнение протокола позволяет сделать вывод о том, какие риски и их причины действительно следует принимать во внимание, разрабатывать и реализовывать корректирующие и предупреждающие мероприятия. Отличительной особенностью методики FMEA является возможность самостоятельного назначения ПЧР экспертом, проводящим исследование процесса, который является критерием значимости риска и позволяет определить экономическую целесообразность проведения мероприятий по снижению рисков.

Список литературы

[1] [Электронный ресурс] Мировой риск менеджмент меняется, смогут ли российские профессионалы адаптироваться? РИСК Академия. www.risk-academy.ru/changing-risk-management (дата обращения 10.10.2017 г)

[2] Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В., Малышев Е.Н. Организация статистического приемочного контроля качества продукции по количественному признаку // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 162.

[3] [Электронный ресурс] Анализ видов, последствий и причин потенциальных несоответствий (FMEA) ООО «Новое качество» www.new-quality.ru URL: http://www.new-quality.ru/lib/FMEA_new-quality.pdf (дата обращения: 10.10.2017г)

[4] Вашуков Ю.А., Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А. Анализ видов, последствий и причин потенциальных несоответствий (FMEA). Метод. указания // Самарский государственный аэрокосмический университет. - 2008. – 31 с.

[5] Шушерин В.В., Кортон С.В., Зеткин А.С.. Средства и методы управления качеством: учебное пособие // Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. - 2006. - 202 с.

Малышев Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 1m-kf.mgtu@inbox.ru

Крылов Алексей Юрьевич – аспирант НОУ ВПО «Институт управления, бизнеса и технологий». E-mail: krylov-alex1986@yandex.ru

Букреева Наталья Григорьевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tacha.bukreeva.98@mail.ru

М.В. Крюков, В.М. Попков

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Вследствие необходимости повышения конкурентоспособности, экономической эффективности и перехода от ручного труда к механизированному необходимо постоянно совершенствовать технологические процессы.

Листовая штамповка является одним из направлений изготовления деталей. Данное направление имеет также хороший потенциал для проведения совершенствования технологических процессов.

В настоящее время существуют различные пути совершенствования технологического процесса при изготовлении деталей методом листовой штамповки.

Совершенствование данного процесса может протекать по следующим основным путям улучшения:

1. Организационные;
2. Технологические;
3. Научные;

Организационное совершенствование связано с созданием новых прогрессивных форм управления и организации производства. Это ведет к повышению производительности труда, повышению скорости принятия решений и снижению затрат. К организационным моментам можно отнести:

1. Научная организация труда и отдыха. Использование прогрессивных методов организации рабочего времени и отдыха ведет к более рациональному использованию времени, к меньшей утомляемости и повышению производительности умственного и ручного труда. При этом необходимо применять передовые исследования в данной области.

2. Совершенствование организации производства. Организация производства – это комплекс различных мер, целью которых является рациональное сочетание времени, людей, оборудования и помещений, занятых в процессе производства. Таким образом в процессе такого совершенствования необходимо наиболее рационально соединить данные ресурсы для максимальной эффективности.

3. Улучшение управления. В процессе принятия различных решений они проходят большое количество согласований, что не приводит к их существенному улучшению, а приводит лишь к задержке. В современной экономической ситуации это недопустимо. Решение данной проблемы лежит в улучшении системы управления с помощью использования современных компьютеров и соответствующего программного обеспечения.

Технологические совершенствования связаны с оптимизацией процесса изготовления деталей и изделий. Это связано повышением качества изделия, уменьшением времени, затрачиваемого на выпуск продукции и повышением производительности труда. К технологическим путям можно отнести:

1. Создание прогрессивных технологических процессов. Создание таких процессов связано с использованием современного обрабатывающего оборудования, а также новых схем обработки. При проектировании технологических процессов необходимо стремиться к тому, чтобы они отражали последние достижения техники и новаторов производства в листовой штамповке. Вдобавок необходимо стремиться к автоматизации производства так как это приводит к уменьшению процента ручного труда, уменьшению такта выпуска продукции, снижению себестоимости продукции и повышению надежности технологического процесса в целом.

2. Разработка оптимальных технологических процессов. Под оптимальными технологическими процессами подразумевается те технологические процессы, которые обеспечивают наименьшие затраты и нужное качество деталей при производстве. Это может быть связано с использованием прогрессивных методов обработки, а также с использованием классических схем. Использование передовых схем более желательно, если это экономически выгодно. Также данная разработка связана с использованием оптимальных режимов обработки и совершенствованием технологичности конструкции деталей.

3. Уменьшение штучного времени обработки деталей. Штучное время состоит из основного и вспомогательного. Уменьшение основного времени достигается с помощью использования высокоскоростных методов обработки и оборудования, такого как автоматы и полуавтоматы, использования специального инструмента и оснастки и совмещения различных операций. Уменьшение вспомогательного времени достигается за счет уменьшения переустановов деталей, повышение скорости обратных ходов оборудования и использования различных средств базирования и закрепления листовых заготовок. Данное совершенствование наиболее актуально в условиях крупносерийного и массового производства [1].

4. Уменьшение количества и времени вспомогательных операций. Вспомогательными операциями являются такие операции, на которых не происходит формоизменение деталей, а также никаких структурных изменений в материале детали. К ним в основном относят контрольные и транспортировочные операции. При изготовлении ответственных деталей или не высокой надежности технологического процесса вследствие его сложности, а также при контроле за износом оснастки зачастую используют избыточное количество контрольных операций. Их сокращение можно достичь за счет использования специальных измерительных приборов и приспособлений.

5. Улучшение качества деталей. Под качеством продукции понимают совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенным потребностям в соответствии с ее назначением. При проектировании конструктор задает некоторый диапазон качества годной детали. При изготовлении детали незначительно отличаются друг от друга. Качество производимых деталей улучшается с помощью использования более совершенного и точного оборудования, приспособлений и оснастки. Однако, следует отметить, что повышение точности обработки деталей повышает также себестоимость выпускаемой продукции.

6. Внедрение средств механизации и автоматизации работ. Необходимость таких работ определяется на основе организационно-технического и экономического расчетов. Механизация и оптимизация возможны только для надежных технологических процессов. Это приводит к снижению стоимости выпуска деталей, а также облегчения труда рабочих. При этом необходимо некоторые операции, производимые вручную, заменить на механизированные или автоматизированные операции. Современное оборудование обладает таким потенциалом [2].

Научные пути совершенствования связаны с изучением физических процессов. Они позволяют уменьшить трудоемкость на этапе технологической подготовки производства. К научным путям можно отнести:

1. Исследование физических процессов при листовой штамповке. Исследование таких процессов затруднено вследствие большого числа факторов, учет которых трудоемок и в большинстве случаев не эффективен. Поэтому чаще всего целью исследования является нахождение эмпирических зависимостей и построении на их основе математических моделей. Далее на основе математических моделей либо разрабатываются новые процессы, либо совершенствуются старые. Результатом этих исследований является повышение точности обрабатываемых деталей, а также сокращает время и трудоемкость технологической подготовки производства, вследствие изготовления специальной оснастки, которая не требует доработок после испытаний.

2. Создание новых методик. Перед их созданием необходимо выявить повторяющиеся действия при проектировании технологического процесса. К таким методикам можно отнести создание группового и типового технологического процесса. Создание методик позволяет уменьшить время технологической подготовки производства, уменьшить ее трудоемкость, а также позволяет уделить больше времени решению творческих задач. Методики создаются под конкретные нужды производства.

3. Разработка новых структур процессов. Технологический процесс отличается сложностью и большим количеством различных вариаций. Поэтому необходимо производить анализ и сравнение различных способов изготовления детали. Возможно большое количество разных вариаций процессов. Использование современного компьютерного оборудования

позволяет производить обоснованный выбор из большого числа предложенных технологических процессов.

В качестве примера научного совершенствования, а именно исследования физического процесса в листовой штамповке можно привести решение проблемы при изготовлении детали из пружинной проволоки. При проведении технологических расчетов для изготовления штампа был получен угол пружинения который составил около 95° . При испытаниях штампа обнаружилось что у пробной партии из пяти деталей в среднем угол пружинения составил 118° . Так данная проволока различного диаметра широко используется на предприятиях было принято решение о необходимости исследования данного процесса и получения расчетной формулы для этого типа проволоки.

В качестве примера технологического совершенствования можно привести решение поставленной задачи о совершенствовании технологического процесса изготовления детали в связи с необходимостью роста производительности, с переходом от ручного труда к автоматизированному и повышению экономической эффективности. Решение данной задачи с использованием современного штамповочного оборудования охватывает сразу несколько направлений: создание прогрессивных технологических процессов, разработка оптимальных технологических процессов, уменьшение времени обработки деталей и внедрения средств механизации.

Список литературы

[1] Семенов Е. И. Ковка и штамповка: справочник. Москва. Сер. Машиностроение, 1985. с. 351-370.

[2] Капустин Н. М. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. Высшая школа. Сер. Машиностроение, 2012. с. 14-34.

Крюков Максим Викторович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: cloundead@gmail.com

Попков Вячеслав Михайлович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: popkov.v.m@mail.ru

Н.В. Зенкин, Д.В. Васильев

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РУЧЬЕВ ШКИВОВ ЛИФТОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одним из ответственных звеньев лифтовых механизмов является канатопроводящий шкив. Они, как правило, изготавливаются из различных марки чугунов таких, как СЧ-30 ГОСТ 1412-85, ВЧ-60 ГОСТ 7293-85 и др. Однако практика показала, что при эксплуатации рабочие поверхности ручьев таких шкивов достаточно быстро изнашиваются, что приводит к провисанию, а иногда и к заклиниванию канатов. Это вызывает снижение точности позиционирования кабины лифта и ухудшение работы привода. Поэтому при износе рабочей поверхности ручьев свыше 2 мм необходима замена шкива [1]. В следствии высокой стоимости шкивов для повышения их долговечности производят восстановление изношенных рабочих поверхностей ручьев шкивов при ремонте. Восстановление профиля ручьев шкивов производится путем их демонтажа и отправки на ремонтную базу или на промышленные предприятия. Это приводит к отключению лифтов на 4-5 часов для замены шкива и требует иметь запас новых или восстановленных шкивов.

В качестве восстанавливаемого профиля применяем наиболее распространенный в эксплуатации – трапецеидальный с канавкой или производственный, который представлен на рисунке 1.

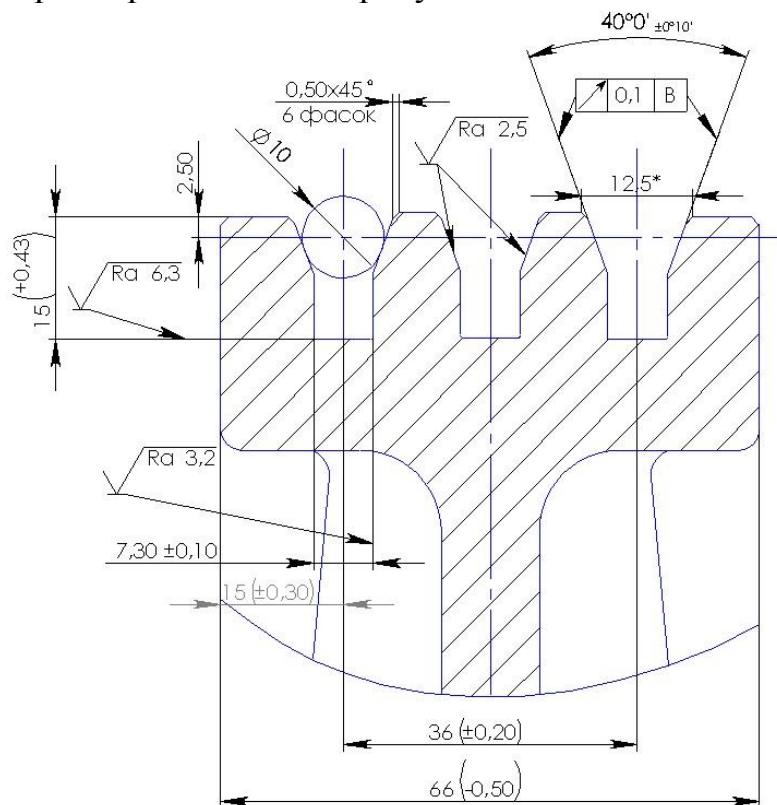


Рис. 1. Производственный профиль шкива

Проблема восстановления профилей ручьев шкивов наиболее актуальна для лифтовых хозяйств небольших городов, не имеющих своих ремонтных баз, а, зачастую, и соответствующего оборудования на промышленных предприятиях [2]. Поэтому есть необходимость разработки технологии восстановления ручьев шкивов по месту без демонтажа при помощи специального переналаживаемого переносного устройства с большим диапазоном размеров обрабатываемых шкивов.

Возможными методами обработки (восстановления) ручьев шкивов лифтовых механизмов являются:

1. Обработка фасонной концевой фрезой представлена на рисунке 2.

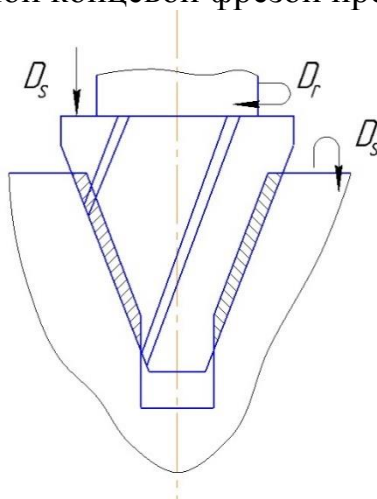


Рис. 2. Обработка боковых поверхностей ручьев фасонной концевой фрезой

Преимущества: простота получения профиля, малые габариты инструмента, одноуправляемое движение подачи, точность обработки [3].

Недостатки: необходимость дополнительного привода и специального инструмента, большие усилия резания.

2. Обработка фасонной дисковой фрезой представлена на рисунке 3.

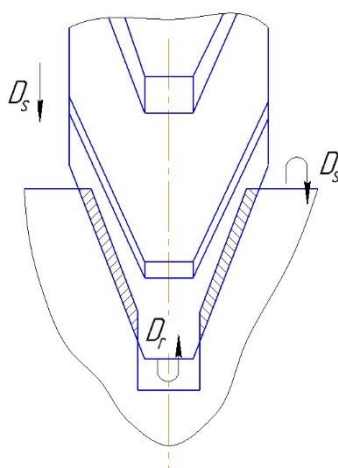


Рис. 3. Обработка боковых поверхностей ручьев фасонной дисковой фрезой

Преимущества: простота получения профиля, малое операционное время, одноуправляемое движение подачи, точность обработки [4].

Недостатки: необходимость дополнительного привода и специального инструмента [5].

3. Обработка фасонным резцом с радиальной подачей представлена на рисунке 4.

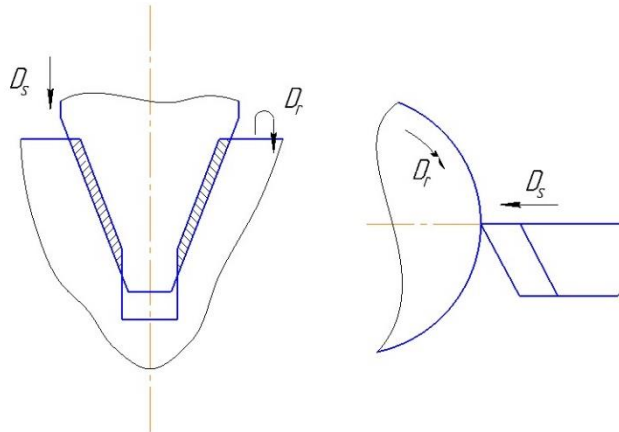


Рис. 4. Обработка боковых поверхностей ручьев фасонным резцом

Преимущества: простота получения профиля, небольшое операционное время, одноуправляемое движение подачи, точность обработки, малые габариты инструмента.

Недостатки: большие усилия резания, необходимость специального инструмента.

4. Обработка проходным резцом представлена на рисунке 5.

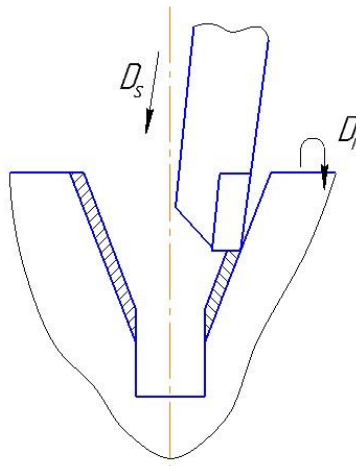


Рис. 5. Обработка боковых поверхностей ручьев проходным резцом

Преимущества: наименьшие усилия резания, возможность использования стандартного режущего инструмента.

Недостатки: значительное операционное время, необходимость обеспечения двух рабочих движений подачи.

Для восстановления рабочих поверхностей ручьев шкивов по месту с использованием специального переносного устройства наиболее подходят

третий и четвертый методы, т.к. не требуется дополнительного привода, что уменьшает и облегчает конструкцию приспособления.

В следствии всего перечисленного получается, что разработка технологии восстановления ручьев шкивов по месту – это перспективное и актуальное направление в области машиностроения.

Список литературы

[1] Бурцев В.М., Васильев А.С, Деев О.М. и др. Технология машиностроения. В 2-х томах. Т.2: Производство машин. Учебник для ВУЗов / Под ред Г.Н. Мельникова. - М.: Изд-во МГТУ, 1998. - 640 с.

[2] Грузоподъемные и пассажирские лифты / Тр. ВНИИПТМАШ. Выпуск 29-М. 1998.

[3] Зенкин Н.В., Щелупова О.А. Обработка внутренних поверхностей вращения фрезами с двумя режущими кромками // Инженерный вестник. 2012. № 7. С. 3.

[4] Зенкин Н.В., Щелупова О.А. Исследование влияния технологических факторов на качество поверхности обработанной фрезами с двумя режущими кромками // Машиностроение и компьютерные технологии. 2012. № 8. С. 1.

[5] Зенкин Н.В., Калмыков В.В., Малышев И.Е. // Фрезерование отверстий специальными фрезами // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 1 (5). С. 76-81.

Зенкин Николай Васильевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

Васильев Денис Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vasilyev.71@yandex.ru

Р.Ю. Кривов, В.М. Попков

РОЛЬ МЕЖИСКРОВОГО ЗАЗОРА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

На сегодняшний день электроэрозионная обработка (ЭЭО) считается одним из наиболее известных способов физико-химической обработки металлов. Разделяют на проволочно-вырезные, формообразующие и прошивные станки. ЭЭО широко применяется с целью производства деталей непростых конфигураций из труднообрабатываемых резанием металлов. По сравнению с обработкой резанием в ЭЭО используют инструменты, которые в несколько раз дешевле и более просты в изготовлении, тем самым позволяя сократить экономические показатели. При обработке удастся получить отверстия, которые невозможно выполнить механическим путем, к примеру, спиральные отверстия. Также благодаря уникальности процесса можно обрабатывать такие материалы как титан, стали различной твердости, твердые сплавы, где зачастую на операциях механической обработки процесс невозможен.

По мере приближения электрода-инструмента к заготовке увеличивается напряженность электрического поля. При достижении минимального зазора возникает электрический ток, вследствие чего происходит разрушение заготовки.

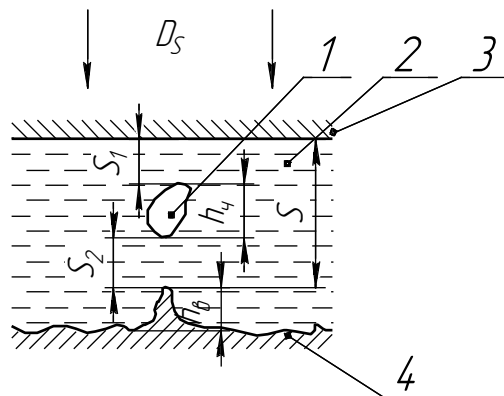


Рис. 1. Формирование расчетного зазора

На рис. 1 представлено образование расчетного зазора s между инструментом 3 и заготовкой 4. Зазор находится в зависимости от высоты $h_в$ местного микро- или макровыступа на заготовке. Из-за присутствия выступов напряженность в этих областях станет максимальной, что увеличивает вероятность пробоя. Помимо этого, напряженность будет зависеть от наличия электропроводных частиц 1 в диэлектрике 2. Из-за присутствия частицы 1 размером $h_ч$ уменьшается расчетный зазор до размера $s_1 + s_2$, иначе зазор равен s . Из-за того, что зазор будет меньше, чем расстояние между

электрод-инструментом и заготовкой, напряженность поля окажется выше на участках, где присутствуют токопроводящие частицы [1].

В случае если электрод приблизить вплоть до дистанции в несколько десятков микронов, то в отдельных участках напряженность достигает значения, при котором в участке наименьшего зазора появляется электрический разряд, через промежуток проходит направленное перемещение. Электроны расплавляют металл в области, где проходит электрический ток. В результате образуется углубление в форме сферической лунки (рис. 2) радиусом R . В процессе ЭЭО образуется поверхность с большим количеством лунок. В связи с этим глубина лунки и ее радиус будут оказывать значительное влияние на параметры шероховатости.

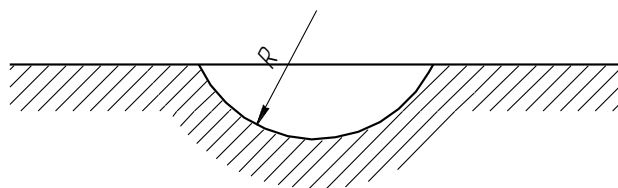


Рис. 2. Образование углубления

Вылетевшие из лунки частички сплава охлаждаются жидкостью, которая присутствует в зазоре, и затвердевают в виде шариков. В качестве жидкости применяют разнообразные диэлектрики: масла, керосин, дистиллированную воду. Предварительный нагрев жидкости, где происходит обработка, оказывает существенное влияние на производительность процесса. Изменение температуры влияет на вязкость жидкости. Контроль вязкости жидкости позволит облегчить удаление частиц из зоны обработки.

В случае повышения продолжительности импульсов тока, происходит интенсивный съем металла с катода. Подбирают такую периодичность импульса, при которой снятие частиц с катода будет незначительно, по сравнению с общим числом частиц, удаленных с электрода. Благодаря этому факту в качестве катода выбирают заготовку.

В связи с малым режимом релаксации и большой площадью обработки накапливается шлам. Необходимо принудительно прокачивать диэлектрическую жидкость через место обработки во избежание электрических пробоев. При небольших размерах электрода для прокачки жидкости выполняют одно отверстие в центре. Размер отверстия зависит от зазора и скорости прокачки. Также в некоторых случаях через отверстия проводят отсос загрязнённой жидкости, чтобы избежать попадания частиц в боковой зазор для исключения неконтролируемых импульсов тока [2].

При обработке разряды появляются не только на торцевой стороне электрода-инструмента, но и на его боковых сторонах. Рабочий зазор контролируется скоростью подачи инструмента. Материал для электродов выбирается из ряда элементов с высокой стойкостью к эрозии. К таким элементам относят медь, латунь, графит и т. д.

Таким образом, оптимальный расчет зазора складывается из изготовления и проектирования электрода-инструмента, выбора рабочей жидкости, установления значений импульса и напряженности. Это позволяет улучшить производительность, качество поверхности и точность обработки, что повышает технико-экономические показатели производства.

Список литературы

[1] Смоленцев В.П. Теория электрических и физико-химических методов обработки. Воронеж: ВГТУ, 2007. 288 с.

[2] Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1980, 184 с.

Кривов Роман Юрьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: roma-gf@yandex.ru

Попков Вячеслав Михайлович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: popkov.v.m@mail.ru

А.В. Волков, К.В. Болдычев

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ФРЕЗЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Известно, что особо высокая твердость и высокая теплостойкость сверхтвердых инструментальных материалов (СТМ) обеспечивают повышенную производительность благодаря возможности применять высокие скорости резания [1]. При этом экономически обоснованное их использование возможно только на станках с повышенной жесткостью и рекомендуется ограничено [1]. Недостатком СТМ является их низкая прочность на изгиб [1].

С целью разработки предложений усовершенствования операции по замене обработки деталей обычными инструментами на инструменты с СТМ, была выполнена работа по анализу операции, выбору инструмента с СТМ и соответствующего оборудования, выбору режимов резания, разработке базовой технологии выполнения отдельного перехода обработки детали и оценке технико-экономической эффективности операции при использовании инструмента с СТМ в соответствии с домашним заданием по курсу: "СТМ технология и особенности эксплуатации" специальности 151701.65.

Для чистовой обработки штамповых сталей холодного деформирования (инструментальной стали повышенной износостойкости марки Х6ВФ), содержащих хром, вольфрам и ванадий, относящихся к 6-й группе по обрабатываемости резанием, обычно прибегают к операции шлифования, что, требует значительных затрат на перешлифовку из-за засаливания абразивных кругов, а также на переналадку оборудования, что снижает производительность операции. [5]

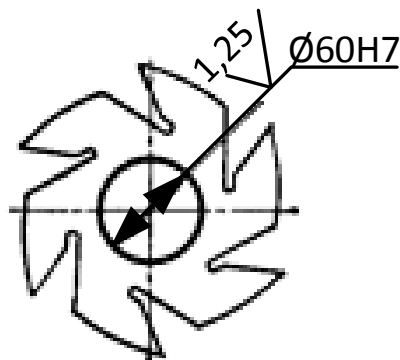
Последовательность выбора режима резания зависит от метода обработки [1].

При точении за исходные данные обычно принимают физико-механические свойства обрабатываемого материала, припуск и характер обработки (черновая или чистовая), по которым определяют глубину резания t и ориентировочное значение подачи S [1]. Далее выбирают материал резца и геометрические параметры его режущей части с учетом формы обработанной поверхности; определяют подачу S и корректируют ее по паспорту станка; назначают период стойкости T резца; выбирают скорость резания v , рассчитывают рекомендуемую частоту вращения и шпинделя станка (с учетом диаметра d детали) и уточняют ее по паспорту станка; по принятой частоте вращения шпинделя уточняют скорости резания и про-

веряют выбранный режим по мощности резания: $N_{рез} < 1,2 N_{дв}\eta$, где $N_{дв}$ и η - соответственно мощность двигателя и КПД станка [1].

Исходные данные:

Требуется разработать базовую технологию для растачивания посадочного отверстия $\varnothing 60H7$ затылованной заготовки цилиндрической, прямозубой фрезы из стали марки Х6ВФ, толщиной 40 мм, термообработанной до HRC₃, 56-60. Партия для обработки $T = 240$ шт. Эскиз заготовки представлен на рис. 1.



Торцевое биение опорных поверхностей – не более 0,03 мм

Рис. 1. Эскиз заготовки затылованной цилиндрической, прямозубой фрезы из стали марки Х6ВФ, толщиной 40 мм, термообработанной до HRC₃, 56-60

Обычно отверстие у фрезы обрабатывалось чистовым внутренним шлифованием на внутришлифовальном станке модели 3А227 при помощи шлифовального круга ПП 60х40х16 с режимами резания $S_o = 0,002$ мм/об, $S_m = 4800$ мм/мин, $t_{очн} = 1,7$ мин [5].

Заменим эту операцию на растачивание резцом с СТМ, а в качестве материала режущей части резца выберем вставку из Композита 01 (рекомендуются композиты 01, 02, 10) [1].

Композит 01 (эльбор-Р) – создан в начале 70-х годов. Этот материал состоит из беспорядочно ориентированных кристаллов кубического нитрида бора, полученных каталитическим синтезом. В результате высокотемпературного прессования под действием высокого давления первоначальные кристаллы BN_k дробятся до размеров 5...20 мкм. Физико-механические свойства композита 01 зависят от состава исходной шихты и термодинамических параметров синтеза (давления, температуры, времени). Примерное массовое содержание составляющих композита 01 следующее: до 92 % BN_k , до 3 % BN_r , остальное – примеси добавок- катализаторов.

Для растачивания применяем конструкцию резца, которая соответствует параметрам обработки отверстия – см. рис. 2 [5]:

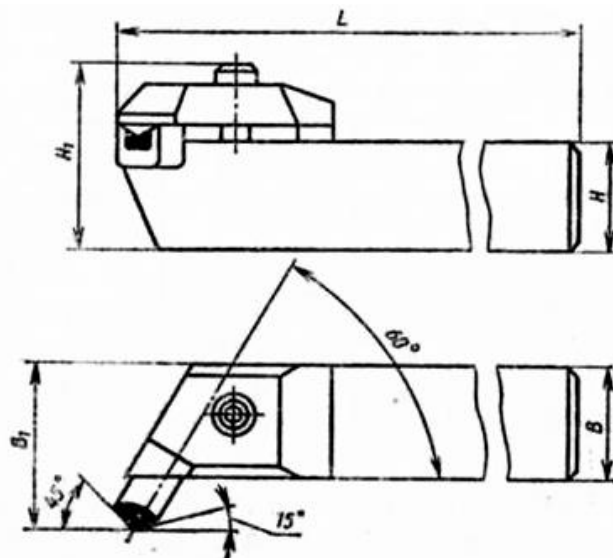


Рис. 2. Расточной резец для сквозных отверстий с косым креплением вставки с режущей пластиной из СТМ

Из таблицы 22 (стр. 118, [5]) выбираем резец 02.02.021-03 по ТУ 2-037-194 – 77 со вставкой 2146-0886 по условию максимальной жёсткости резца и вставки.

В соответствии с табл. 24 (стр. 120, [5]) для сталей инструментальных закалённых, HRC₃ 40-70, выбираем геометрические параметры резца: $\gamma = -15^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 15^\circ$, $r = 0,3$ мм.

Таблица 1

Технические характеристики автомата токарно-револьверного многооперационного с ЧПУ мод. 11Б40ПФ4

| | |
|---|----------------|
| Пределы частоты вращения шпинделя Min об/мин | 40 |
| Пределы частоты вращения шпинделя Max об/мин | 4000 |
| Класс точности станка по ГОСТ 8-82, (Н,П,В,А,С) | П |
| Мощность двигателя кВт | 15 |
| Число инструментов в магазине | 4 |
| Габариты станка Длина, Ширина, Высота (мм) | 3325_1630_2100 |
| Масса | 6800 |
| Диаметр прутка наибольший, мм | 40 |
| Диаметр детали над станиной, мм | 125 |
| Подача прутка, мм | 100 |

В качестве оборудования выбираем автомат токарно-револьверный многооперационный с ЧПУ 11Б40ПФ4, предназначенный для полной высокопроизводительной обработки деталей средней и высокой сложности из калиброванного прутка диаметром до 40 мм в автоматическом режиме и штучных заготовок диаметром до 125 мм в полуавтоматическом режиме в условиях мелкосерийного и среднесерийного производства. Технические характеристики станка 11Б40ПФ4 приведены в табл. 1. [5]

Закрепление заготовки проведём по наружной поверхности в трёхкулачковом патроне через разрезную втулку при зазоре до закрепления 0,02-0,1 мм (табл. 23, стр. 118, [2]). При этом имеется возможность обеспечения при тонкой чистовой расточке погрешности установки в радиальном направлении в пределах 10-30 мкм, а в осевом направлении 10-120 мкм (табл. 23, стр. 118, [2]) и чистоты поверхности до $Ra = 0,32-0,05$ мкм (табл. 15, стр. xx, [2]).

Начертим наладку обработки заготовки, например, в облегчённой версии КОМПАС-3D V9 – см. рис. 3:

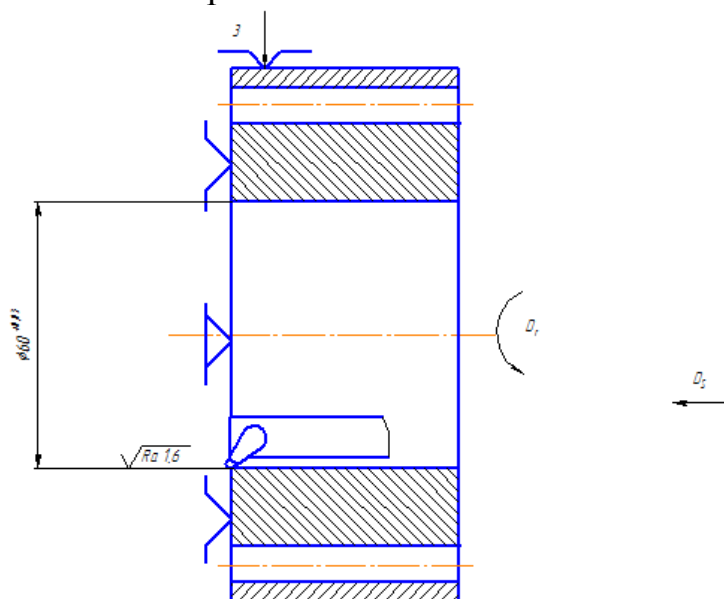


Рис. 3. Эскиз наладки

Следует заметить, что зажим заготовки фрезы представляет некоторую сложность из-за шеститизубчатой наружной поверхности. Потому зажим фрезы по наружной поверхности будем проводить в специальном приспособлении на базе трёхкулачкового патрона с разрезной втулкой (конкретная конструкция здесь не рассматривается), что позволит обеспечить достаточную силу зажима при надёжном обеспечении центрирования заготовки. [1]

В соответствии с табл. 8.18 (стр. 91, [5]) для сталей твёрдостью 58-70 HRC, рекомендуются следующие режимы резания при расточке композитом 01, 02 без удара:

$$v = 50 - 120 \text{ м/мин}, S = 0,03 - 0,1 \text{ мм/об}, t = 0,05 - 0,8 \text{ мм.}$$

Проведём назначение и расчёт режимов резания в соответствии с [5]:

- Глубина резания: $t = 0,5$ мм ([5], стр. 91, табл. 4.1)
- Подача $S_0 = 0,1$ мм/об ([5], стр. 91, табл. 4.1)
- Скорость резания $v = 100$ м/мин ([5], стр. 91, табл. 4.1)
- Частота вращения шпинделя $n = \frac{1000V}{\pi D}$ ([5], стр. 92)

$$n = \frac{1000 \cdot 100}{3.14 \cdot 120} = 265 \text{ мин}^{-1}$$

Назначаем частоту вращения шпинделя станка $n_{ст} = 250 \text{ мин}^{-1}$, тогда скорость резания будет: $V = \frac{\pi D n_{ст}}{1000} = \frac{3,14 \cdot 120 \cdot 250}{1000} = 94 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$.

1. Силы резания $P_{z,y} = 10 C_p t^x S^y V^n K_p$ ([5], стр. 93)

$$P_z: C_p = 247, x = 1, y = 1, n = 0 \text{ ([5], стр. 35, табл. 9)}$$

$$K_p = K_{M_p} K_{\phi_p} K_{\gamma_p} K_{\lambda_p} K_{r_p}; K_{M_p} = 2; K_{\phi_p} = 1, K_{\gamma_p} = 1, K_{\lambda_p} = 1, K_{r_p} = 1; K_p = 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2$$

$$P_z = 10 \cdot 247 \cdot 0,1^1 \cdot 0,5^1 \cdot 2 = 247 \text{ Н} \quad P_z = 10 \cdot 247 \cdot 1 \cdot 0,15^1 \cdot 2 = 1259,7 \text{ Н}$$

$$\text{Мощность резания: } N = \frac{P_z V}{1020 \cdot 60}$$

$$N = \frac{247 \cdot 94}{1020 \cdot 60} = 0,38 \text{ кВт}; N = N_{ст} \eta$$

Мощность двигателя станка: $N_{ст} = 15 \text{ кВт}$ - табл. 1.

КПД станка: $\eta = 0,75$; $N = 15 \cdot 0,75 = 11,25 \text{ кВт}$

2. Расчет основного времени: $t_{осн} = \frac{L}{S_M} = \frac{46}{37,5} = 1,2 \text{ мин}$

Выводы:

- Провели усовершенствование операции механической обработки при использовании инструмента с СТМ
- С учётом уменьшения основного времени обработки при использовании инструмента из СТМ обеспечено повышение производительности операции на 30%.

Список литературы

[1] Инструменты из сверхтвёрдых материалов. Богатырева Г.П., Гриценко Э.И., Гурвич Р.А., Девин Л.Н./ под редакцией Новикова Н.В. - Машиностроение, 2005. – 555 с. <http://e.lanbook.com/books/element.php?pllcid=25&pllid=799>.

[2] Краткий справочник металлиста / Под общ. ред. А.Е. Древаля, Е.А. Скороходова. - 4-е год., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2005. – 960 с.

[3] Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. Библиотека технолога. - М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.

[4] Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. - 4-е изд., перераб и доп. / под ред. Косиловой А.Г. и Мещерякова Р.К. - М.: Машиностроение, 1986.

[5] Режущие инструменты, оснащенные сверхтвёрдыми и керамическими материалами, и их применение: Справочник/ В.П. Жедь, Г.В. Боровский, Я.А. Музыкант, Г.М. Ипполитов. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.

Волков Александр Владимирович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: volkovkfmgtu@yandex.ru

Болдычев Кирилл Виторович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: boldychev.kirill@yandex.ru

А.А.Тагиев, В.Е.Хайченко

СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Литье по выплавляемым моделям представляет собой способ получения отливок в многослойных оболочковых неразъемных разовых формах. Формы изготавливают с использованием выплавляемых, выжигаемых и растворяемых моделей однократного применения. Применение этого способа обеспечивает возможность изготовления из любых литейных сплавов фасонных отливок, в том числе сложных по конфигурации и тонкостенных. Методом литья по *выплавляемым моделям* изготавливают отливки массой от нескольких граммов до нескольких десятков килограммов (корпуса и детали приборов, лопатки газовых турбин, арматуру, режущий и хирургический инструмент, мелкие автодетали, детали фотоаппаратов, киноаппаратов, швейных и текстильных машин, а также художественное литье). Литье по выплавляемым моделям используют в условиях единичного (опытного), серийного и массового производства.

В качестве наполнителя можно использовать практически все металлы: стали (легированные и углеродистые); цветные сплавы; чугун; благородные металлы; сплавы, не поддающиеся мехобработке.

Процесс литья включает ряд последовательных операций(рис. 1):

- изготовление легкоплавкой модели детали с последующей
- сборкой в блок с литниково - питающей системы (ЛПС);
- нанесение на модельный блок огнеупорного состава и
- выплавление модельного состава;
- сушка и обжиг литейной формы;
- заливка сплава в литейную форму и его кристаллизация
- освобождение отливок от огнеупорной оболочки и литниковой системы.

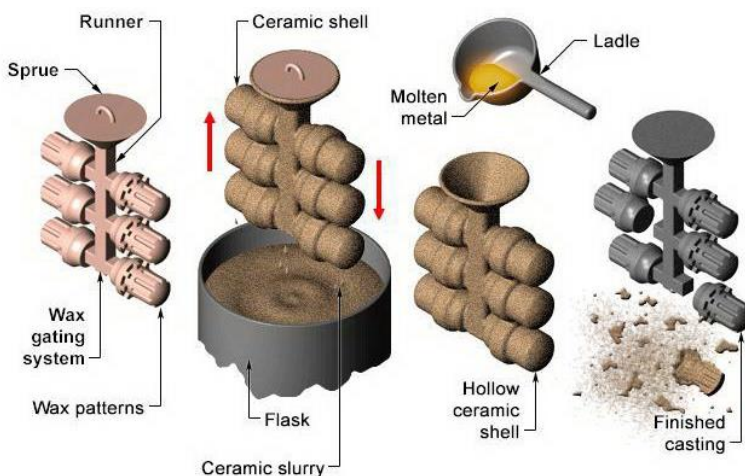


Рис. 1.

Технология литья по выплавляемым моделям имеет ряд специфических особенностей:

- Модель служит для получения только одной отливки,
- Металл заливают в тонкостенные неразъемные формы, получаемые путем нанесения огнеупорного покрытия на модель блок с последующей сушкой покрытия, удаления (вытапливания) модели и последующего прокаливания формы,
- Формовочная смесь представляет собой суспензию, состоящую из мелкозернистого огнеупорного материала и связующего раствора,
- Применение мелкозернистых пылевидных огнеупорных материалов обеспечивает очень высокое качество поверхности отливки.

Преимущества этого способа:

- возможность изготовления деталей из сплавов, не поддающихся механической обработке,
- получение отливок с классом точности размеров 3 до 9 и шероховатостью поверхности Ra 2,5–1,25 мкм, что в ряде случаев устраняет обработку резанием,
- возможность получения узлов машин, которые при обычных способах литья пришлось бы собирать из отдельных деталей,
- Технологический процесс хорошо автоматизирован и механизирован.

Недостатками же являются:

- Сложность и длительность процесса производства отливок,
- Применение специальной дорогостоящей оснастки.

Литьем по выплавляемым моделям изготавливают детали для приборостроительной, авиационной и другой отраслевой промышленности. Этот способ используют при литье жаропрочных труднообрабатываемых сплавов (лопатки турбин), коррозионно-стойких сталей, углеродистых сталей в массовом производстве (автомобильная промышленность).

Для получения отливок малых серий или опытных образцов успешно используются формы, изготовленные при помощи технологии «3D печати» без промежуточного процесса изготовления пресс-формы. Затем модели используются для изготовления керамических форм. Это достаточно экономичная технология для малых серий, так как модель, выращенная на трехмерном принтере, можно скорректировать по размерам и снова отлить.

С учетом развивающихся технологий, на заводах начинают применять компьютерное моделирование процессов кристаллизации отливки, что позволяет:

- Выявить места появления и процесс формирования дефектов;
- Отследить в реальном времени изменение температурно-фазовых полей процесса кристаллизации;
- Получить распределение векторов скоростей, давлений;
- Сформировать рекомендации по оптимизации ЛПС;
- Получить данные по распределению потока жидкого металла и движению шлаковых частиц в отливке.

Таким образом, появляется возможность в кратчайшие сроки провести оптимизацию литниково-питающей системы без доработки модельной оснастки, создания керамической оболочки, заливки и механической обработки детали, а продолжительность процесса отработки технологии получения годных отливок сократить приблизительно с 30 до 3-5 дней, то есть в 6-10 раз.

Использование компьютерного моделирования позволяет технолог-литейщику визуализировать процессы, происходящие при формировании отливки, оперативно внести изменения в технологию, оптимизировать литниково-питающую систему и обеспечить получение отливки с требуемой плотностью металла, работающей в условиях агрессивных сред и высоких давлений.

Использование литья по выплавляемым моделям позволяет получать отливки с монокристалльной структурой, направленной структурой, мелкозернистой; управлять процессом затвердевания отливки.

Список литературы

[1] Турищев В.В. Литье по выплавляемым моделям: взгляд изнутри URL: <http://sapr.ru/article/14907#1> (дата обращения 3.10.2017).

[2] Специальные способы производства отливок. Литье по выплавляемым моделям URL: <http://uas.su/books/2011/pigiron/334/razdel334.php> (дата обращения 6.10.2017).

[3] Сущность процесса литья по выплавляемым моделям. URL: <http://delta-grup.ru/bibliot/12/57.htm> (дата обращения 6. 10.2017).

[4] Корниенко А.Э. Литьё по выплавляемым моделям URL: <http://www.modificator.ru/terms/casting1.html> (дата обращения 11. 10.2017).

[5] Литьё по выплавляемым моделям. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B8%D1%82%D1%8C%D1%91> (дата обращения 11. 10.2017).

Тагиев Али Анар оглы – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: taqali777@gmail.com

Хайченко Виктор Ефимович – ст. преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kniizst2012@yandex.ru

Т.А. Журавлева, А.А. Рожнов, Ю.В. Паращук

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Практически любое научное исследование не обходится без проведения эксперимента. При этом, нередко статистическая обработка полученных экспериментальных данных требует значительно больших энергозатрат, чем само проведение эксперимента. Применение в этой области современных компьютерных программных продуктов позволяет не только упростить процесс обработки результатов эксперимента, но и глубже изучить исследуемый процесс или явление. В настоящее время разработано большое количество статистических пакетов программ, позволяющих специалистам, работающим в естественно - научных и инженерных областях, а также представителям различных гуманитарных профессий использовать самые современные методы статистического анализа.

Современная программа анализа данных, в большинстве случаев, представляет собой электронные таблицы с ограниченными по сравнению с обычными электронными таблицами средствами манипулирования данными, но с достаточно мощными методами расчетов по этим данным [8].

К наиболее популярным программным продуктам, используемым для статистической обработки результатов эксперимента можно отнести программы: STATISTICA, IBM SPSS Statistics, Origin, STADIA, STATGRAPHICS Plus и др. Простейшую статистическую обработку данных для большинства инженерных задач можно произвести с помощью пакета Microsoft Excel. Часто компании-разработчики предоставляют пользователям возможность ознакомления со своими программными продуктами с помощью пробных и демонстрационных версий. Демоверсия, как правило, представляет собой презентацию сильных сторон пакета без возможности его апробирования в работе. Пробные версии часто представлены в виде полной версии программы с ограниченным сроком действия. Благодаря этому пользователь может всесторонне изучить программный продукт и принять решение о необходимости его использования.

STATISTICA позволяет не только проводить статистический, а также графический анализ, но и осуществлять прогнозирование практически в любых областях знаний. Также программа STATISTICA позволяет разрабатывать пользовательские приложения, необходимые конкретному исследователю. Данный программный продукт состоит из набора статистических модулей, являющимися полноценными приложениями WINDOWS. Переключаться между модулями можно с помощью панели задач или открывая как обычное приложение WINDOWS. Подробное описание программы STATISTICA, а также примеры решения задач изложены в работе [8].

Статпакет IBM SPSS Statistics – это полнофункциональная статистическая система, предназначенная для решения исследовательских и бизнес-задач при помощи анализ данных [9]. Программа позволяет не только планировать исследования и собирать данные, но и осуществлять хранение и распространение результатов. Также благодаря пакету IBM SPSS Statistics имеется возможность осуществления всестороннего анализа данных. Ключевым элементом пакета SPSS Statistics является модуль IBM SPSS Statistics Base. Он обеспечивает доступ к данным и управление ими, выполняет подготовку данных к анализу и осуществляет их анализ. Также в модуле IBM SPSS Statistics Base возможно составление отчетов. В зависимости от характера исследовательских задач в IBM SPSS Statistics Base встраиваются дополнительные модули, например, IBM SPSS Custom Tables, IBM SPSS Regression и др.

Пакет Origin – несложный для освоения программный продукт, часто используемый исследователями для построения различных графиков и дальнейшей работы с ними. Также Origin позволяет проводить математическую обработку результатов исследований: искать зависимости в данных, проводить численное дифференцирование и интегрирование, осуществлять интерполяцию и экстраполяцию и др. [7].

Отечественный программный статистический комплекс STADIA относится к универсальным. Ведение диалога на русском языке и удобный интерфейс позволяют быстро научиться работе с комплексом. В STADIA возможно выполнять расчет показателей описательной статистики, дисперсионный и регрессионный анализ, анализ временных рядов и некоторые другие. В то же время возможности комплекса STADIA в части методов контроля качества довольно ограничены: хотя он и позволяет строить простейшие контрольные карты и диаграммы Парето, но такие методы, как планирование эксперимента и построение планов контроля, ему недоступны [6].

Статпакет STATGRAPHICS Plus включает более 250 статистических и системных процедур, применяющихся в бизнесе, экономике, маркетинге, медицине, на производстве и других областях. Благодаря системе Statfolio STATGRAPHICS Plus существует возможность сохранения в специальном файле предпочитаемых пользователем методов анализа, параметров стат-процедур, видов графиков и таблиц. При загрузке в Statfolio новых данных они автоматически подвергаются заданной процедуре обработки [6]. Интеллектуальная экспертная система StatAdvisor интерпретирует результаты анализа, определяет значимые эффекты и выявляет ошибки в проведенном анализе. Система StatGallery используется для составления отчетов.

Использование рассмотренных выше пакетов значительно упрощает статистическую обработку результатов исследования, однако для получения корректных выводов исследователю необходимо владеть не только специальными терминами и определениями на языке разработчика используемого им приложения (как правило, английском), но и обладать знаниями в области статанализа для корректного выбора статистического теста для обработки результатов.

Список литературы

[1] Боровиков В.П. Популярное введение в программу STATISTICA. – М.: Компьютер Пресс. - 1998. – 267 с.

[2] Калмыков В.В., Федорова О.С., Малышев И.Е. Исследование статистических методов анализа технологических факторов при токарной обработке // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 48-52.

[3] Калмыков В.В., Федорова О.С. Основные статистические методы анализа результатов экспериментов // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 1 (5). С. 68-75.

[4] Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В., Малышев Е.Н. Организация статистического приемочного контроля качества продукции по количественному признаку // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 162.

[5] Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В. Определение оптимального количества классов группирования экспериментальных данных при интервальных оценках // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 3 (7). С. 56-58.

[6] Кучеров А. С. STADIA и STATGRAPHICS. Часть 1: Лабораторный практикум / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Самара. - 2005. - 32 с

[7] Менжевицкий В.С. Графическое отображение данных с использованием пакета Origin. Учебно-методическое пособие. - Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет. - 2013. - 56с.

[8] Спириин Н.А., Лавров В.В., Зайнуллин Л.А., Бондин А.Р., Бурькин А.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Учебное пособие / Под общ. ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ООО «УИНЦ». - 2015. – 290 с.

[9] [Электронный ресурс]: Predictive solution <http://spss.ru/> (дата обращения 06.10.2017 г.)

Журавлева Татьяна Александровна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 1m-kf.mgtu@inbox.ru

Рожнов Андрей Александрович – старший преподаватель КГУ им. К.Э. Циолковского. E-mail: roznov1976@yandex.ru

Паращук Юлия Владимировна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: juliyafuliya1710@yandex.ru

В.В. Калмыков, А.В. Лепченков, И.Р. Насевич

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБУЕМОГО МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТЕЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

При использовании большинства стандартных способов окончательной обработки образуется хаотичный характер микрорельефа поверхностей. Такая неоднородность микрорельефа вызывает трудности в области точного измерения и контроля технического обеспечения [2, с. 217]. Нарушаются основные геометрические зависимости между формой, размерами и взаиморасположением неровностей, а также между технологическими параметрами обработки и геометрией инструмента.

В некоторых случаях, чтобы получить необходимое качество поверхности, прибегают к способам искусственного формирования микрорельефа.

Одним из таких способов является вихревое течение и фрезерование. В его основе лежит прерывистый контакт вращающейся заготовки и вращающегося инструмента. При таком способе образования микрорельефа управление параметрами происходит за счет изменения продольной подачи инструмента и частот вращения инструмента и заготовки [1, с. 114].

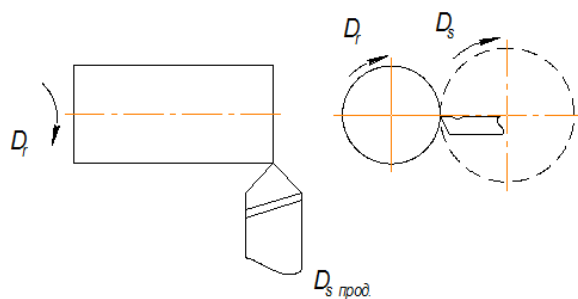


Рис. 1. Схема образования углублений микрорельефа

Данный процесс является универсальным, так как использование короб переключения скоростей и подач дает возможность изменять эти значения в большом диапазоне. Но этот способ имеет ряд недостатков, выраженных в виде ударного характера резания, что негативно влияет на оборудование и инструмент, применением сложных приводов в оборудовании.

Способ вибродинамического накатывания, предложенный В.Б. Саховым, основан на холодном пластическом деформировании материала. Главной его особенностью является совокупность раскатывающего и ударного действий. В итоге остаточные деформации возрастают и происходит упрочнение по глубине и степени залегания упрочненного слоя [3, с. 13].

Данный способ относительно универсален и имеет свои перспективы, так как с его помощью можно получать разнообразные углубления на поверхностях, которые будут иметь множество отличий, таких как глубина углублений, их форма и др. Однако его прерывистый характер углублений негативно сказывается на смазке таких деталей.

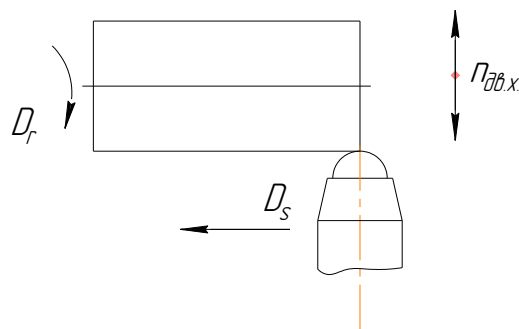


Рис. 2. Схема ударного вибрационного накатывания

Существует ряд требований, которые предъявляют к способам образования регулярного микрорельефа:

- 1) должна соблюдаться однородность микрорельефа;
- 2) должна присутствовать функциональная зависимость между режимами обработки и неровностями микрорельефа;
- 3) используемый метод должен обеспечить большой диапазон значений параметров микрорельефа;
- 4) возможность независимого управления микронеровностями;
- 5) способ должен быть производителен, экономичен, просто в исполнении [Там же, с. 16].

При правильном выборе метода обработки и соблюдении вышеуказанных требований можно достичь необходимого микрорельефа поверхности, а значит получить деталь, которая будет обладать необходимым качеством поверхности.

Список литературы

- [1] Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Дмитриева О.В. Инженерия плосковершинного регулярного микрорельефа поверхности при многоцелевой обработке деталей // Вестник УГАТУ. – 2009. – №4(33). – С. 113–115.
- [2] Маталин А.А. Технология механической обработки // Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение. – 1977. – С. 217-220.
- [3] Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. 2-е изд., перераб. и доп. // Л.:Машиностроение, Ленингр. отделение. – 1982. – С. 6-18.

Калмыков Вадим Владимирович – ст. преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lex-lepchenkov@yandex.ru

Лепченков Александр Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lex-lepchenkov@yandex.ru

Насевич Илья Русланович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nasevich98@mail.ru

И.В. Кузнецов, Д.А. Барина, Ф.И. Антонюк

ТОЧНОСТЬ ДИАМЕТРАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ОСАЖЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОКОВОК ПРИ ОСАДКЕ НА ПРЕССАХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Осадка штучных цилиндрических заготовок является одной из наиболее распространенных операций увеличения диаметра заготовок посредством уменьшения их высоты перед основной формоизменяющей операцией холодной объемной штамповки (ХОШ) [2].

В зависимости от особенностей процесса осадки к погрешностям формы и точности размеров осаживаемых заготовок предъявляют различные требования [3].

Требования, предъявляемые к точности высотного размера (H) и максимального диаметра (D_0) осаживаемой поковки, зависят от специфики последующей основной формоизменяющей операции [1].

Точность диаметральных размеров осаживаемых поволоков – один из основных показателей геометрической точности цилиндрических заготовок, наряду с параллельностью торцевых поверхностей, после их осадки, ввиду того, что именно она определяет точность расположения штучных заготовок в матрице формоизменяющей операции.

Для анализа точности диаметральных размеров осаживаемых цилиндрических заготовок использовали общие положения теории точности процессов объемной штамповки, основу которой составляют системный анализ и теория параметрической чувствительности. Ее применение позволяет получить функции чувствительности (ФЧ), отражающие степень влияния исходных параметров технологической системы на ее выходной параметр – диаметр осаживаемых заготовок [4].

При осадке исходная математическая модель представляется уравнением равновесия сил, действующих на систему кривошипный пресс – штамп и осаживаемую поковку:

$$C(x_1 - H) - P(x_1, x_m, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0 \quad (1)$$

и если выполняется операция с сохранением объема исходной заготовки между плитами штампа для осадки, дополняется указанным условием:

$$V = V(x_1, x_m) \quad (2)$$

где C – коэффициент жесткости системы кривошипный пресс – штамп; H – настроечный размер, обеспечивающий получение высотного размера поковки x_1 ; x_m – ее контролируемый размер (диаметр); $x_i \dots x_n$ – характеристики материала поковки, коэффициент контактного трения и др. параметры, влияющие на силу сопротивления поковки деформированию.

Используя расчетно-аналитическое моделирование на основании формул (1) и (2) были получены формулы для коэффициентов преобразования относительных случайных погрешностей в относительную погрешность диаметрального размера осаженной поковки:

$$K_{\sigma d} = \frac{\delta d}{\delta \sigma_s} = \frac{\sigma_s \frac{\pi d^2}{4h} \left(1 + \mu \frac{d}{3h}\right) \cdot 0,5}{C + \sigma_s \frac{\pi d^2}{4h} \left(1 + 2,5\mu \frac{d}{3h}\right)} \quad (3)$$

$$K_{\mu d} = \frac{\delta d}{\delta \mu} = \frac{\sigma_s \frac{\pi d^2}{4h} \mu \frac{d}{3h} \cdot 0,5}{C + \sigma_s \frac{\pi d^2}{4h} \left(1 + 2,5\mu \frac{d}{3h}\right)} \quad (4)$$

$$K_{Vd} = \frac{\delta d}{\delta V} = \frac{\frac{C}{2} + \sigma_s \frac{\pi d^2}{4h} \mu \frac{d}{3h} \cdot 0,5}{C + \sigma_s \frac{\pi d^2}{4h} \left(1 + 2,5\mu \frac{d}{3h}\right)} \quad (5)$$

Используя методику расчета коэффициентов преобразования относительных исходных погрешностей можно с достаточной для практических целей точностью прогнозировать погрешности размеров поковок, осаживаемых на прессах для применения их в качестве штучных заготовок для различных операций ХОШ.

Список литературы

[1] Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Мкртчян А.Б. Применение статистических методов анализа к оценке изменения диаметра цилиндра при холодной осадке // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 8-1. – С. 9-13.

[2] Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Сорокина И.И. Формоизменение цилиндрических заготовок при холодной осадке на кривошипном и гидравлическом прессах // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2016. – № 6. – С. 13-18.

[3] Воронцов А.Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: Учебное пособие: в 2т. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.

[4] Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.А. Колмогоров и др.; Под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.

Кузнецов Иван Васильевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: van-cuznetsow@yandex.ru.

Барина Дарья Андреевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: daria.barinova2016@yandex.ru.

Антонюк Феликс Иванович – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: antonyukfi@yandex.ru

А.В. Барков, Н.В. Зенкин

ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ПРИ КОНТУРНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Одной из основных задач любого технологического процесса обработки резанием является обеспечение точности деталей.

Известно, что на конечную точность получаемых деталей влияет множество факторов. Рассмотреть и проанализировать их все в процессе механической обработки невозможно и во многих случаях экономически нецелесообразно. По этой причине более приемлемым решением является определение таких факторов, которые вносят наибольший вклад в снижение точности деталей и их компенсирование.

Упругие деформации технологической системы зависят от выбранной схемы обработки. Они возникают под действием силовых факторов, всегда появляющихся при функционировании технологической системы. В общем случае деформации можно рассчитать по следующей формуле [1, с. 117]:

$$y = \frac{P}{j} \quad (1)$$

где P – силовой фактор, j – жесткость технологической системы.

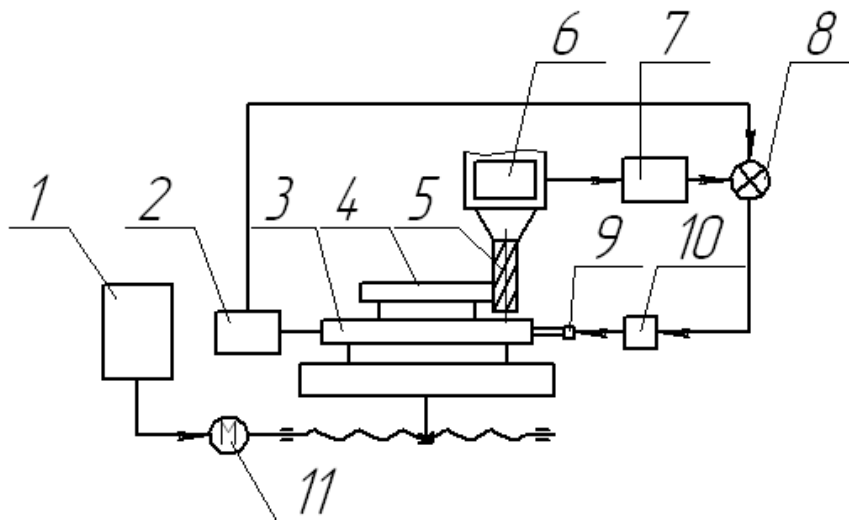


Рис. 1. Блок-схема адаптивной системы, обеспечивающей компенсацию упругих деформаций технологической системы

В простейшем случае, если и силовые факторы, и жесткость системы являются постоянными величинами, упругие деформации могут быть рассчитаны и компенсированы предварительной настройкой технологической системы.

Однако на практике обе величины являются не постоянными, а изменяющимися, что вызывает колебание величины деформаций. Это делает невозможным их предварительную компенсацию.

Основными причинами, вызывающими изменение силовых факторов, являются: изменение глубины резания, вызванное колебаниями припусков; различная твердость разных участков обрабатываемой заготовки; износ режущего инструмента.

Жесткость технологической системы j зависит от жесткости её составных частей: жесткости приспособления, жесткости инструмента, жесткости оборудования, жесткости заготовки и т.д.

В настоящее время для борьбы с деформациями технологической системы используют различные системы регулирования динамической настройки технологической системы. Блок-схема одной из таких систем, разработанная в МГТУ Н.Э. Баумана, приведена на рис. 1 [2, с. 206].

На фрезерном станке с ЧПУ обрабатывается заготовка 4 концевой фрезой 5. Управление приводами 11 подачи осуществляет устройство ЧПУ 1. Возникающие при обработке силы резания вызывают упругие деформации технологической системы, фиксируемые датчиком 6. Заданное управляющей программой положение контролирует датчик 2. Сигналы датчиков сравниваются в сумматоре 8. При возникновении сигнала рассогласования последний усиливается усилителем 7 и подается на вход исполнительного элемента привода управления 9. Исполнительный элемент 9 сдвигает верхнюю плиту накладного динамометрического стола 3 вместе с установленной на ней заготовкой относительно стола 10 станка. Расстояние и направление корректирующего перемещения соответствуют значению и направлению деформации технологической системы. [2, с. 206].

Данные системы имеют большое количество преимуществ, например, возможностью оперативно подстроиться под изменяющиеся условия обработки. Недостатком представленных систем является недостаточная скорость срабатывания; их применение ограничивает их высокая стоимость. Поэтому в некоторых случаях избавиться от погрешностей обработки, вызванных упругими деформациями, можно и другими способами, например, спрогнозировав распределение деформаций по длине обрабатываемого участка и внося коррективы на этапе подготовки производства (например, соответствующим образом искажив траекторию движения режущего инструмента).

Список литературы

[1] Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

[2] Технология машиностроения: учеб. для вузов: в 2 т. / [В. М. Бурцев и др.] ; под ред. Г. Н. Мельникова. – 3-е изд., испр. и перераб. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 551 с.

[3] Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.

Барков Александр Викторович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: cbzst@yandex.ru

Зенкин Николай Васильевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

В.К. Воронин, В.М. Попков

УНИВЕРСАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Универсальная установка предназначена для исследования и испытания технологических процессов механической вытяжки тонкостенных цилиндрических и коробчатых деталей, а так же может быть использована непосредственно для изготовления деталей в мелкосерийном производстве. Установка монтируется а модернизированной гидропрессе П481А усилием 400 кН и позволяет вытягивать детали с диаметром или стороной от 10 до 70 мм, глубиной до 70 мм. Максимальный диаметр вытягиваемой заготовки 130 мм. Прижим заготовки осуществляется посредством гидравлического цилиндра двустороннего действия, работающего индивидуальной насосной станцией. Гидравлическая схема позволяет устанавливать любое постоянное усилие прижима в диапазоне от 0 до 60000 Н.

Конструкция установки показана на рисунке. Нижняя часть смонтирована на плите 1 и на опорах 2 установлена на столе пресса. Верхняя часть связана через плиту 3 с траверсой пресса. На зеркало матрицы укладывают штампуемую заготовку и включают привод прижима. Шток гидроцилиндра, соединенный с помощью винта 5, самоустанавливающейся крестовины 6, колонок 7 и быстросменных шайб 8 с прижимом 9, перемещая последний вниз, прижимает с определенным усилием заготовку к матрице через кольцо 10 и сменный вкладыш 11. Затем сообщается движение пуансону 12, закрепленному в пуансонодержателе 13 накидной гайкой 14, который, воздействуя на заготовку производят вытяжку тонкостенной цилиндрической или коробчатой детали. При обратном ходе траверсы пресса деталь снимается с пуансона вкладышем и остается в матрице. Гайки 15 и тяги 16 при этом не достигают нижней плоскости прижима. После короткого хода вверх штока прижимного гидроцилиндра колонки освобождают быстросменные шайбы, и после извлечения последних из пазов колонок с помощью траверсы пресса и тяг прижим перемещается в крайнее верхнее положение. При этом готовая деталь извлекается из матрицы выталкивателем 17. Для изготовления деталей различных типоразмеров и конфигураций узлы пуансона, матрицы и прижима выполнены сменными в виде взаимозаменяемых пакетов.

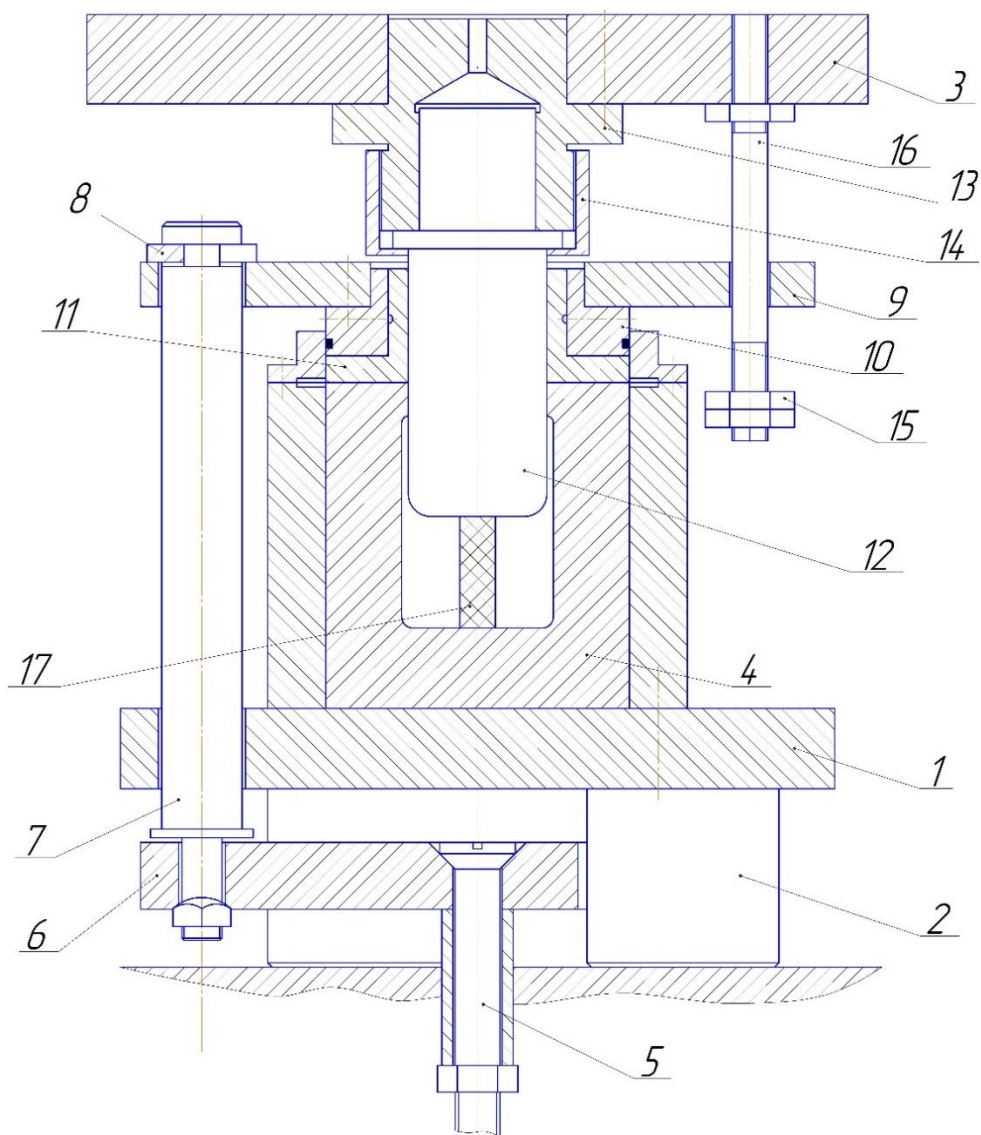


Рис. 1.

Хорошее качество поверхности и геометрическая точность деталей могут быть обеспечены при равномерных по контуру вытяжных зазорах. Для выполнения этого условия в установке предусмотрены направляющие колонки (на рисунке не показаны). Величина зазоров в зависимости от конфигурации и размеров деталей устанавливается в пределах $1,1 - 1,3S_0$, где S_0 – толщина исходной заготовки.

Воронин Виктор Константинович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: v-a-r-o-n-a@mail.ru

Попков Вячеслав Михайлович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: popkov.v.m@mail.ru

СЕКЦИЯ 2.

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.А. Родин, И.Н. Зыбин

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ СПОСОБОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И МЕХАНИЗМОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Восстановление деталей – это эффективный способ продления срока службы деталей машин и механизмов. Восстановление дает возможность экономить высококачественные металлы, топливо, энергетические и трудовые ресурсы, а также позволяет рационально использовать природные ресурсы. Для восстановления работоспособности изношенных деталей требуется до 5-8 раз меньше технологических операций по сравнению с изготовлением новых деталей [1].

Эффективными ресурсосберегающими способами восстановления деталей машин и механизмов являются электроконтактные способы нанесения покрытий. По сравнению с дуговыми способами наплавки электроконтактные способы обеспечивают незначительный нагрев деталей, отсутствие выгорания легирующих элементов, увеличение производительности до 2-3 раз, уменьшение расхода материалов до 3-4 раз за счет сокращения потерь на разбрызгивание металла и создание минимально необходимого припуска на последующую обработку [2].

Эти способы позволяют образовывать соединения между присадочным и основным материалами без их плавления. В ряде случаев возможно только незначительное подплавление соединяемых металлов с выдавливанием жидкого металла из зоны контакта [3]. Это позволяет предотвратить перемешивание присадочного и основного металла, уменьшить размеры ЗТВ, избежать возникновения дефектов, характерных для литой структуры.

В зависимости от применяемых сварочных материалов к основным электроконтактным способам относят приварку порошковых материалов, приварку металлической ленты, наварку проволокой [4].

Сущность процесса электроконтактной наварки порошковыми материалами заключается в следующем. В зону контакта электрода и детали подается металлический порошок из специального бункера. При пропускании импульсов тока через эту зону контакта с приложением давления к электроду формируется сварная точка. Наварка выполняется по винтовой линии с перекрытием соседних сварных точек за счет вращения детали и продольной подачи электрода. Толщина слоя покрытия определяется углом захвата порошка роликом [2].

Основное влияние на качество слоя и его сцепление с металлом оказывает скорость напекания, влияющая на температурный режим в процессе напекания.

Способ характеризуется наличием пористости покрытия. При повышении скорости напекания пористость возрастает, а качество сцепления может улучшаться в результате уменьшения окисления поверхности детали и порошка в процессе нагрева и формирования слоя [5].

Электроконтактная приварка металлических порошков позволяет получать покрытия с различными свойствами, например, износостойкие, жаростойкие, коррозионностойкие и т.д.

Однако при этом способе необходимо создавать дополнительное устройство для обеспечения стабильной подачи и дозировки порошка в зону приварки. Толщина покрытия, как правило, не превышает 0,3-0,5 мм, что сужает номенклатуру восстанавливаемых деталей.

Способ приварки металлической ленты аналогичен способу приварки металлических порошков, за исключением того, что в качестве присадочного материала используется металлическая лента.

Перед приваркой стальную ленту предварительно нарезают согласно размерам восстанавливаемого участка поверхности, которые необходимо заранее определить, причем зазор на стыке концов ленты не должен превышать 0,5 мм. Ленту приваривают в два перехода. В начале её прихватывают отдельными точками, преимущественно в зоне стыка концов ленты. После этого включают вращение детали и подачу электрода, к которому прикладывают давление, и проводят сплошную приварку перекрывающимися точками и с перекрытием витков спирали между собой. Материал ленты выбирают с учётом эксплуатационных требований к детали и требуемых свойств к покрытию [4].

Преимуществом способа является возможность использования лент разного химического состава и относительно недорогая стоимость присадочного материала в виде ленты по сравнению с порошковыми материалами.

Следует отметить, что способ отличается повышенной трудоемкостью процесса вследствие необходимости предварительного раскроя ленты и закрепления ее на восстанавливаемой поверхности детали путем прихватки, а также сложностью восстановления деталей не цилиндрической формы. Толщина наносимого слоя металла, как правило, не превышает 0,5-0,8 мм, что, прежде всего, связано со сложностью гибки листового металла большей толщины.

При электроконтактной наварке проволокой по сравнению с электроконтактной приваркой металлических порошков и металлических лент в качестве присадочного материала, подаваемого в зону контакта электрода и детали, применяют стальную проволоку различного диаметра.

В отличие от использования других присадочных материалов проволока в процессе наварки деформируется, величина ее осадки может достигать величины 65-70% и более.

В зависимости от требований, предъявляемых к восстанавливаемой детали и условий ее эксплуатации, наварка может выполняться в твердой

фазе [6] без подплавления металлов в зоне их контакта и с подплавлением соединяемых металлов [3].

Основными достоинствами способа являются возможность восстановления наружных поверхностей деталей вращения диаметром от 10 мм и более, возможность получения толщины покрытия в широком диапазоне (от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров) с различной твердостью поверхности покрытия. Кроме того, в отличие от металлических лент и порошков стальная проволока является более дешевым и достаточно доступным материалом.

Таким образом, среди электроконтактных способов восстановления деталей машин и механизмов наиболее широкими технологическими возможностями обладает способ электроконтактной наварки проволокой.

Список литературы

[1] Молодык Н.В., Зенкин А.С. Восстановление деталей машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 480 с.

[2] Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П., Константинов В.М. Восстановление деталей машин. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.

[3] Дубровский В.А., Булычев В.В. Электроконтактная наплавка проволокой с подплавлением соединяемых металлов // Сварочное производство. – 1998. – №1. – С. 22-24.

[4] Латыпов Р.А., Бурак П.И., Бардадын К.А. Электроконтактная приварка и ее особенности при восстановлении и упрочнении деталей // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2002. – № 1 (1). – С. 134-139; URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25277302> (дата обращения: 01.10.2017).

[5] Воловик Е.Л. Справочник по восстановлению деталей. – М.: Колос, 1981. – 351 с.

[6] Нафиков М.З., Обоснование технологических процессов и разработка технических средств восстановления автотракторных деталей электроконтактной наплавкой: автореф. дисс. докт. техн. наук: 05.20.03- Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. Саранск. 2010. 36 с.

Родин Артем Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 23911248q@gmail.com

Зыбин Игорь Николаевич – канд. техн. наук доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: igor1zybin@yandex.ru

Г.В. Орлик, А.Г. Орлик, А.С. Коростелкин

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ НА МЕЖКРИСТАЛЛИТНУЮ КОРРОЗИЮ СТАЛИ 08X18H10T

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Линзовый патрубок, представленный на рис. 1, широко применяется в таких отраслях промышленности как энергетика, химическая и пищевая промышленность, машиностроение, судостроение.



Рис. 1. Линзовый патрубок

В данной работе линзовый патрубок применяется на плавучей насосной станции. Основные требования, предъявляемые к нему: прочность, надежность, а также устойчивость материала к воздействию агрессивных сред, в частности, морской воды. Для обеспечения эксплуатационных требований рекомендуется использовать хромоникелевую сталь аустенитного класса 08X18H10T, которая обладает повышенной сопротивляемостью межкристаллитной коррозии (МКК), что важно для условий работы линзового патрубка. Структура этой марки стали в закаленном состоянии представляет собой аустенит. После нагревания до 450-850°C начинается выделение карбида хрома на границе аустенитных зерен [1]. При этом может проявляться склонность к межкристаллитной коррозии, снижающей пластичные свойства материала. Возникающая межкристаллитная коррозия – это негативный параметр нержавеющей стали. Нужно отметить, что если межкристаллитная коррозия возникнет в изготавливаемом из данной стали линзовом патрубке, это приведет к уменьшению срока эксплуатации узла

или к аварии. Поэтому так важно в процессе производства изделия проводить диагностику на межкристаллитную коррозию. [2]

Для предупреждения появления МКК, перед сваркой патрубковой линзы и определения оптимальных параметров режима сварки следует произвести испытания на контрольных образцах. В соответствии с ГОСТ 6032-2003 существует ряд методов испытаний склонности стали к межкристаллитной коррозии.

Для оценки склонности материала линзового патрубка к межкристаллитной коррозии следует применить метод АМУФ. Испытания образцов производят в растворе серной кислоты и сернистой меди в присутствии металлической меди и фтористого натрия или фтористого калия (метод АМУФ). Преимуществом метода АМУФ является значительное уменьшение затрат времени на проведение испытания образцов на МКК по сравнению с остальными способами, которые также могут быть применены. Для испытаний методом АМУФ изготавливают сварные образцы в количестве 8 шт., 4 из которых являются контрольными. [3]

Исследование влияния параметров режима аргонодуговой сварки проводили на образцах из стали 08X18H10T длиной 250 мм, шириной 80 мм, толщиной 4 мм. Параметры режимов сварки представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры режима сварки контрольных образцов

| № опыта | Толщина металла, мм | Число проходов | Диаметр сварочной проволоки, мм | Сварочный ток, А | Напряжение дуги, В | Расход аргона, л/мин | Скорость сварки, м/ч |
|---------|---------------------|----------------|---------------------------------|------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 4 | 2 | 1,6 | 78 | 11 | 7 | 15 |
| 2 | 4 | 1 | 2 | 130 | 15 | 9 | 12 |

В процессе испытаний по обнаружению склонности к МКК образцы были изогнуты на угол $90^\circ \pm 5^\circ$. Осмотр образцов проводили с помощью лупы при 16 - 20х увеличении. Отсутствие трещин на образцах, изогнутых после испытания, за исключением продольных трещин и трещин непосредственно на кромках, свидетельствует о стойкости стали к МКК. На рис. 2 представлен образец, сваренный на параметрах режима сварки №1 таблицы 1. В данном случае образец не имеет склонности к межкристаллитной коррозии.

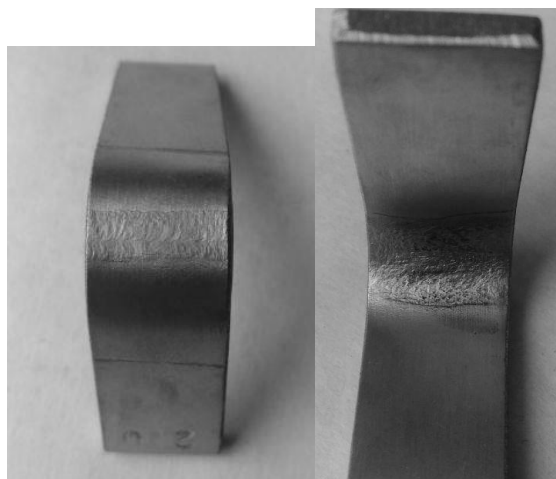


Рис. 2. Образец №1 после испытания

При сварке образцов на параметрах режима №2 таблицы 1, наблюдается увеличение объема сварочной ванны вследствие увеличения погонной энергии. При этом наблюдается укрупнение структуры металла шва, что весьма нежелательно, с точки зрения его коррозионной стойкости. Замедленное остывание сварных швов из нержавеющей сталей приводит к выпадению избыточной фазы по границам зерен аустенита, что совершенно недопустимо, так как в данном случае шов должен обладать стойкостью против межкристаллитной коррозии. Изменение напряжения дуги влияет на интенсивность металлургических процессов в дуговом промежутке. Увеличение напряжения дуги усилило окисление хрома и титана, что, в свою очередь, привело к уменьшению количества α -фазы в шве. На рис. 3 представлен образец, сваренный на параметрах режима сварки №2, которые представлены в таблице 2. Наличие трещин на образце, изогнутого после испытания свидетельствует о склонности стали к МКК. На рис. 4 приведена структура стали 08X18H10T, склонной к межкристаллитной коррозии при 200 – кратном увеличении. [4]

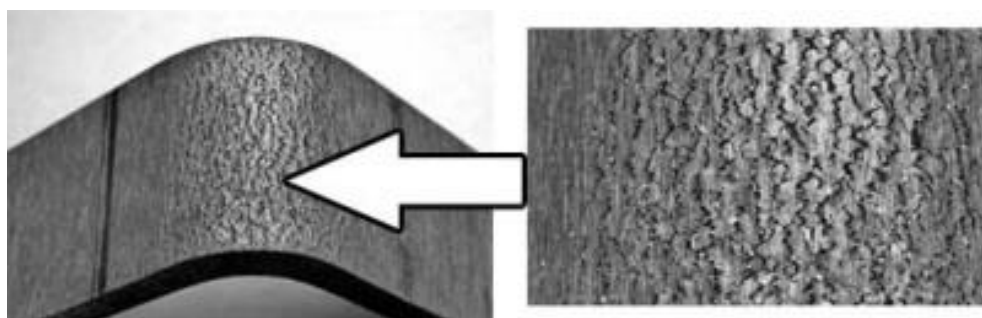


Рис. 3. Образец №2 после испытания

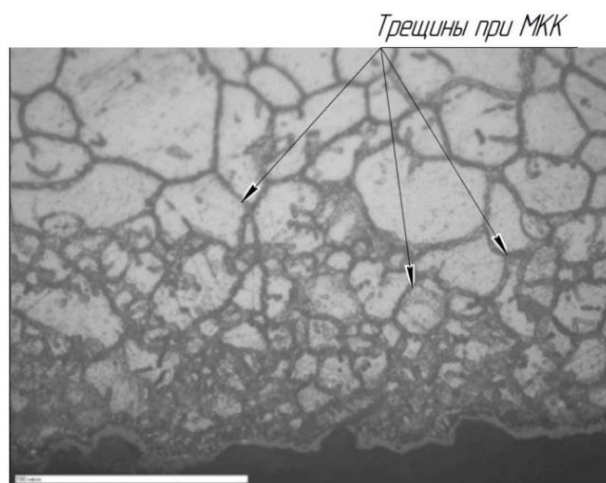


Рис. 4. Структура стали 08X18N10T при 200 – кратном увеличении

Если при изгибе контрольные образцы ломаются или на них обнаруживают трещины, следует провести металлографические исследования образцов после испытания. Для выявления МКК металлографическим методом из неизогнутого участка образца, прошедшего испытания, вырезают шлиф таким образом, чтобы плоскость реза была перпендикулярна к контролируемой поверхности образца. При вырезании шлифа из сварного образца линия реза должна проходить перпендикулярно к сварному шву и плоскость реза должна включать металл шва, зону термического влияния и основной металл. Рекомендуемая длина шлифа по контролируемой поверхности должна быть не менее 15 - 20 мм. Плоскость реза должна быть плоскостью шлифа. Способ изготовления шлифа должен обеспечить отсутствие завала кромок и заусенцев. Наличие и глубину МКК устанавливают на протравленных шлифах при увеличении не менее 200х. Травление проводят лишь до слабого выявления границ зерен. Шлиф просматривают со стороны контролируемой поверхности образца. Определяют максимальную глубину разрушения, выявленную в шести полях зрения. В эти поля зрения должны быть включены участки с наибольшей глубиной МКК. Признаком стойкости к МКК при металлографическом контроле считают разрушение границ зерен на максимальную глубину до 30 мкм, в образцах из стали 08X18N10T толщиной менее 1,5 мм – на глубину не более 10 мкм.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что для обеспечения стойкости стали к межкристаллитной коррозии при изготовлении линзового патрубка необходимо соблюдать параметры режима сварки №1, которые обеспечивают эксплуатационные свойства изделия.

Список литературы

[1] Акулов А. И., Бельчук Г. А., Демянцевич В. В. Технология и оборудование сварки плавлением. Учебник для студентов вузов. М., «Машиностроение», 2002. 432 с.

[2] Баранов А. Н., Константинова М. В., Гусева., Гречнева М. В. Межкристаллитная коррозия аустенитных сталей // Системы. Методы. Технологии. 2015. №2 (26). С. 142-147.

[3] ГОСТ 6032-2003 (ИСО 3651-1:1998, ИСО 3651 - 2:1998) . Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии.

[4] Каспаров О. В. Межкристаллитная коррозия нержавеющей сталей. // Технология легких сплавов. 2011. №3. С.86-91.

Орлик Геннадий Владимирович – канд. техн. наук доцент
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: G.V.Orlik@yandex.ru

Орлик Антон Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ
им. Н.Э. Баумана. E-mail: a.g.orlik@yandex.ru

Коростелкин Александр Сергеевич – студент КФ МГТУ
им. Н.Э. Баумана. E-mail: smarkquest@yandex.ru

М.С. Козлова, К.Ю. Труханов

ВЫБОР СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ ДРЕНАЖНОЙ НАПОРНОЙ ЕМКОСТИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Дренажные емкости изготавливаются в горизонтальном исполнении для подземного размещения. Стенка емкости и сферические днища образуют цельносварной корпус, рассчитанный на высокие внешние и внутренние нагрузки. Они используются на предприятиях химической, нефтехимической, газовой промышленности для сбора, временного хранения и аварийного слива жидкостей и различных газообразных сред из технологических систем [1].

В качестве основного материала для рассматриваемого изделия применяется низколегированная сталь 09Г2С. Для сварки продольных и кольцевых швов применяется автоматическая сварка под слоем флюса. Для данной группы сталей рекомендуется применять активные флюсы (коэффициент химической активности $A_{\phi}=0,3..0,6$) [2]. К таким флюсам относятся плавные флюсы марок ФЦ-11, ФЦ-15, АН-42 и др., а также керамические флюсы марок АНК-47, АНК-44 и др.

Одним из возможных вариантов флюса, применяемого для данной стали, является сварочный флюс ОК Flux 10.71 (ESAB). ОК Flux 10.71 – керамический флюс, предназначенный для одно- и многопроходной сварки стыковых соединений из углеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей, с обеспечением требуемой ударной вязкости до -40°C . ОК Flux 10.71 является флюсом алюминатно-основного типа, который обладает высокой электропроводностью, как на постоянном, так и на переменном токе. Также обладает высокими технологическими свойствами, сохраняя при этом низкое содержание O_2 в наплавленном металле. Требуемый уровень механических свойств металла шва достигается за счет правильного подбора сварочной проволоки, так как легирование шва преимущественно происходит через нее.

ОК Flux 10.71 используется в комбинации с различными проволоками того же производителя. Свойства наплавленного металла для этих комбинаций представлены в таблице 1 [3].

Выбор проволоки производится исходя из механических характеристик основного металла. Требуемый уровень прочностных и пластических свойств соединения обеспечивается применением проволоки ОК Autrod 12.22.

Толщина свариваемых деталей является основным критерием для выбора подготовки кромок. Для различных вариантов формы подготовки кромок характерно определенное соотношение основного и наплавленного металла и, как следствие, различный химический состав шва.

Таблица 1

Типовые механические свойства наплавленного металла

| Марка проволоки | Предел текучести, Н/мм ² | Предел прочности, Н/мм ² | KCV ⁻⁴⁰ , Дж* |
|-----------------|--|--|-----------------------------|
| OK Autrod 12.10 | 360 | 465 | 65 |
| OK Autrod 12.20 | 410 | 510 | 55 |
| OK Autrod 12.22 | 425 | 520 | 60 |
| OK Autrod 12.24 | 500 | 580 | 40 |
| OK Autrod 12.32 | 480 | 580 | 65 |
| OK Autrod 12.34 | 535 | 620 | 45 |

* - для проволоки OK Autrod 12.24 приведено KCV⁻²⁹

В таблице 2 приведен рассчитанный химический состав шва и показатель свариваемости $C_{\text{ЭКВ}}$ (МИС, [4]) для типовых стыковых соединений по ГОСТ 8713-79.

Таблица 2

Химический состав металла шва

| Тип соединения (ГОСТ 8713-79) | Диапазон толщин, мм | Химический состав металла шва, % | | | $C_{\text{ЭКВ}}$, % |
|----------------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------|-------|----------------------|
| | | C | Si | Mn | |
| C4 | 2-10 | 0,066 | 0,560 | 1,440 | 0,346 |
| C7 | 2-20 | 0,068 | 0,568 | 1,445 | 0,354 |
| C9 | 8-20 | 0,062 | 0,545 | 1,430 | 0,330 |
| C18 | 8-24 | 0,064 | 0,553 | 1,435 | 0,338 |
| C25 | 18-60 | 0,058 | 0,530 | 1,420 | 0,315 |

Из таблицы 2 видно, что изменение состава металла шва в зависимости от соотношения долей основного и наплавленного металла для разных форм подготовки кромок приводят к отклонению $C_{\text{ЭКВ}}$ на величину до 8-10%. Наименьшее значение $C_{\text{ЭКВ}}$ имеет X-образная разделка C25.

Таким образом, применяемые сварочные материалы и форма подготовки кромок соединения оказывает существенное влияние на химический состав шва, а, следовательно, и показатели свариваемости, что необходимо учитывать при разработке технологий сварки.

Список литературы

- [1] Рундыгин Ю.А., Гильде Е.А., Судаков А.В., Амосов Н.Т. Котельные установки. Т. IV-18. М.: Машиностроение, 2009. 400 с.
- [2] Коновалов А.В., Неровный В.М., Куркин А.С. Теория сварочных процессов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 752 с.
- [3] ESAB в России. URL: <http://www.esab.ru/ru/ru/index.cfm> (дата обращения: 05.10.2017).
- [4] EN 1011-2:2001. Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Part 2: Arc welding of ferritic steels. 2001, 51 с.

Козлова Мария Сергеевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: mariya.kozlova2013@yandex.ru

Труханов Константин Юрьевич – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: m2-kf@bmstu-kaluga.ru

С.С. Керимов, И.В. Филиппов

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМИ ПРИВОДАМИ ДЛЯ УЧЕБНОЙ УСТАНОВКИ СВАРКИ (НАПЛАВКИ)

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Установка представляет собой механизм с четырьмя степенями свободы. Газовая горелка закреплена на каретке, которая способна осуществлять поступательные движения вдоль осей x и y . Горелка – рабочий орган, она способна осуществлять поворот относительно осей x и y . Регулировка угла наклона осуществляется механически. Условная схема конструкции сварочной консоли представлена на рис. 1.

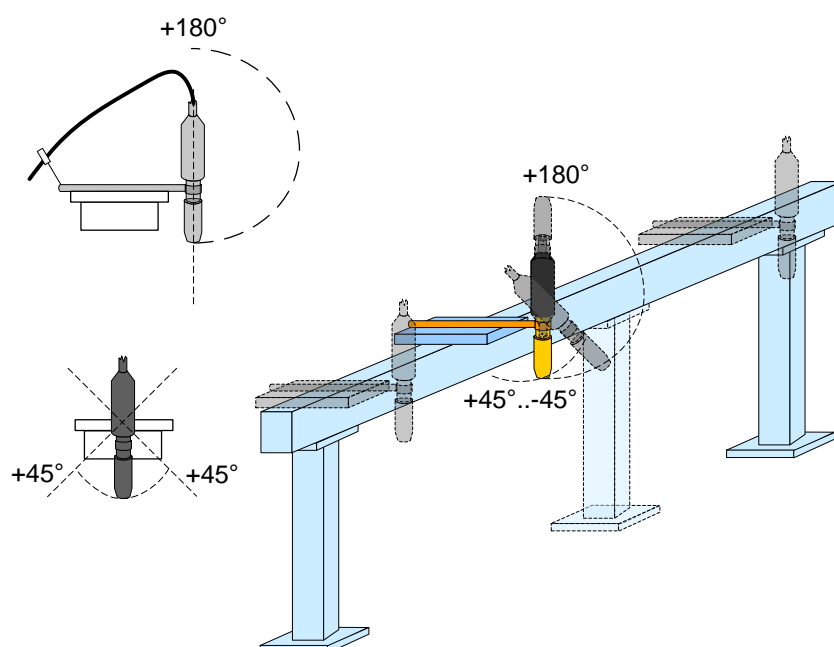


Рис. 1. Условная схема конструкции сварочной консоли

Типы приводов. Для данной установки необходимо подобрать электродвигатель, блок ключей и систему управления. В промышленных станках и манипулятора, как правило, используются сервоприводы на основе вентильных двигателей и приводы на основе шаговых двигателей. В случае использования шагового двигателя схема управления отсчитывает необходимое количество импульсов (шагов) от положения датчика [1]. При этом точное позиционирование обеспечивается параметрическими системами с отрицательной обратной связью, которые образуются взаимодействующими между собой соответствующими полюсами статора и ротора шагового двигателя. Сигнал задания для соответствующей параметрической системы формирует система управления шаговым двигателем, активизирующая соответствующий полюс статора [2].

Однако электрический сервопривод гарантирует максимальную точность, автоматически компенсируя механические (люфты в приводе) или

электронные сблокированные приводы. Он обладает большей возможной скоростью перемещения элемента (у шагового двигателя наименьшая максимальная скорость по сравнению с другими типами электродвигателей). Но у сервопривода сложнее блок управления и логика его работы (требуется обработка результатов датчика и выбор управляющего воздействия, а в основе контроллера шагового двигателя – просто счётчик).

Существующие разработки блоков управления сервоприводами на базе вентильных двигателей специализированны и к ним нет технического доступа. Существуют также универсальные системы, но зарубежного производства. Недостатком является высокая цена. Так же в областях специализации не рекомендуется использовать изделия зарубежного производства. Вентильный двигатель вместе с предложенным блоком управления позволит заменить шаговый и асинхронный привод, недостатками которого являются: низкий КПД, большие массогабаритные характеристики, отсутствие регулирования мощности (у синхронного привода постоянный момент на валу сохраняется в широком диапазоне оборотов) [3]. Недостатком шагового привода является дискретное угловое перемещение на низких оборотах и как следствие вибрации и неравномерность вращения.

Моделирование работы синхронного привода. Типичная схема сервопривода на основе вентильного двигателя состоит из электромотора, блока твердотельных ключей, представляющего из себя три полумоста, датчика ротора, датчика тока, управляющего микроконтроллера. Данная схема была собрана в пакете Simulink и представлена на рис.2.

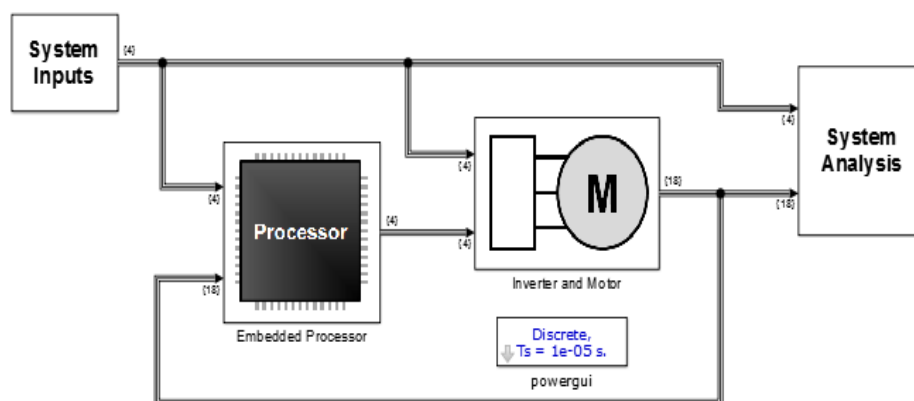


Рис. 2. Схема сервопривода на основе вентильного двигателя

В данной модели блок ключей представлен в виде идеальных транзисторов, в которых нет потерь. Датчик положения ротора и датчик тока выполняют функцию обратной связи. В качестве управляющего микроконтроллера был выбран Texas Instruments F28335, который имеет встроенный набор библиотек для управления приводами данного типа. Моделируемый привод обладает следующими характеристиками: номинальная

мощность 0,5 кВт, номинальная частота вращения 1000 об/мин, номинальный момент 4,8 Нм, номинальная частота тока - 133,33 Гц, номинальное напряжение питания - 24 В постоянного тока, номинальный фазный ток двигателя - 18,5 А, сопротивление фазы статора 0,016 Ом, число пар полюсов 8, число фаз 3, схема соединения фаз обмотки – звезда. Результаты моделирования представлены на рис.3.

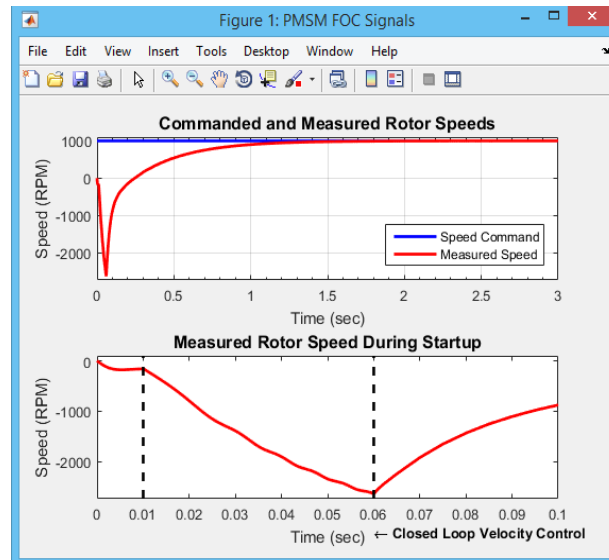


Рис. 3. Пуск мотора и выход на рабочие обороты

Пуск мотора и выход на рабочие обороты составляет порядка 1,8 секунды. Просадка оборотов в начальный момент обусловлена особенностью задания граничных условий, так как в момент пуска уже подается нагрузочный момент 4,8 Нм.

В дальнейшем планируется реализация схемотехнического решения силовой части блока управления, запуск электродвигателя и отладка программной части микроконтроллера.

Список литературы

- [1] Герман-Галкин С. Г. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
- [2] Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – 2-ое изд., перераб. и доп.– СПб: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.
- [3] Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: "Академия", 2006. – 272 с.

Керимов Святослав Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ic-kaluga@mail.ru

Филиппов Иван Владимирович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fiv61@yandex.ru

СЕКЦИЯ 3.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

В.В. Андреев, Д.М. Ахмелкин, А.А. Столяров

МОДИФИКАЦИЯ МДП-СТРУКТУР ЭЛЕКТРОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ И СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ПО ФАУЛЕРУ-НОРДГЕЙМУ ИНЖЕКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ДИЭЛЕКТРИК

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Данная работа посвящена исследованию влияния режимов инжекционно-термической обработки на модификацию МДП-структур. Изучено влияние режимов сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик МДП-структур, а также влияние температуры кристалла, при которой проводится инжекция, на плотности зарядовых дефектов и инжекционную стойкость [1-11].

В данной работе рассмотрена возможность модификации МДП-структур с пленкой SiO_2 , легированной фосфором, путём сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик и облучения кристаллов электронными пучками с различной энергией.

В качестве экспериментальных образцов использовались тестовые МДП-конденсаторы на основе термической пленки SiO_2 , а также пленки SiO_2 -ФСС, изготовленные на кремнии n-типа. Диоксид кремния толщиной $7\div 50$ нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температурах $850\div 1000$ °С. Пленку ФСС толщиной $3\div 15$ нм формировали диффузией фосфора из газовой фазы путем пиролиза смеси $\text{POCl}_3\text{-O}_2$ при температуре 900 °С. С целью получения экспериментальных образцов с различной толщиной ФСС, время загонки фосфора варьировалось в пределах от 1,5 до 6 минут. Затем для окончательного формирования пленки ФСС в течение 15 минут пластины отжигались в атмосфере азота при температуре 1000 °С. В качестве затвора использовались плёнки поликремния (Si^*), легированные фосфором, а также пленки алюминия площадью $10^{-4}\div 10^{-2}$ см².

Для инжекционной модификации МДП-структур использовалась сильнополевая туннельная инжекция электронов из кремниевой подложки [1-4] в режиме протекания постоянного инжекционного тока плотностью от $0,1$ мкА/см² до 10 мА/см². В процессе инжекции осуществлялся контроль напряжения на МДП-структуре, что позволило получить информацию об изменении зарядового состояния диэлектрической пленки непосредственно в процессе модификации. Для определения величины термостабильной компоненты накопленного в диэлектрике отрицательного заряда, после инжекционных и радиационных обработок МДП-структуры подвергались отжигу при температурах $150\div 250$ °С в течение времени от 5 до 30 мин.

Зарядовое состояние МДП-структур в процессе модификации контролировалось с использованием $C-V$ метода и метода многоуровневой токовой нагрузки [5,6]. В течение сильнополевой инжекции, в режиме протекания постоянного тока измерялось приращение напряжения на МДП-структуре ΔV_I , характеризующее изменение зарядового состояния исследуемого образца [4-6].

Для изучения влияния воздействия электронного облучения на характеристики МДП-структур использовался растровый электронный микроскоп и ускоритель. С помощью микроскопа было проведено облучение МДП-структур электронами с энергией от 15 до 20 кэВ и током пучка $I = 8$ нА с флюенсом до $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, а с использованием ускорителя структуры облучались электронами с энергией 2 МэВ, и током пучка $I=50$ мкА с флюенсом в диапазоне $\Phi=10^{12} \div 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 1 приведены зависимости приращения напряжения на МДП-структуре в процессе инжекционной (1) и радиационной (2,3) модификации от плотности инжектированного заряда и флюенса электронов. Для реализации режима сильнополевой инжекции электронов из кремниевой подложки, к затвору МДП-транзистора прикладывался импульс постоянного тока плотностью 1 мкА/см^2 . На рис. 1 плотность инжектированных электронов $N = Q_{inj} / q$, где Q_{inj} – заряд, инжектированный в диэлектрик; q – заряд электрона.

Кривые 1', 2' и 3' на рисунке 1 характеризуют термостабильную компоненту отрицательного заряда, для получения которой после инжекционной (1') и радиационной модификации (2', 3') МДП-структуры отжигались при температуре $200 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 20 мин. Как видно из рисунка 1, термостабильная компонента отрицательного заряда при инжекционной модификации (кривая 1') существенно превышает аналогичный заряд, возникающий при радиационном облучении электронами (кривые 2', 3'). Следовательно, инжекционная модификация более эффективна и при определенных условиях инжекции вызывает меньшую деградацию МДП-структур [7]. Однако облучение электронами дает возможность проводить групповую обработку кристаллов на полупроводниковой пластине, что существенно увеличивает производительность обработки.

Как видно из рис. 1, при облучении электронами в подзатворном диэлектрике SiO_2 -ФСС накапливается более низкая плотность отрицательного заряда (кривые 2 и 3, рис. 1) по сравнению с сильнополевой инжекцией (кривая 1, рис. 1). Причем при воздействии высокоэнергетичных электронов (кривая 3, рис. 1) в пленке ФСС захватывается существенно более низкое значение отрицательного заряда по сравнению с воздействием низкоэнергетичных электронов (кривая 2, рис. 1). По-видимому, при облучении электронами заметное влияние на изменение зарядового состояния МДП-структуры оказывают ионизационные процессы, протекающие в диэлектрической пленке.

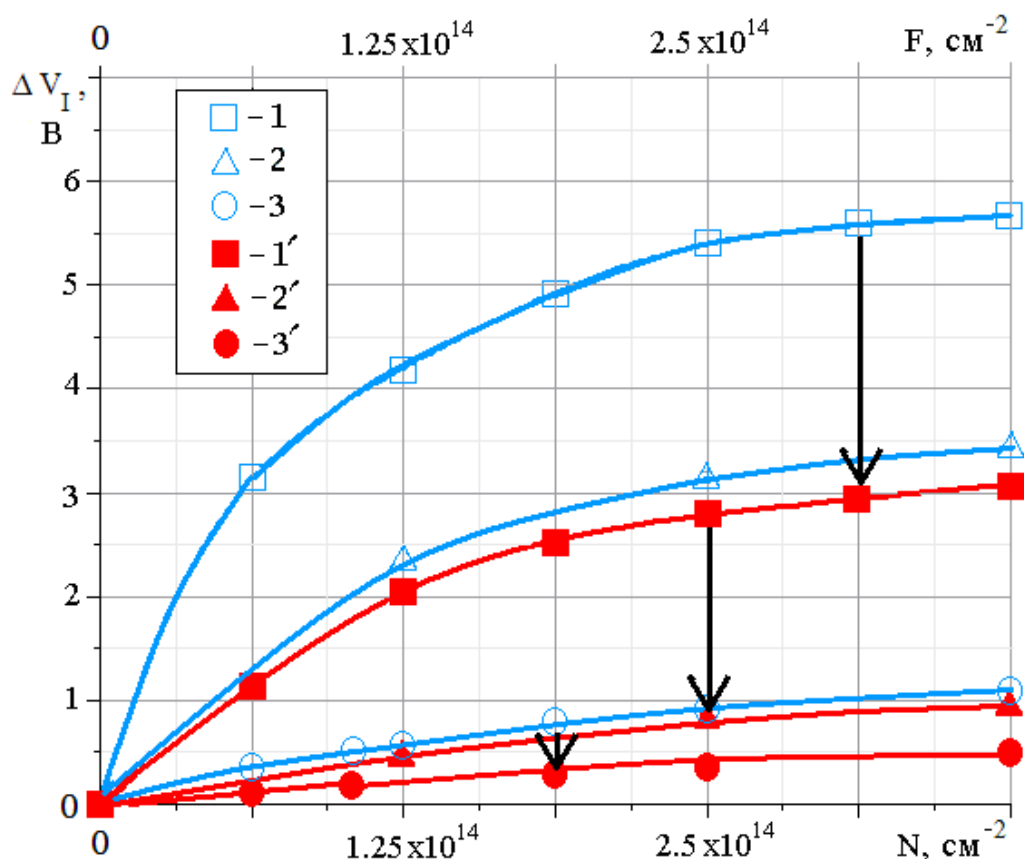


Рис. 1. Зависимости приращения напряжения на МДП-структуре в процессе сильнополевой инжекции электронов (1) и электронного облучения с энергией 18 кэВ (2) и 2 МэВ (3), а также после отжига обработанных образцов при 200 °С (1', 2', 3'), от плотности инжектированных электронов (N) (1, 1') и флюенса электронов (F) при облучении (кривые 2, 2', 3, 3')

В результате радиационной ионизации в диэлектрической пленке образуется достаточно большое количество электронно-дырочных пар, в то время как при сильнополевой инжекции в диэлектрике наблюдается в основном монополярный транспорт электронов. По-видимому, электроны с энергией 2 МэВ оказывают заметное влияние на зарядовое состояние МДП-структуры вследствие протекания процессов ионизации в кремниевой подложке и возникновения в МДП-структуре радиационных дефектов.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ (проект №8.6779.2017/БЧ), а также при финансовой поддержке администрации Калужской области (грант № 16-42-400791).

Список литературы

[1] Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Зарядовая деградация МДП-систем с термическим оксидом кремния, пассивированным фосфорно-силикатным стеклом, при высоко-полевой туннельной инжекции // Микроэлектроника. 1997. № 6. С.640-646.

[2] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Andreev D.V. Modification and Reduction of Defects in Thin Gate Dielectric of MIS Devices by Injection-Thermal and Irradiation Treatments // Phys. Status Solidi C. 2015. Vol.12. No. 1–2. P. 126–130.

[3] Lombardo S., Stathis J.H., Linder P., Pey K.L., Palumbo F., Tung C.H. Dielectric breakdown mechanisms in gate oxides // J. Appl. Phys. 2005. Vol.98. P.121301.

[4] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Modification of Gate Dielectric in MOS Devices by Injection-Thermal and Plasma Treatments // Acta Phys. Pol. A. 2014. Vol. 125. No. 6. P. 1371–1373.

[5] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Multilevel current stress technique for investigation thin oxide layers of MOS structures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2012. Vol. 41. P. 012017.

[6] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Andreev D.V. Control current stress technique for the investigation of gate dielectrics of MIS devices // Phys. Status Solidi C. 2015. Vol. 12. No. 3. P. 299–303.

[7] Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. Модификация МДП-структур электронным облучением и сильнополевой инжекцией электронов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 4. С. 94–99.

[8] United States Military Standard MIL-STD-883H. Method 1019.8.

Андреев Владимир Викторович – д-р техн. наук, профессор
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

Ахмелкин Дмитрий Михайлович – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dmitriy.akhmelkin@gmail.com

Столяров Александр Алексеевич – д-р техн. наук, профессор
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alalstol@mail.ru

А.Н. Шмаков, В.В. Андреев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ПРОВОДИМОСТИ ВЫСОКООМНОГО И НИЗКООМНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КРЕМНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В производстве изделий микроэлектроники используют полупроводниковые пластины двух типов. Такие пластины обозначаются следующим образом:

- КЭФ – кремний электронный легированный фосфором, или n-типа проводимости;
- КДБ – кремний дырочный легированный бором, или p-типа проводимости.

Удельное сопротивление полупроводниковых кремниевых пластин приведено в таблице 1.

Таблица 1

Удельное сопротивление используемых пластин

| | n-тип (ρ_v) | p-тип (ρ_v) |
|---------------------|---------------------------------|--|
| Низкоомный кремний | 4.5 Ом*см (КЭФ 4.5) | 10 Ом*см (КДБ 10) |
| Высокоомный кремний | 2000-6000 Ом*см (КЭФ 2000/6000) | 7000-13000 Ом*см (КДБ 7000/13000) 8000-12000 Ом*см (КДБ 8000-12000) |

Для реализации p-n перехода и других технологических операций возникает необходимость экспериментального определения типа полупроводника, это может решаться параллельно с определением удельных сопротивлений.

Данная статья посвящена исследованию оптимального способа определения типа проводимости высокоомного и низкоомного полупроводникового кремния методом термо-ЭДС (Thermoelectric Voltage Method) [1-6].

В качестве материала контактирующих зондов выбраны графитовые электроды. Для проведения анализа были взяты пластины с известным типом проводимости: КЭФ 4.5, КДБ 10, КЭФ 2000-6000, КДБ 7000-13000, а также исследуемые пластины (по паспорту КДБ 8000-12000). Схема подключения представлена на рис. 1.

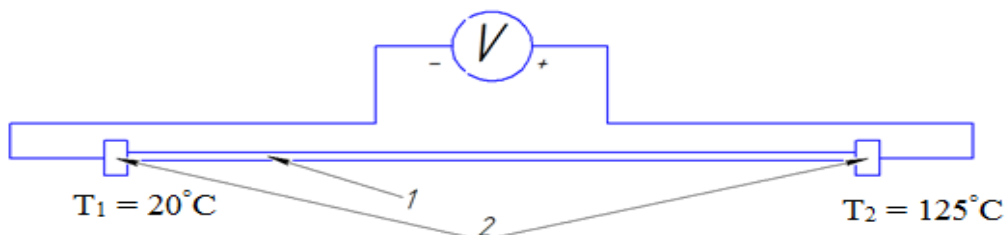


Рис. 1. Схема подключения

1 – Кремниевая пластина, 2 – Графитовые электроды

Один вывод вольтметра присоединен к горячему электроду (+125°C), а второй к холодному электроду (+20°C). Электроды контактируются на противоположные стороны пластины. При этом на вольтметре получены следующие результаты, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Результаты определения

| Пластина | Показания вольтметра (mV) | Полярность |
|----------------------|---------------------------|---------------|
| КЭФ 4.5(111) | -1.5 | Отрицательная |
| КДБ 10(111) | 2.1 | Положительная |
| КЭФ 2000-6000(111) | -2.3 | Отрицательная |
| КДБ 7000-13000(111) | 2.5 | Положительная |
| Исследуемые пластины | -2.2 | Отрицательная |

На пластинах КДБ (р-тип) получена «положительная» полярность. На пластинах КЭФ (n-тип) получена «отрицательная» полярность. На исследуемых пластинах наблюдается «отрицательная» полярность, что свидетельствует о том, что они являются пластинами с n-типом проводимости.

Для подтверждения результатов, полученных в ходе определения проводимости пластин при помощи термо-ЭДС, две исследуемые пластины были запущены по маршруту изготовления кристаллов фотодиода ФД346-01 (n-тип) для создания на них р-n перехода. В отдельные области пластин был внедрен бор и получены р-n, что подтверждает тип проводимости полупроводниковых пластин, определенный описанным методом.

При нагреве одного края пластины n-типа проводимости, концентрация электронов увеличивается, измерительный прибор (вольтметр) покажет отрицательное значение в mV а на пластинах р-типа наблюдается избыток дырок, измерительный прибор выдаст положительное значение. Такой результат объясняется эффектом Зеебека. Сущность явления Зеебека состоит в том, что в полупроводниках, возникает ЭДС, если между концами этого материала существует разность температур. Один конец нагрет до температуры T_1 , а другой - до T_2 , пусть $T_2 > T_1$, то при этом обнаруживается электродвижущая сила, называемая термо-ЭДС [5]

$$E = a(T_2 - T_1)$$

$$E = \int_{T_1}^{T_2} a(T) dT$$

где a - коэффициент термо-ЭДС, который определяется материалом полупроводника.

Свободные носители заряда у горячего конца имеют более высокие энергии и скорости, чем у холодного. У горячего конца полупроводника свободных носителей больше, чем у холодного. Поэтому поток свободных носителей от горячего конца к холодному больше, чем от холодного к горячему. Если концентрация свободных электронов и дырок в полупровод-

нике или их подвижности не одинаковы, то концы полупроводников противоположно заряжены [5].

В электронном полупроводнике основными носителями заряда являются электроны, поток их от горячего конца к холодному больше, чем от холодного к горячему. В результате этого на холодном конце накапливается отрицательный заряд, на горячем остается нескомпенсированный положительный. Возникшее электрическое поле вызывает поток электронов от холодного конца к горячему.

Стационарное состояние устанавливается при равенстве этих потоков электронов. У дырочного полупроводника на холодном конце возникает положительный заряд. Таким образом, по знаку термо-ЭДС можно судить о типе электропроводности полупроводника [2,7].

При выборе электрода, требовался материал, при котором результаты определения типа полупроводника были бы безошибочны. При контакте металла с полупроводниковым материалом возникает эффект Шотки. При образовании контакта электроны переходят из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода, в результате чего уровень Ферми металла и полупроводника выравниваются, при этом проводник оказывается заряженным, а возникающая область пространственного заряда препятствует переходу электронов в металл. Из-за резкого различия концентрации свободных электронов по обе стороны от контакта практически все падение напряжения приходится на приконтактную область полупроводника. Приложенное внешнее напряжение изменяет высоту барьера лишь со стороны полупроводника. Электронные зоны проводимости отталкиваются возникшим контактным полем. Создается обедненный слой с пониженной концентрацией подвижных носителей. Около контакта вследствие изгиба границ зон полупроводник n-типа переходит в полупроводник p-типа, поэтому для конструирования блоков для определения типа проводимости с использованием контактирующих металлов необходимы усилители для подачи пробивного напряжения на диод Шотки.

Эффект Шотки, идентичен работе диода, он позволяет проходить току в одном направлении и перекрывает проход тока в другом направлении. При измерении низкоомного полупроводника: КЭФ-4.5, или КДБ-10 вопрос материала не встает, а при измерении слаболегированного высокоомного КДБ-5000, или КДБ-8000 остро встает вопрос материала контактирующего электрода. На низкоомном кремнии практически подходит любой материал: латунные, медные, вольфрамовые и стальные электроды, а на высокоомном либо результат определения неверный, либо значение вольтметра получается переменное из-за возникновения диода Шотки в данных материалах. Поэтому, исходя из исследования, для определения типа проводимости на высокоомном кремнии были выбраны графитовые контакты. У таких контактов полностью отсутствуют диоды Шотки даже на слаболегированном кремнии.

Список литературы

[1] Андреев В.В, Столяров А.А. Физические основы наноинженерии. М. Изд. МГТУ им. Баумана 2011 г. – 218 с

[2] Столяров А.А. Физические основы микроэлектроники. М.: Изд. МГТУ им. Баумана, 2006 г. -170 с.

[3] Киес Р. Дж. Стафеева В.И. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов. Москва. Радио и связь. 1985 г. -323 с.

[4] Левин М. Н., Татаринцев А.В., Макаренко В.А., Гитлин В.Р. Моделирование процессов рентгеновской корректировки пороговых напряжений МДП-интегральных схем// Микроэлектроника. 2006. Т.35. №5.

[5] Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. СПб: «Лань» 2001 г. – 429 с.

[6] Рейви К., Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. Москва. Изд. Мир 1984 г. - 470 с.

[7] Челноков В. Е. Физические основы работы силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973 г. -278 с

Шмаков Андрей Николаевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ArhangelSD@yandex.ru.

Андреев Владимир Викторович – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru.

А.В. Мазин, Аунг Пьей Зон

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХОЛОДНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ТЕЛЛУРИД ВИСМУТА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Повышение энергетических показателей термоэлектрических устройств прежде всего связано с отысканием новых материалов, обладающих высокой термоэлектрической эффективностью, и разработкой методов их синтеза. На эффективность термоэлектрических устройств существенное влияние оказывают не только параметры полупроводникового вещества, но также условия теплообмена в батарее и другие факторы. Недостаточный учёт их в расчётной модели может привести к таким изменениям энергетических характеристик охладителей и нагревателей, которые существенно уменьшат потенциальные возможности любого высококачественного полупроводникового материала. Поэтому важным фактором необходимым для развития полупроводниковой энергетики, является построение методики расчёта термоэлектрических охлаждающих и нагревательных устройств с максимально достижимой для имеющегося материала энергетической эффективностью.

Термоэлектрические материалы на основе теллурида висмута с точки зрения их технологии занимают промежуточное положение между высокоомными полупроводниками, применяемыми в радиоэлектронике (германий, кремний), и металлическими сплавами.

Относительно высокая концентрация носителей заряда в этих материалах позволяет снизить требования к их чистоте и совершенству структуры по сравнению с высокоомными полупроводниками, а большое количество термоэлементов, используемых в мощных термоэлектрических устройствах, вызывает необходимость применять методы массового производства.

Классические термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 и его сплавов с Bi_2Se_3 и Sb_2Te_3 , $PbTe$ и его сплавов с $PbSe$ и $SnTe$. Bi_2Te_3 и $PbTe$ содержат тяжелые элементы таблицы Менделеева, которые приводят к не большой фоновой групповой скорости и низкой теплопроводностью.

Термоэлектрическая эффективность при комнатой температуре некоторых полупроводниковых соединений представлены в табл. 1. Видно, что теллурид висмута как n-типа, так p-типа существенно превосходит по эффективности другие соединения [1].

Таблица 1

Термоэлектрическая эффективность $Z = (10^{-3} K^{-1})$ некоторых полупроводниковых соединений при температуре 300 K по данным

| Материал p-типа | $ZnSb$ | $PbTe$ | $PbSe$ | Sb_2Te_3 | Bi_2Te_3 |
|-----------------|----------|--------|----------|------------|------------|
| Z | 1,0 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,8 |
| Материал n-типа | Ag_2Te | $PbTe$ | Ag_2Se | Bi_2Te_3 | - |
| Z | 1,2 | 1,5 | 2,3 | 2,6 | - |

Основные расчётные соотношения для охлаждающего термоэлемента. Теплота, переходящая от горячего спая к холодному [2]

$$Q_m = \lambda(T_G - T_X). \quad (1)$$

где λ - средний удельный коэффициент теплопроводности ветвей термоэлемента.

Холодопроизводительность термоэлемента с учетом потерь определится из выражения

$$Q_0 = \alpha T_X I - 0,5 I^2 R - \lambda(T_G - T_X). \quad (2)$$

Теплота, отводимая от горячего спая

$$Q = \alpha T_G I - 0,5 I^2 R - \lambda(T_G - T_X). \quad (3)$$

Холодильный коэффициент реального цикла термоэлектрической холодильной машины

$$\varepsilon_D = \frac{\alpha T_X I - 0,5 I^2 R - \lambda(T_G - T_X)}{I^2 R + \alpha I(T_G - T_X)}. \quad (4)$$

Максимальное значение холодильный коэффициент приобретает при токе

$$I = \frac{\alpha(T_G - T_X)}{R \left[\sqrt{1 + 0,5Z(T_G - T_X)} - 1 \right]}. \quad (5)$$

Материалы для термоэлектрических преобразователей характеризуются добротностью Z .

$$Z = \alpha \sigma^2 / k. \quad (6)$$

где σ - электропроводность, α - коэффициент термоэдс, k - теплопроводность.

Введем вспомогательный коэффициент M

$$M = \sqrt{1 + 0,5Z(T_G - T_X)} - 1. \quad (7)$$

Тогда, подставляя (11) в (10), получаем

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_X}{T_G - T_X} \frac{M - T_G/T_X}{M + 1}. \quad (8)$$

Расчёт системы $Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3$ в режиме максимального холодного коэффициента.

Требуемыми параметрам являются:

- холодильный коэффициент;
- мощность, которую будет потреблять термобатарея из сети;
- теплота, выделяемая на горячих спаев.

Исходные данные для расчёта

Термоэлектрическая эффективность $Z = 2,6 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ [1], условия эксплуатации $T_x = 280K$, $T_r = 310K$, требуемая холодопроизводительность $Q_0 = 20Вт$. В табл. 2 представлены результаты и расчётные формулы.

Таблица 2

Результаты и расчётные формулы

| Определяемая величина | Расчётная формула | Результат расчёта |
|---|--|-------------------|
| Вспомогательный коэффициент | $M = \sqrt{1 + 0,5Z(T_r - T_x)} - 1$ | 1.32 |
| Холодильный коэффициент в режиме максимального холодного коэффициента | $\varepsilon_{\max} = \frac{T_x}{T_r - T_x} \frac{M - T_r/T_x}{M + 1}$ | 0.89 |
| Мощность P , Вт | $P = Q_0 / \varepsilon_{\max}$ | 22 |
| Теплота горячих спаев Q_r , Вт | $Q_r = P + Q_0$ | 42 |

Анализ полученных результатов показал, что холодильный коэффициент зависит от разности температуры ($T_r - T_x$), создаваемой термоэлектрической батареей, и величины Z , характеризующей свойства используемых полупроводниковых веществ. При небольших разностях температур холодильный коэффициент имеет большую величину и при $(T_r - T_x) \rightarrow 0$ стремится к бесконечности, и наоборот, при значительных разностях температуры холодильный коэффициент стремится к нулю.

Получено, что в материале состава $Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3$, при $T_x = 280K$ и $T_r = 310K$, холодильный коэффициент $\varepsilon_{\max} = 0.89$, мощность $P = 22 Вт$ и теплота горячих спаев $Q_r = 42 Вт$.

Список Литературы

[1] Л.П. Булат. Термоэлектрическое охлаждение: Текст лекций. - СПб.: СПбГУНиПТ, 2002.- 147с.

[2] Л.П. Булат., Е.В. Бузин. Термоэлектрические охлаждающие устройства: Метод указания для студентов спец. 070200 "Техника и физика низких температур". - СПб.: СПбГУНиПТ, 2001.- 41с.

Мазин Анатолий Викторович – д-р техн. наук, зав. кафедрой "Информационная безопасность автоматизированных систем" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mazinav@yandex.ru

Аунг Пьей Зон – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aungpyesone49@gmail.com

В.В. Кузнецов, В.В. Андреев, И.В. Максимов

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМПУЛЬСА ЛИНИИ ПЕРЕДАЧ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИМС ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В настоящее время серьезной проблемой, в микроэлектронике, является повреждение микросхем в результате электростатического пробоя. Развивающиеся быстрыми темпами процессы микроминиатюризации ведут к уменьшению размеров элементов интегральных схем, что приводит к понижению степени стойкости воздействию статического электричества [1]. Наиболее уязвимым местом современных микросхем, к такого рода воздействию, являются входные цепи и цепи управления, где для входных транзисторов применяется тонкий подзатворный диэлектрик [2]. Чтобы уменьшить влияние электростатического разряда на работоспособность микросхем применяют цепи защиты. Существует два основных принципа построения защитных цепей КМОП ИМС: на диодно-резистивных элементах (распределенные диоды) и на МОП-транзисторах с затворами подключенными к цепям питания или земли (МОП-транзисторы с заземленным затвором) [3].

В данной работе проводятся испытания уровня защиты интегральных КМОП-микросхем с диодно-резистивной защитой и защитой с применением МОП-транзисторов с заземленным затвором методом импульса линии передач (Transmission line pulsing, TLP) [4].

Данный метод получил свое широкое распространение при проведении исследований воздействия статического электричества на интегральные схемы благодаря низкой стоимости, простоте реализации, хорошим электрофизическим характеристикам, а также из-за хорошей корреляции между импульсами, генерируемыми TLP, и теми, которые связаны с моделью человеческого тела (НВМ). Схема TLP стенда испытаний на воздействие статического электричества представлена на рис. 1.

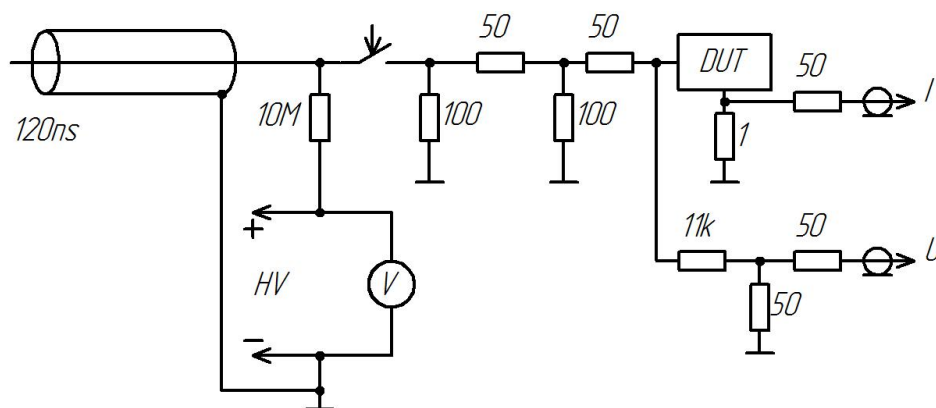


Рис. 1. Схема TLP стенда испытаний на воздействие статического электричества

Установка тестирования TLP включает в себя 50-омный коаксиальный кабель, заряжаемый генератором постоянного тока (HV), затем формируется сигнал TLP, разряжая коаксиальный кабель в схему нагрузки. Для минимизации отражения осциллограммы применяется схема согласования сопротивления нагрузки, включающая в себя резисторы нагрузки и тестируемое устройство (DUT). Ширина импульса TLP зависит от длины кабеля линии передачи, а время нарастания импульса от собственной емкости и индуктивности применяемых элементов. Для уменьшения времени нарастания, при построении стенда, применялись миниатюрные поверхностно монтируемые компоненты.

Для проведения испытаний выбраны микросхемы 1564ЛИ1, с диодно-резистивной защитой, и 1564ЛП11, с защитой на МОП-транзисторах с заземленным затвором.

Результаты испытаний, TLP методом, стойкости к воздействию статического электричества микросхем 1564ЛИ1 представлены в таблице 1.

Таблица 1

| Результаты испытаний микросхем 1564ЛИ1 | | | | |
|--|--------------------------|---------------------|---------------------|--|
| τ , нс | $U_{\text{разряда}}$, В | $U_{\text{вх}}$, В | $I_{\text{вх}}$, А | Результат |
| 120 | 150 | 30 | 0,12 | Нет пробоя |
| | 250 | 44 | 0,30 | Нет пробоя |
| | 350 | 80 | 0,40 | Диод переходит в режим второго пробоя, начинается тепловой пробой. |
| | 450 | 98 | 0,50 | Деградация диффузионных областей. Возникновение пробоя. |

Осциллограмма возникновения пробоя полученная в ходе проведения испытаний микросхем 1564ЛИ1 представлена на рис. 2.

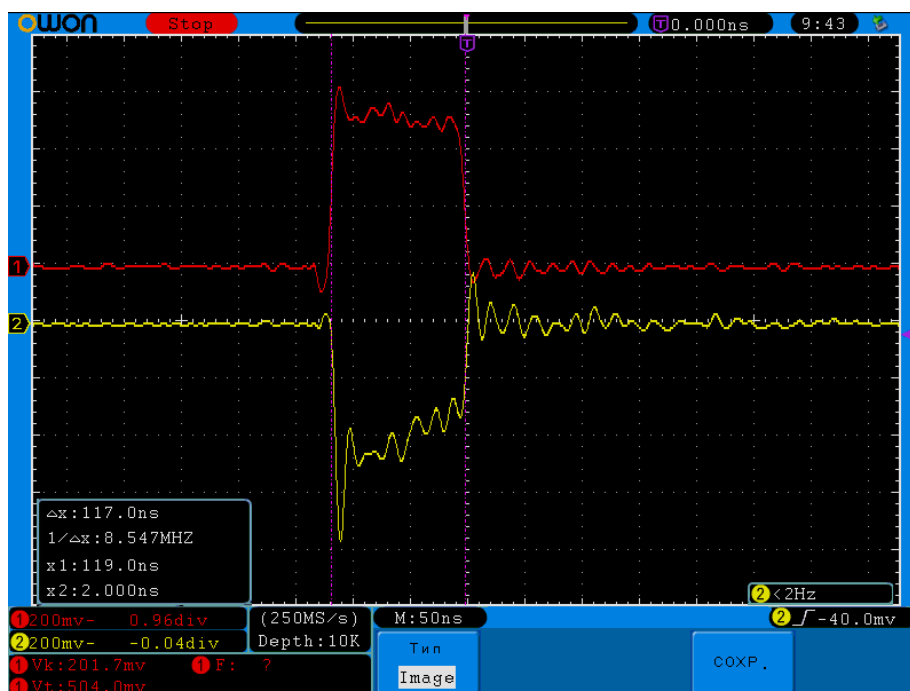


Рис. 2. Осциллограмма пробоя диодно-резистивной защиты полученная TLP методом для микросхем 1564ЛИ1: ток (желтый), напряжение (красный)

Результаты испытаний микросхем 1564ЛП11 представлены в таблице 2.

Таблица 2

| τ , нс | $U_{\text{разряда}}$, В | $U_{\text{вх}}$, В | $I_{\text{вх}}$, А | Результат |
|-------------|--------------------------|---------------------|---------------------|------------|
| 120 | 150 | 10 | 0,35 | Нет пробоя |
| | 250 | 14 | 0,70 | Нет пробоя |
| | 450 | 20 | 1,50 | Нет пробоя |
| | 700 | 25 | 2,20 | Нет пробоя |

Пробой не был достигнут. Поэтому, для увеличения энергии электростатического импульса поступающего на тестируемый вывод микросхемы, исключаем звено резистивного делителя напряжения из разрядной цепи установки. Измененная схема TLP станда для поведения испытаний на воздействие статического электричества представлена на рис. 3.

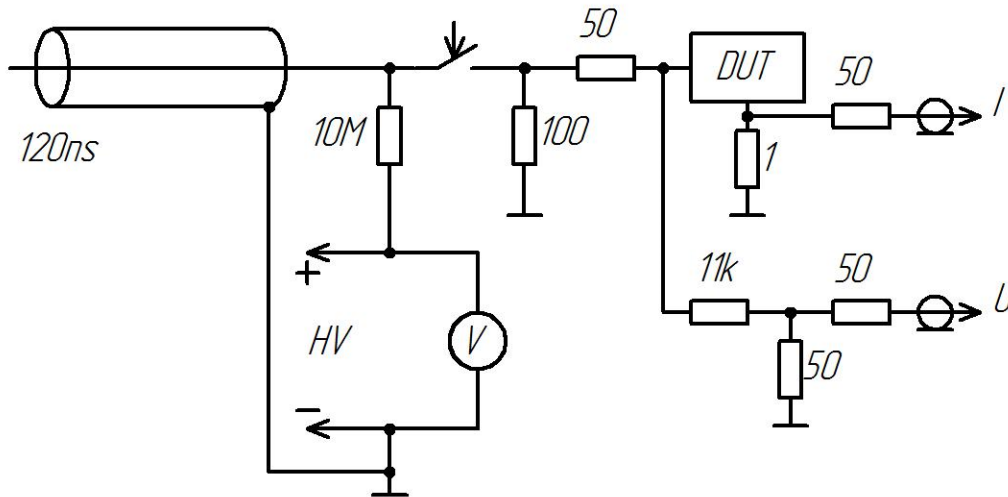


Рис. 1. Схема TLP станда испытаний на воздействие статического электричества без резистивного делителя напряжения

Результаты испытаний после внесения изменений в схему станда представлены в таблице 3.

Таблица 1

| τ , нс | $U_{\text{разряда}}$, В | $U_{\text{вх}}$, В | $I_{\text{вх}}$, А | Результат |
|-------------|--------------------------|---------------------|---------------------|------------|
| 120 | 600 | 25 | 4,00 | Нет пробоя |
| | 700 | 32 | 5,10 | Нет пробоя |
| | 870 | 40 | 6,00 | Нет пробоя |

В результате проведения испытаний микросхем 1564ЛП11 был достигнут предел возможностей испытательного оборудования, пробой зафиксирован не был.

Проанализировав полученные экспериментальные данные нетрудно заметить, что микросхемы с защитой на МОП-транзисторах имеют высокую стойкость к воздействию разряда статического электричества. Также можно сделать вывод о том, что защита на основе МОП-транзисторов обладает большей эффективностью, т.к. даже при малой мощности ЭСР напряжение поступающее к внутренним цепям микросхемы ($U_{вх}$), после срабатывания защиты, у диодно-резистивной защиты выше, чем у транзисторной, это объясняется большой величиной динамического сопротивления диода, оно препятствует быстрому стеканию статического разряда.

Список литературы

[1] Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. – М.: Издательский Дом "Технологии", 2005. – Г.2, п.2.2 – 79 с.

[2] Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник – М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2004. – Г.2, п.2.2 – 42 с.

[3] Максимов И.В., Андреев В.В., Столяров А.А. Защита микросхем изготовленных по КМОП-технологии от воздействия статического электричества. Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы всероссийской научно-технической конференции, 15 - 17 ноября 2016 года. Т.1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2016. С. 142-146.

[4] Lee J.C., Young R., Liou J.J., Croft G.D., and Bernier J.C. An Improved Transmission Line Pulsing (TLP) Setup for Electrostatic Discharge (ESD) Testing in Semiconductor Devices and ICs. Conference on Microelectronic Test Structures. 2001.Vol. 14.P. 233-238.

Кузнецов Вадим Вадимович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ra3xdh@gmail.com

Андреев Владимир Викторович – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vladimir_andreev@bmstu.ru

Максимов Игорь Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: igormaksimow@yandex.ru

В.В. Парамонов, В.А. Караханян

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КРИСТАЛЛОВ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ С ЛОКАЛЬНОЙ ОБЛАСТЬЮ СВЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРЫ ALINGaP/GAAs И СРАВНЕНИЕ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ С КРИСТАЛЛОМ НА ОСНОВЕ ALGAAs/GAAs

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

На основе импортного аналога, анализа его параметров, для изготовления аналогичного кристалла с локальной областью излучения разработана конструкция кристалла светодиода на основе наноструктур AlInGaP/GaAs. Эпитаксиальная структура алингапа, выращивается методом осаждения металлоорганических соединений из газообразной фазы на подложках арсенида галлия и используется для изготовления кристаллов светоизлучающих диодов (СИД) красного цвета свечения [1]. Конструкция кристалла этого светодиода изображена на рисунке 1.

Ранее были изготовлены кристаллы светоизлучающего диода красного цвета свечения с локальной областью излучения на основе эпитаксиальной наноструктуры в системе AlGaAs/GaAs ЭСАГА – 131. Основным недостатком этих кристаллов являлась низкая сила света (2-3 мКд), повысить которую в рамках структуры ЭСАГА-131 не представляется возможным [2].

Поэтому целесообразно перейти к более ярким светоизлучающим диодам на основе четверных соединений, а именно к наноструктурам AlInGaP/GaAs.

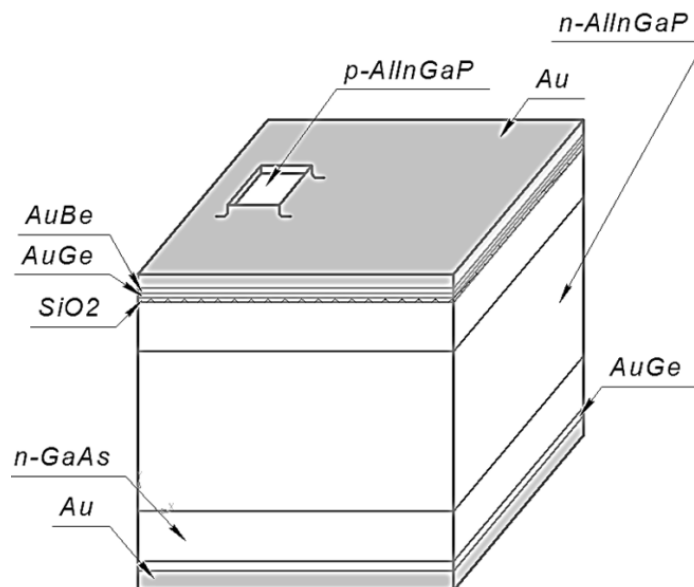


Рис. 1. Кристалл светоизлучающего диода с локальной областью излучения на основе AlInGaP/GaAs

В состав наноструктуры входят:

- активная область, содержащая брэгговский рефlector, для уменьшения поглощения излучения в подложке;
- зеркальный слой, представляющий собой диэлектрик SiO_2 , который обеспечивает сквозную проводимость между подложкой GaAs n-типа и слоем AlInGaP p-типа;

Слой диэлектрика препятствует протеканию тока через весь p - n переход. Что позволяет создать узконаправленный пучок света через окно [3].

Результаты измерений. Измерение вольтамперных характеристик светодиода показывает графическую зависимость прямого тока от прикладываемого напряжения на светодиоде.

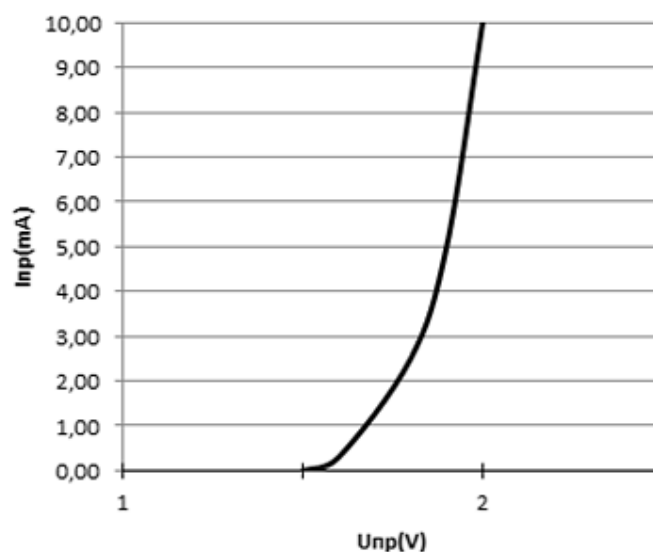


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика кристалла AlInGaP/GaAs после термообработки

На рисунке 2 видно, что после термообработки характер зависимости тока от напряжения становится линейным.

Сила света кристалла AlInGaP/GaAs составляет 18-20 мКд при прямом токе 20 мА.

Для сравнения параметров кристалла на основе наноструктуры AlInGaP/GaAs и образца кристалла на структуре ЭСАГА-131 в таблице 1 приведены отличительные характеристики.

Таблица 1

Параметры кристаллов светоизлучающих диодов с локальной областью свечения

| Вид эпитаксиальной структуры | Сила света, мКд, при прямом токе 20 мА | Размер кристалла, мкм ² | Высота мезоструктуры, мкм | Длина волны, нм |
|------------------------------------|--|------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| ЭСАГА-131: n - AlGaAs/ p - GaAs | 2-3 | 360×360 | 20-25 | 650 |
| p - AlInGaP/ n - GaAs | 18-20 | 360×360 | 10-12 | 632 |

Вывод. Из таблицы видно, что кристалл, полученный на четверном соединении AlInGaP/GaAs, превосходит по силе света кристалл на основе структуры ЭСАГА-131.

Список литературы

[1] Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. - Москва.: Энергоатомиздат, 1983. - 208 с.

[2] Шуберт Ф.П., Светодиоды. 2-е изд. - Москва.:Физмалит, 2008, - 233 с.

[3] Коган Л.М., Водовозова М.Л., Деготь Ю.М. и др. Диодные источники инфракрасного излучения из арсенида галлия /В кн.: Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. - Москва.: Сов.радио, 1977, вып. 2, - 154 с.

Парамонов Виктор Васильевич – канд. хим. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: victorparamonov@yandex.ru

Караханян Виолетта Андреевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vetka2930@gmail.com

В.В. Шагаев, Тун Тун Лин

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА В ГАЛЛИЙ-ЗАМЕЩЁННЫХ ПЛЁНКАХ ЖЕЛЕЗОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА ОТНОСИТЕЛЬНО ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В работе [1] описан метод двойной стабилизации частоты ферромагнитного резонанса (ФМР) в ферритовых пленках. В настоящей работе изложены результаты моделирования, полученные с помощью метода в пленках состава $Y_3Fe_{5-t}Ga_tO_{12}$.

Модель пленки представлена на рис. 1. Частота ФМР (f_0) пленочного образца задана формулой:

$$(f_0/g)^2 = (H_{ez} + H_c n_x + 4\pi M_0 \cos 2\theta)(H_{ez} + H_c n_y - 4\pi M_0 \sin^2 \theta) \quad (1)$$

где g – гиромагнитное отношение; $H_{ez} = H_e \cos(\theta_H - \theta)$ – проекция вектора напряженности внешнего намагничивающего поля H_e на вектор намагниченности феррита M_0 ; $4\pi M_0$ и H_c – намагниченность насыщения и поле кристаллографической магнитной анизотропии феррита соответственно; θ и θ_H – углы наклона векторов M_0 и H_e к пленке; n_x и n_y учитывают влияние на частоту магнитной анизотропии феррита и зависят от кристаллографической ориентации пленки, задаваемой углом δ :

$$n_x = \frac{1}{2} [\cos 2(\theta - \delta) + 3 \cos 4(\theta - \delta)] \quad (2)$$

$$n_y = \frac{1}{8} [-3 + 16 \cos 2(\theta - \delta) + 3 \cos 4(\theta - \delta)] \quad (3)$$

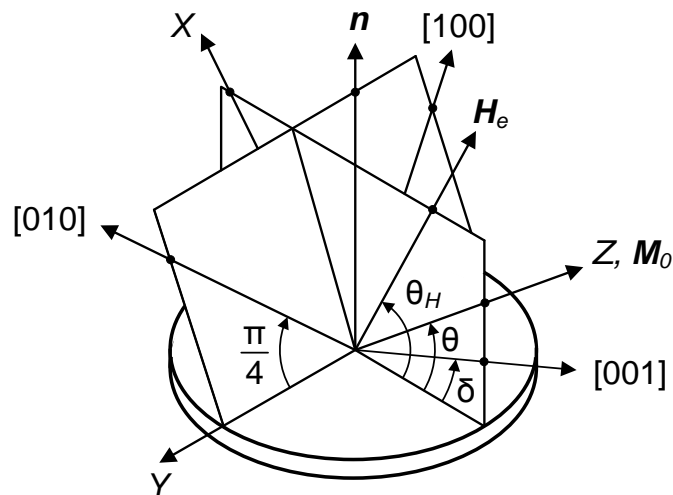


Рис. 1. Модель плёнки с плоскостью симметрии типа $\{110\}$, расположенной перпендикулярно к плёнке и намагниченной в этой плоскости

Химический состав и температура образца определяют значения магнитных параметров $4\pi M_0$ и H_c . Изменения температуры и состава приводят к сдвигу частоты ФМР. Этот сдвиг можно рассчитать исходя из формулы (1), причем в расчете нужно учесть не только изменения значений $4\pi M_0$ и H_c , но и зависящих от них значений H_{ez} и θ . Способ такого учета изложен в статье [1] и в материалах конференции [2]. В результате сдвиг частоты можно представить в виде:

$$\delta\left(\frac{f_0}{g}\right)^2 = 4\pi M_0 [A \cdot \delta(4\pi M_0) + B \cdot \delta H_c] \quad (4)$$

где коэффициенты A и B определены выражениями, приведенными в работах [1,2]. Суть метода стабилизации, рассмотренного в работе [1], заключается в выборе таких значений углов θ и δ , которые будут обнулять значения коэффициентов A и B .

В настоящей работе природа изменений намагниченности и поля анизотропии обусловлена изменениями температуры и химического состава, так что имеется связь:

$$\delta(4\pi M_0) = \frac{d(4\pi M_0)}{dT} \delta T + \frac{d(4\pi M_0)}{dt} \delta t \quad (5)$$

$$\delta H_c = \frac{dH_c}{dT} \delta T + \frac{dH_c}{dt} \delta t \quad (6)$$

где δT – изменение температуры; δt – изменение концентрации галлия (в расчете на формульную единицу) в пленке состава $Y_3Fe_{5-t}Ga_tO_{12}$. Значения производных в формулах (5) и (6) могут быть рассчитаны из экспериментальных зависимостей магнитных параметров от температуры и от концентрации замещающей примеси.

При подстановке формул (5) и (6) в (4) сдвиг частоты будет представлен линейным приближением относительно параметров δT и δt . При выполнении условий $A=0$ и $B=0$ линейное приближение даст нулевое смещение частоты, так что δf_0 будет определено квадратичной формой:

$$\begin{aligned} \frac{\delta f_0}{f_0} = \frac{1}{4(f_0/g)^2} & \left\{ \frac{d^2(f_0/g)^2}{d(4\pi M_0)^2} [\delta(4\pi M_0)]^2 + \right. \\ & \left. + 2 \frac{d^2(f_0/g)^2}{dH_c d(4\pi M_0)} \delta(4\pi M_0) \delta H_c + \frac{d^2(f_0/g)^2}{dH_c^2} (\delta H_c)^2 \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

где вместо $\delta(4\pi M_0)$ и δH_c нужно подставить их выражения согласно формулам (5), (6). Способ расчета вторых производных детально изложен в работе [1].

В качестве примера был выполнен расчет смещения частоты ФМР с исходным значением $f_0 = 4\pi M_0 g$ для пленки состава $Y_3Fe_{5-t}Ga_tO_{12}$ при

изменениях параметров t и T вблизи значений $t = 0,29$ и $T = 295$ К. Значения магнитных параметров феррита были взяты из работ [3,4]. В этих работах приведены зависимости первой константы кубической магнитной анизотропии (K_{c1}) и намагниченности насыщения ($4\pi M_0$) от температуры и состава. Поле анизотропии H_c связано с константой K_{c1} соотношением:

$$H_c = \frac{K_{c1}}{M_0} \quad (8)$$

Согласно формуле (8) вариацию δH_c можно представить в виде:

$$\delta H_c = \left[\frac{4\pi}{(4\pi M_0)} \frac{dK_{c1}}{dT} - \frac{4\pi K_{c1}}{(4\pi M_0)^2} \frac{d(4\pi M_0)}{dT} \right] \delta T + \left[\frac{4\pi}{(4\pi M_0)} \frac{dK_{c1}}{dt} - \frac{4\pi K_{c1}}{(4\pi M_0)^2} \frac{d(4\pi M_0)}{dt} \right] \delta t \quad (9)$$

Вариация намагниченности задана соотношением:

$$\delta(4\pi M_0) = \frac{d(4\pi M_0)}{dT} \delta T + \frac{d(4\pi M_0)}{dt} \delta t \quad (10)$$

Производные могут быть представлены в виде конечно-разностных отношений. Таким образом, для того чтобы выполнить все необходимые расчеты, достаточно иметь экспериментальные зависимости параметров K_{c1} и $4\pi M_0$ от температуры и состава.

Из условий $A = 0$ и $B = 0$ были найдены оптимальные значения углов θ и δ . Эти значения были использованы для подстановок в формулы, определяющие сдвиг частоты (рис. 2).

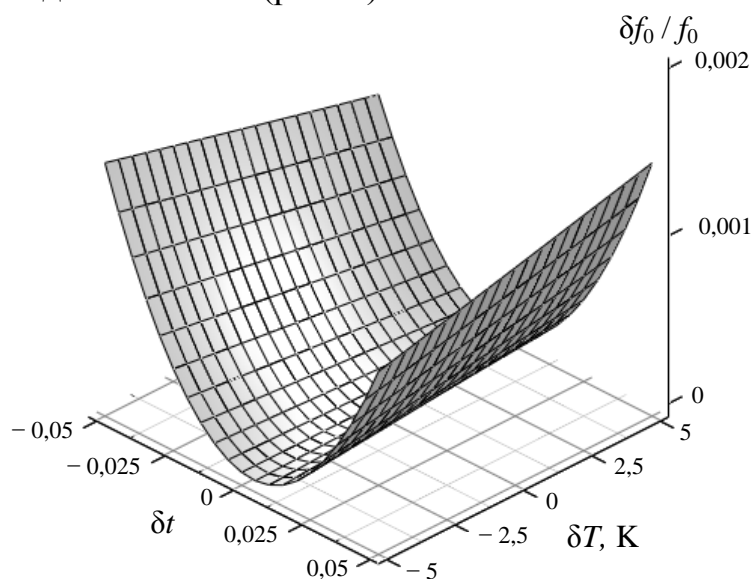


Рис. 2. Относительное изменение частоты ФМР в плёнке $Y_3Fe_{5-t}Ga_tO_{12}$ с исходными значениями $t = 0,29$, $T = 295$ К, $f_0 = 4\pi M_0 g$ и с оптимальными значениями углов θ и δ

На рис. 3 представлены сечения поверхности, изображенной на рис. 2, плоскостями $\delta t = 0$ и $\delta T = 0$.

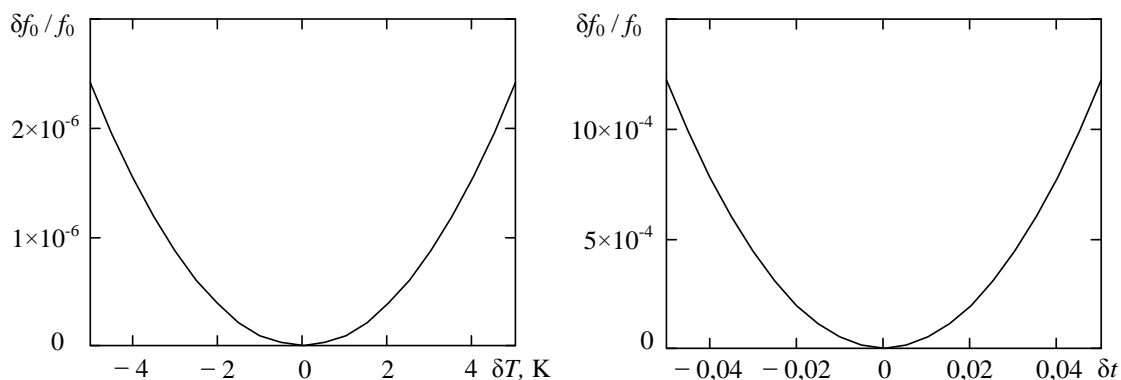


Рис. 3. Графики зависимости нормированной частоты ФМР от температуры (левый) и от состава (правый)

Выводы

Выбором кристаллографической ориентации пленки и ее ориентации в намагничивающем поле можно улучшить стабильность частот колебаний намагниченности относительно изменения температуры и химического состава. При оптимальном выборе указанных ориентаций смещение частоты квадратичным образом зависит от изменения температуры и концентрации замещающего химического элемента.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке устройств спин-волновой электроники, так как неконтролируемое изменение состава пленок в процессе их изготовления и изменение температурных режимов эксплуатации являются главными факторами нестабильности характеристик пленочных устройств.

Список литературы

- [1] Шагаев В.В. Ферритовые плёнки с повышенной стабильностью частоты ферромагнитного резонанса // ЖТФ. – 2017. – Т.87, № 3. – С. 378-382.
- [2] Шагаев В.В., Тун Тун Лин Метод повышения стабильности частот колебаний намагниченности в ферритовых плёнках // Материалы Всеросс. науч.-техн. конф. «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе» – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – Т. 1. – С. 162-166.
- [3] Hansen P., Röschmann P. and Tolksdorf W. // J. Appl. Phys. – 1974. – Vol. 45, N 6. – P. 2728-2732.
- [4] Hansen P. // J. Appl. Phys. – 1974. – Vol. 45, N 8. – P. 3638-3642.

Шагаев Владимир Васильевич – д-р физ.-мат. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: shagaev-vv@yandex.ru

Тун Тун Лин – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tuntunlinn50@gmail.com

С.М. Твердова, Йе Еинт Ко Ко

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ СПЕЧЕННЫХ ДВУХФАЗНЫХ КЕРМЕТОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Современная электронная техника отличается весьма высокими требованиями к надежности электровакуумных приборов (электронных ламп, ламп бегущей волны, клистронов и т.п.). Качество данных приборов в основном определяется долговечностью и надежностью катодных систем, являющихся источником электронов. Для получения эмиссии катод нагревают либо пропуская ток через тело катода, либо, что наиболее распространено, с помощью специального подогревателя. Для катодно-подогревательного узла используются керметы – композиционные материалы, изделия из которых получают методами порошковой технологии.

Исследование электрических свойств керметов, представляет большой интерес, так как именно электрические свойства в первую очередь определяют пригодность керметов как материалов высокотемпературных накаливаемых тел. В литературе приведены разнообразные сведения об электрических свойствах металлов, окислов и тугоплавких соединений (карбидов, солицидов и др.), но практически отсутствуют данные с свойствах спеченных керметов на их основе [1, 2, 3, 4]. Поэтому представляют особую ценность работы, посвященные теоретическому исследованию электрических свойств керметов.

В данной работе проанализирована методика Скорохода, одна из нескольких существующих модельных представлений об электропроводности керметов и рассчитано удельное сопротивление керметных материалов в соответствии с анализируемой моделью.

Скороход [5] предложил расчетную методику для порошковых смесей проводник – непроводник тока. Он дал для расчетов электропроводности смеси табулированную функцию

$$\frac{\lambda_{\text{смеси}}}{\lambda_{\text{пров.фазы}}} = f(\theta), \quad (1)$$

где: θ – объемное содержание непроводящей фазы;

λ – проводимость.

Значения функции Скорохода приведены в Таблице 1.

Расчетная методика Скорохода построена на сложных и далеко не убедительных модельных представлениях, вряд ли отражающих реальную структуру материала, полученного спеканием смеси порошков. Так, при выводе формул предполагается, что частицы проводящей фазы имеют форму цилиндров и эллипсоидов, образующих в матрице изолирующей фазы ассоциации сложной конфигурации (их несколько типов, но главный преобладающий – правильные тетраэдры, соприкасающиеся вершинами). Указанная зависимость в графическом виде приведена на Рис. 1.

Функция Скорохода [5]

| θ | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
|-------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| $f(\theta)$ | 1 | 0,847 | 0,687 | 0,525 | 0,368 | 0,222 | 0,14 | 0,059 | 0,033 | 0,008 |

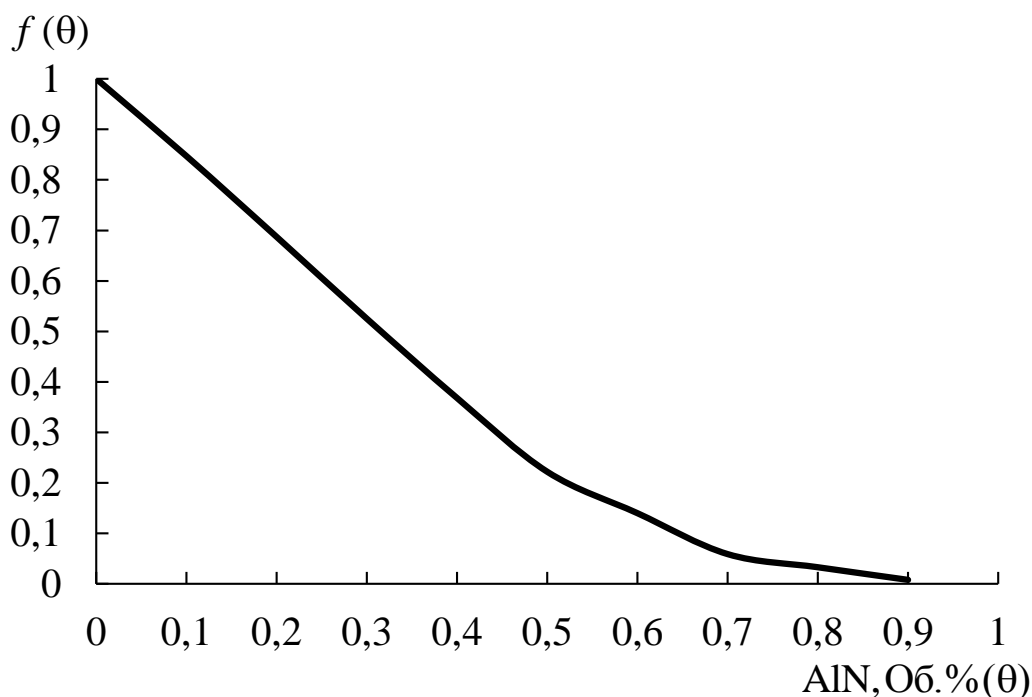


Рис. 1. Графическое изображение функции Скорохода

Как видно из таблицы и графика, подсчет электропроводности смеси можно осуществить в широких пределах изменения концентрации каждой из двух фаз. Однако эта методика не включает факторы, зависящие от состояния исходных материалов композиции и характера их технологической обработки.

С помощью Функции Скорохода можно рассчитать удельное сопротивление керметов.

$$\rho_k = \frac{\rho_{\text{пров. фазы}}}{f(\theta)}, \quad (2)$$

где: ρ_k – удельное сопротивление кермета;

$\rho_{\text{пров. фазы}}$ – удельное сопротивление проводящей фазы;

$f(\theta)$ – функция Скорохода.

При изготовлении композиционного материала чаще всего принято обозначать его по весам составляющих компонентов, например, МА23 – это композиция молибдена «Мо» и алюмонитрида «А», в которой вес AlN составляет 23% от общего веса композиции.

Рассчитанное удельное сопротивление этого же кермета с одинаковыми объемами проводящей и непроводящей фаз, при $\rho_{\text{Мо}}=5,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, и значении функции, равном 0,222, составило:

$$\rho_k = 24,77 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} = 24,77 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

В дальнейших работах предполагается сравнить результаты расчетов удельного сопротивления с помощью функции Скорохода с результатами расчетов другими методами.

Список литературы

[1] Семенов Ю.А. Производство подогревателей катодов электровакуумных приборов. М.: Госэнергоиздат, 1962. 136 с.

[2] Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Е.А. Левашов [и др.] // М.: Изд-во МИСиС, 2011. 377 с.

[3] Кэмпбелл И.Э., Маураха М.А., Елютин В.П. Техника высоких температур / Под ред. И.Э. Кэмибелла. М.: 1959. 596 с. (пер. с англ.).

[4] Андреев О.В., Вакулин А.А., Киселева К.В. Материаловедение. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2013. 632 с.

[5] Скороход В.В. Теплопроводность пористых материалов // ИФЖ. 1959. Т. 2. № 8. С. 51-58.

Твердова Светлана Михайловна – преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivalug@rambler.ru

Йе Еинт Ко Ко – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ueyintkoko49@gmail.com

Чжо Зай, В.В. Прасицкий

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОДА НАТРИЕВОЙ ЛАМПЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Переход аномального тлеющего разряда в дуговой определяется процессами на катоде и вблизи него, в результате которых отдельные участки катода могут нагреться до температур, достаточных для термоэмиссии электронов [1-3]. Причиной появления участков с повышенной температурой могут быть неоднородности катода по коэффициенту ионно-электронной эмиссии γ . Если некоторый участок катода имеет повышенное значение γ , это приводит к росту плотности электронного тока с него, что, в свою очередь, приводит к увеличению ионизации газа у этого участка катода, а следовательно, к увеличению количества и энергии бомбардирующих его ионов. Этот процесс может продолжаться до тех пор, пока не появится термоэмиссионный ток (его необходимое значение определяется балластным сопротивлением).

Пусть j – плотность тока на катоде, а j_s – плотность тока термоэмиссии. Тогда эффективный коэффициент вторичной эмиссии γ' при бомбардировке ионами с учетом термоэмиссии определяется выражением [3] $\gamma' = \gamma + (1 + \gamma)/(j/j_s - 1)$, т.е. при увеличении тока термоэмиссии j_s величина γ' возрастает. При этом, как следует из условия зажигания разряда $\gamma(\exp(\alpha d(U)) - 1) = 1$, величина разрядного напряжения U уменьшается до значения порядка 20-30 В, характерного для дугового разряда. Типичная вольтамперная характеристика газового разряда на участке перехода тлеющего разряда в дуговой изображена на Рис. 1.

После перехода разряда в лампе в дуговой режим, характеризующийся разрядным током в несколько ампер, начинается разогрев колбы до температуры порядка 1000 К. При этом происходит испарение ртути, находящейся при комнатной температуре в конденсированном состоянии. В результате за время в несколько минут происходит увеличение давления газовой смеси до одной атмосферы, т.е. в 50-100 раз. В конце этой фазы разряд происходит практически в парах ртути, поскольку содержание аргона в образующейся смеси не превосходит нескольких процентов. При этом разряд на поверхности катода стягивается в пятно диаметром порядка миллиметра, которое обычно смещается на верхний торец керна [4].

Эмитируемые катодом и образующиеся при ионизации атомов электроны возбуждают атомы натрия и ртути, которые отдают энергию преимущественно в виде излучения, преимущественно в видимом диапазоне

длин волн. Вследствие высокой температуры электрода происходит испарение эмиссионно-активного вещества с его поверхности. Это вещество частично возвращается на поверхность электрода, приводя к его перенапылению, а частично оседает на стенках колбы, уменьшая ее прозрачность.

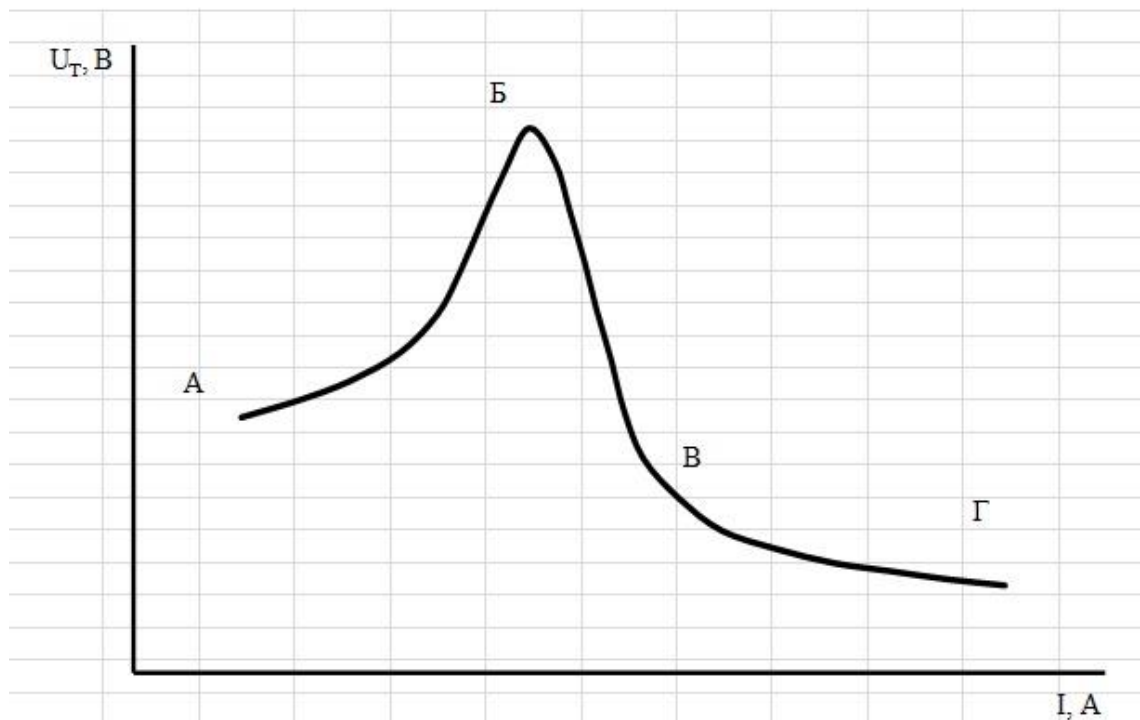


Рис. 1. Вольтамперная характеристика газового разряда:

А-Б – аномальный тлеющий разряд,
Б-В – переход тлеющего разряда в дуговой, В-Г – дуговой разряд

Эти недостаточно изученные пока процессы в значительной мере определяют долговечность ламп. Термоэмиссионный электрод является основным элементом дуговых разрядных ламп, эмитирующим электроны, необходимые для поддержания разряда в наполняющем колбу лампы газе. При этом главную роль играет термоэлектронная эмиссия из небольшой области локального перегрева на поверхности катода, называемой катодным пятном. Процессы, происходящие в катодном пятне, имеют первостепенное значение, поскольку они определяют существование разряда при данных условиях и скорость расходования материала электрода. В свою очередь, процессы в катодном пятне зависят от геометрии и состава эмиссионно-активного вещества электрода. В силу этого одним из основных параметров электродов приборов дугового разряда является температура, особенно в зоне катодного пятна. Она в значительной степени определяет скорость диффузии эмиссионных добавок в область катодного пятна, а также скорости их испарения и разложения. Тепловой режим электрода тесно связан с процессами в примыкающей к нему области газоразрядной плазмы. Происходящие в ней возбуждение, а также ионизация атомов газа, движение возникающих при этом заряженных частиц оказывают значи-

тельное влияние на формирование и поддержание катодного пятна, а также на перенос эмиссионных добавок вдоль поверхности катода.

В начальный момент времени после подачи напряжения на лампу зажигается тлеющий разряд между электродами. Продолжительность такого разряда, характеризующегося падением напряжения на уровне 100 В, достаточно мала (около 10 мс), а его главная задача – обеспечение создания заряженных частиц в разрядном промежутке между электродами. Поскольку ток разряда ограничивается балластным сопротивлением, имеющим активное сопротивление 50-100 Ом при напряжении питающей сети 220 В, то разряд имеет сильно выраженный аномальный характер. В результате поглощения энергии, переносимой бомбардирующими электрод частицами плазмы, электроды разогреваются до температуры, обеспечивающей возникновение катодного пятна, и разряд переходит в дуговой.

Список литературы

[1] Особенности формирования и развития начальных стадий импульсного пробоя в аргоне / В.С. Курбанисмаилов [и др.] // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 56-64.

[2] Byron S., Stabler R.C., Boris P.I. Electron-ion recombination // Physics Rev. Letters. 1962. V. 8, P. 376.

[3] Александров В.Я., Гуревич Д.Б., Подмошенский И.В. Исследование механизма возбуждения и ионизации в плазме аргоновой дуги // Оптика и спектроскопия. 1967. Т. 23, № 4. С. 521-527.

[4] Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 720 с.

Чжо Зай – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kyawzay49@gmail.com

Прасицкий Василий Витальевич – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sintel40@yandex.ru

СЕКЦИЯ 4.

ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ

Д.В. Шевелев, А.И. Сафонов

АБСОРБЦИОННАЯ БРОМИСТОЛИТИЕВАЯ ХОЛОДИЛЬНАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ ГАЗОВОГО МИКРОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В связи с ростом требований к экологической безопасности производства и ростом цен на энергоносители, проблемы утилизации бросового тепла и экономии первичного топлива являются актуальными во всем мире. В связи с этим представляется перспективным совершенствование и разработка технологических систем, использующих вторичные энергоресурсы для выработки холода и тепла.

В нефтехимической, текстильной, пищевой, металлургической отраслях промышленности нашли широкое применение абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ).

По сравнению с компрессионными холодильниками АБХМ обладают преимуществами в виде экологической безопасности, малого потребления электрической энергии, длительного срока службы [1]. Низкий КПД АБХМ компенсируется возможностью работы на бросовом тепле сбрасываемой горячей воды, пара, дымовых газов.

Особенно выгодной представляется работа АБХМ в связке с тем или иным типом теплового двигателя – созданием когенерационной или тригенерационной установки. Такие установки могут быть созданы на базе поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), паровых (ПТУ) и газовых турбин (ГТУ), установок на топливных элементах, двигателей Стирлинга. Как показал проведенный в [2] анализ наибольшее количество тепловой энергии возможно получить создавая когенерационную установку на базе ГТУ. Кроме того, газовые турбины компактны, не требуют вспомогательного оборудования, имеют высокий ресурс работы.

Возможно создание ГТУ двух схем рабочего процесса:

1) с традиционной очередностью процессов, соответствующих этапам цикла Брайтона (Рис. 1. а);

2) с измененной последовательностью процессов (Рис. 1 б).

В схеме 1 атмосферный воздух сжимается компрессором (К) и подается в камеру сгорания (КС). В КС происходит подача и смешение топлива с воздухом, сжигание полученной топливовоздушной смеси, далее продукты сгорания подаются в турбину (Т) где они совершают полезную работу. После турбины горячие продукты сгорания поступают в теплообменный аппарат поверхностного типа (ТА), в нем происходит теплообмен греющей воды АБХМ с выхлопными газами, далее выхлопные газы выбрасываются в атмосферу, а подогретая вода подается в АБХМ.

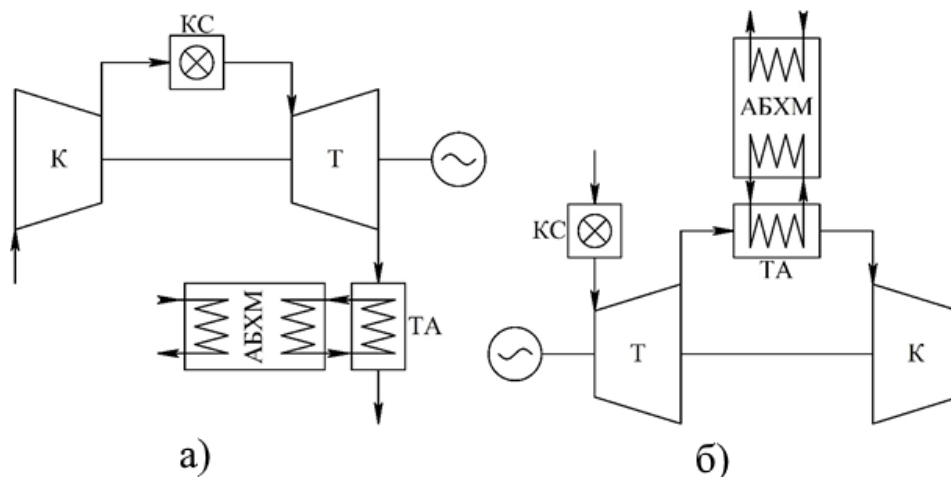


Рис. 1. Схемы ГТУ:

- а) Схема 1 - ГТУ с традиционной последовательностью процессов;
 б) Схема 2 - ГТУ с измененной очередностью процессов

В схеме с измененной последовательностью процессов первым элементом стоит камера сгорания, в котором осуществляется сжигание топлива при атмосферном давлении. Расширение продуктов сгорания в турбине осуществляется до давления ниже атмосферного и затем они подаются в теплообменный аппарат где нагревают воду АБХМ. Выброс продуктов сгорания в атмосферу осуществляется с помощью компрессора, повышающего их давление до атмосферного.

Целью данной работы являлся сравнительный термодинамический анализ этих двух схем с целью получения основных параметров эффективности микро-ГТУ.

На рынке холодильных машин присутствуют достаточно большое число компаний, занимающихся производством АБХМ – это Теплосибмаш (РФ), BROAD (Китай), THERMAX (Индия), CARRIER (США), EBARA (Япония), LESSAR (Чехия) и др. Несмотря на большое разнообразие производителей температурные графики греющей воды АБХМ различных фирм близки. Исходя из этого была выбрана АБХМ с двухступенчатой генерацией пара на горячей воде фирмы LESSAR LUC-2AB75, чьи характеристики наиболее полно представлены среди производителей других компаний [3]. LUC-2AB75 обладает холодопроизводительностью в 264 кВт, температурным графиком греющей воды 95/55 °С и расходом греющей воды 9,4 м³/ч (2,6 кг/с).

Рынок газовых микротурбин не обладает большим разнообразием компаний. Основная доля рынка принадлежит компании Capstone. Основными параметрами семейства газовых микротурбин этой компании является: традиционная очередность процессов, степень повышения давления в компрессоре 3...4, температура подвода теплоты 1050...1100 К, эти параметры были взяты за основу расчета схемы 1.

Параметры газовой турбины схемы 2 были взяты на основе рекомендаций [4]: температура подвода теплоты 1100 К, степень понижения давления в турбине 1,8. Параметры характеризующие эффективность процессов в элементах цикла были взяты те же что и в схеме 2.

Основные результаты термодинамического расчета приведены в таблице 1:

Таблица 1

Основные показатели рассмотренных схем

| Параметр | Схема 1 | Схема 2 |
|----------------------|---------|---------|
| Эффективный КПД, % | 20 | 4,6 |
| Мощность, кВт | 150 | 32,5 |
| Расход воздуха, кг/с | 1,02 | 0,77 |

Выполненные расчеты показали, что схема 1 ГТУ имеет более высокую мощность и КПД по сравнению со схемой 2.

К достоинствам схемы 2 следует отнести независимость мощности и КПД от температуры окружающей среды, возможность работы на природном газе низкого давления, большой ресурс по причине более низких по сравнению со схемой 1 оборотов ротора и простоты конструкции и системы регулирования.

Список литературы

[1] Холодильные машины/А. В. Бараненко, Н. Н. Бухарин, В. И. Пекарев, Л. С. Тимофеевский: Под общ. ред. Л. С. Тимофеевского.- СПб.: Политехника, 1997 г.- 992с.

[2] А.И. Сафонов, Е.Г. Липихин, Д.В. Шевелев Обзор состояния рынка когенерационных установок малой мощности // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – 11-1 – С.94-99

[3] Официальный сайт LESSAR характеристики двухступенчатых АБХМ на горячей воде Электронный ресурс: http://lessar.com/conditioning/prof/absorbtsionnye_chillery/na_gorjachej_vode/luc_2ab/

[4] Е.Г. Липихин, Д.В. Шевелев Исследование термодинамической эффективности микро ТЭЦ с газовой микротурбиной измененной очередности процессов // Инженерный журнал: Наука и инновации. №10 (58). 2016.

Шевелев Денис Владимирович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

Сафонов Александр Игоревич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: safonov.k40@yandex.ru

С.В. Киселёв, А.А. Сидоров

ВЛИЯНИЕ РАБОЧЕЙ РЕШЕТКИ НА НЕОДНОРОДНОСТЬ ПОТОКА ЗА ОХЛАЖДАЕМЫМИ СОПЛОВЫМИ ЛОПАТКАМИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Поток рабочего тела в турбомашинах нестационарен и неоднороден, т.е. скорость, давление и другие параметры не одинаковы в различных точках пространства. Неоднородность потока по окружности (окружная неоднородность) вызывается аэродинамическими решетками, патрубками, ребрами и стойками. Неоднородность в радиальном направлении возникает при закрутке потока, из-за концевых потерь в решетках и т.п.

Решетки вращающегося рабочего колеса делают поток нестационарным, причем нестационарность в этом случае периодическая, так как все параметры потока являются периодическими функциями времени.

Поток в турбомашине турбулентный, т.е. в нем наблюдаются хаотические пульсации, которые будут существовать, например, за направляющим аппаратом и при отсутствии рабочего колеса [1].

Для оценки динамической прочности рабочих лопаток турбомашин, дополнительных потерь, вызванных периодической нестационарностью, а также шума турбомашин необходимо, прежде всего, определить неоднородность поля, в котором работают лопатки. Неоднородность может создаваться разными причинами и в том числе соседней решеткой. Таким образом, рабочая решетка вращается в нестационарном (из-за аэродинамических следов за сопловыми лопатками) потоке, а рабочая решетка предыдущей ступени, в свою очередь, вносит дополнительные возмущения потока перед сопловой решеткой.

Неоднородность потока необходимо оценивать не в каналах между лопатками, а за аэродинамической решеткой, так как рядом с рассматриваемой решеткой движется решетка, на которую и будет влиять эта неоднородность. Понятно, что если рабочая решетка движется относительно сопловой, то она также вносит в поток возмущения, переменные во времени. В реальной ступени турбины перед сопловой решеткой вращается рабочая решетка предыдущей ступени. Поэтому поток, набегающий на сопловую решетку, является неравномерным, турбулентным и периодически нестационарным. Это существенным образом влияет на ее аэродинамические характеристики и приносит дополнительные потери (увеличивает неоднородность потока за решеткой). Сначала необходимо определить возмущения, вносимые одной сопловой решеткой, а затем определить возмущения при наличии рабочей решетки перед ней. Возмущения потока, вызванные сопловой решеткой при конвективном охлаждении были уже

изучены [4,5]. Вторая задача может быть решена или экспериментально, или, в некоторых случаях, теоретически.

Возмущения, вносимые решеткой, могут быть двух родов:

1. Вызванные неоднородностью потенциального потока
2. Вызванные вязкостью жидкости.

Возмущения первого рода связаны с тем, что решетка, внесенная в поток (даже невязкой жидкости), делает его неоднородным, т.е. поле скоростей и давлений зависит от координат. Возмущения второго рода связаны с влиянием вязкости жидкости и выражаются главным образом неоднородностью поля скоростей в кромочных следах (неоднородность в пограничном слое также присутствует). Потенциальные возмущения передаются вверх и вниз по потоку, т.е. в области перед решеткой и за ней. Возмущения, вызванные вязкостью, распространяются практически только вниз по потоку, т.е. в область за решеткой.

Ввиду того, что неоднородности не очень велики, можно решать квазистатическую задачу, т.е. рассматривать различные положения рабочей решетки относительно сопловой и проводить статические расчеты.

Ранее [3] были представлены результаты расчетов неоднородности потока за сопловыми лопатками с конвективным охлаждением при трех температурных режимах - изменялась начальная температура основного потока $t_0 = 500^\circ\text{C}, 800^\circ\text{C}, 1000^\circ\text{C}$.

В данной статье рассматривается влияние рабочей решетки предыдущей ступени на неоднородность потока в следах за сопловыми лопатками с конвективным охлаждением. Начальные параметры основного потока, охладителя, геометрические характеристики сопловой решетки выбирались аналогично расчетам в работах [2,3]. Для создания модели рабочей решетки использовался профиль 15A21-18Д (ТР-2Б), созданный на основе профиля МЭИ (Р-27-17Б).

Геометрические характеристики рабочей решетки:

- количество профилей в решетке – 14
- хорда профиля – 15 мм
- относительный шаг решетки – 0,7
- зазор между решетками 3 мм

Расчетные модели (без рабочей решетки и с добавлением рабочей решетки) показаны на рис.1.

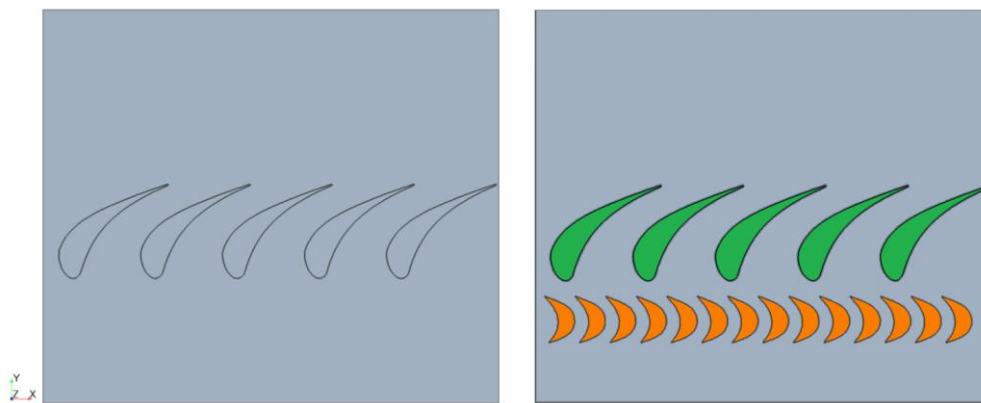


Рис. 1. Расчетные модели плоских решеток

Расчётная сетка модели содержала порядка 1,5 миллиона ячеек. Аналогично расчетам при конвективном, пленочном и пористом охлаждении сопловых лопаток без влияния рабочей решетки [3], замеры скорости потока в аэродинамических следах за сопловыми лопатками проводились по 20 линиям замеров (Рис.2).

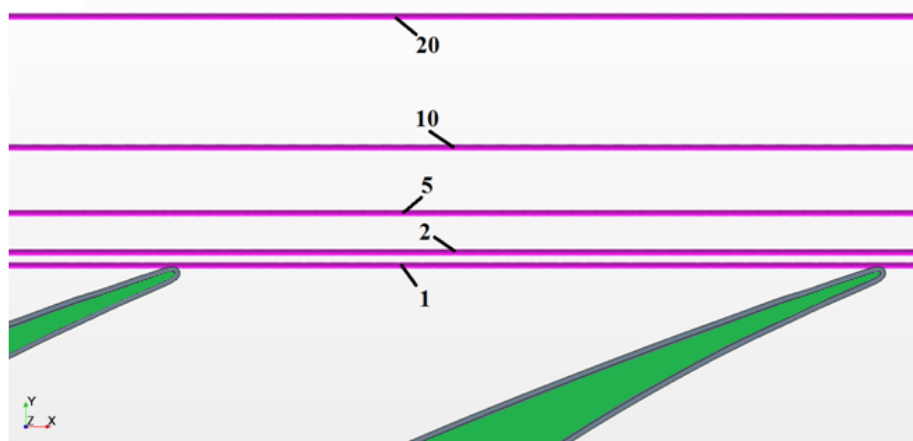


Рис. 2. Расчетные модели плоских решеток

В результате проведения нескольких серий расчетов при трех температурных режимах (изменялась начальная температура основного потока $t_0 = 500^\circ\text{C}, 800^\circ\text{C}, 1000^\circ\text{C}$) были получены поля распределения параметров потока. На рис.3 показано поле скоростей потока при наличии рабочей решетки перед сопловой решеткой (при температуре основного потока $t_0 = 800^\circ\text{C}$).

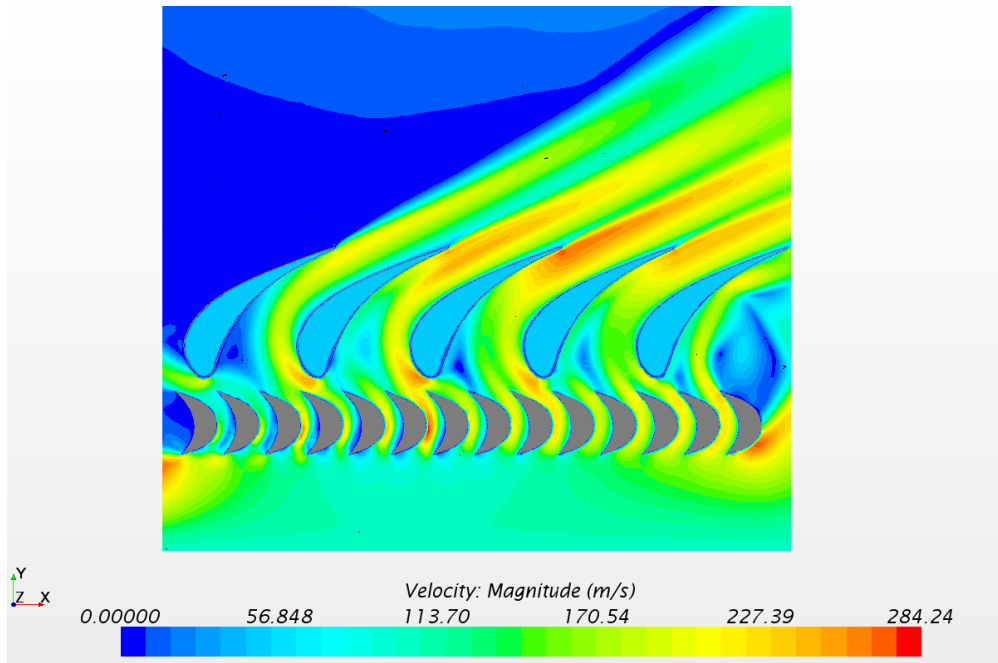


Рис. 3. Поле скоростей потока при $t_0 = 800^\circ\text{C}$
(при наличии рабочей решетки)

Одновременно с этим была рассмотрена также и квазистатическая задача – 10 различных положений рабочей решетки относительно сопловой с шагом 1 мм (Рис.4), с измерением скоростей потока в аэродинамических следах за сопловыми лопатками.

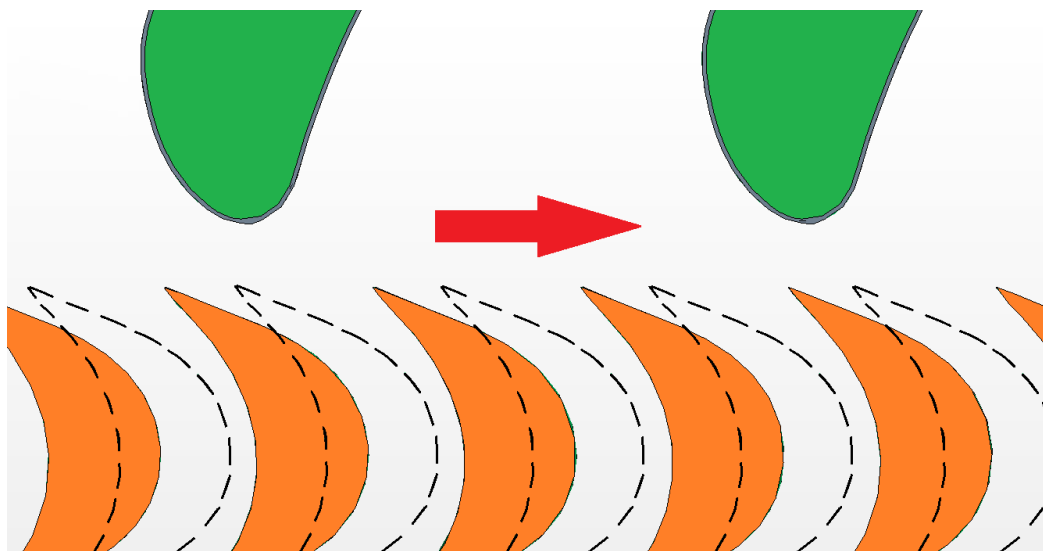


Рис. 4. Схема смещения рабочих лопаток относительно сопловых

На графиках (Рис.5) видно, что изменение положения рабочей решетки относительно сопловой решетки существенным образом не сказывается на возникающей неоднородности потока за сопловой решеткой.

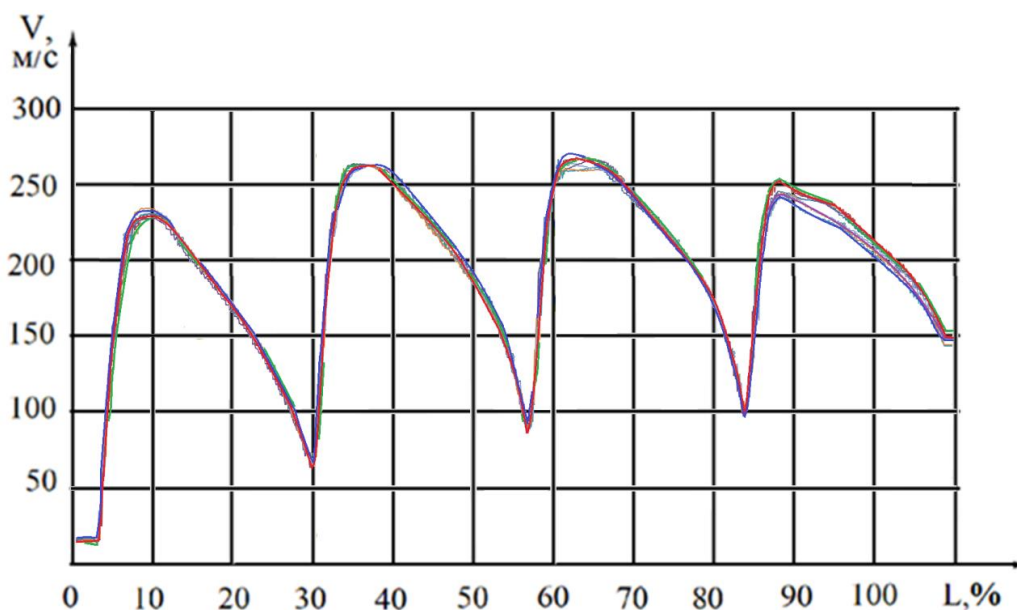


Рис. 5. Графики скоростей при различных положениях рабочей лопатки (по 5 линии замеров)

Теперь оценим непосредственное влияние рабочей решетки на неоднородность потока за сопловыми лопатками с конвективным охлаждением. Графики скоростей (Рис.6), замеренных по 5 линии (Рис.2) в аэродинамических следах за сопловыми лопатками показывают, что добавление рабочей решетки перед сопловой решеткой существенным образом сказывается на неоднородности потока.

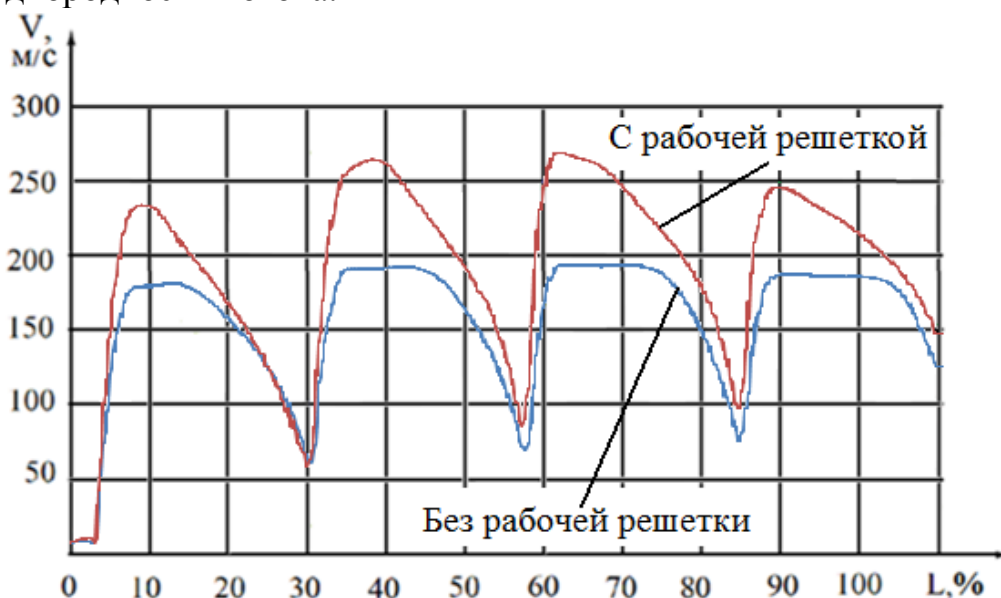


Рис. 6. Графики скоростей (по 5 линии замеров) при наличии и отсутствии рабочей решетки перед сопловой решеткой

Из графиков видно, что при добавлении рабочей решетки перед сопловой решеткой основной поток ускоряется, неоднородность в аэродинамических следах (максимальный провал скоростей) становится больше,

чем при варианте без рабочей решетки. Максимальный перепад скоростей также увеличивается, делая гармонику более выраженной, практически без прямых площадок.

Подобная картина наблюдается на любых расстояниях от сопловых лопаток и при любых температурных режимах $t_0 = 500^\circ\text{C}, 800^\circ\text{C}, 1000^\circ\text{C}$.

При анализе полученных результатов, в основе своей связанных с исследованием возбуждающих сил, невольно возникает вопрос о том, как при расчетах динамических напряжений в реальной рабочей решетке лопаток можно учесть многообразие факторов, влияющих на эти силы в потоке с высокой температурой и охлаждаемой сопловой решеткой. С этой целью обратимся к безразмерным критериям, определяющим силовое взаимодействие потока и рабочей решетки при моделировании процесса. Эти критерии известны из литературы, их всего пять:

1. $\frac{\rho_0 b^2}{m}$ - относительная плотность рабочего тела,

где $m = \rho f$ - масса единицы длины лопатки

2. $\frac{v^0}{w_1}$ - относительная величина «провала» скорости в следе,

3. $\frac{\omega b}{w_1}$ - критерий Струхалия,

где b - хорда лопатки, w_1 - скорость набегающего потока

4. $\frac{f}{\nu}$ - относительная частота возмущающей силы,

где ν - собственная частота колебаний лопатки

5. δ - коэффициент механического демпфирования

Первый критерий зависит от температуры, так как от нее зависит плотность ρ_0 рабочего тела. Второй критерий определяет неоднородность потока и зависит от температуры и способа охлаждения. Число Струхалия также зависит от температуры потока потому, что круговая частота колебаний лопатки ω зависит от модуля упругости E , а он в свою очередь от температуры. Таким образом, при расчетах, связанных с силовым взаимодействием потока с высокой температурой и решетки лопаток нет необходимости учитывать еще один (шестой) безразмерный параметр, определяемый температурой и типом охлаждения. В этом случае надо вводить только поправки на геометрию решеток лопаток, режим работы ступени и наличие (отсутствие) рабочей решетки предыдущей ступени.

По итогам исследований в данном разделе можно сделать следующие выводы:

1. Добавление рабочей решетки перед сопловой решеткой существенно увеличивает неоднородность потока.

2. Графики скоростей потока в аэродинамических следах имеют более выраженную гармоническую форму при наличии рабочей решетки.

3. При решении квазистатической задачи обнаружено, что изменение положения рабочей решетки относительно сопловой решетки практически не отражается на изменении картины неоднородности потока.

Список литературы

[1] Самойлович Г.С. Возбуждение колебаний лопаток турбомашин. – М.: Машиностроение, 1975, 287 с.

[2] Сидоров А.А., Киселев С.В. Влияние пленочного охлаждения сопловых лопаток на аэродинамические следы «Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе», г. Калуга, 2016.

[3] Сидоров А.А., Киселев С.В. Влияние различных типов охлаждения сопловых лопаток на неоднородность потока «Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе», г. Калуга, 2017.

[4] Сидоров А.А., Киселев С.В. Исследование влияния высокой температуры и конструкции лопаток на динамические напряжения. – Сборник трудов региональной научно-технической конференции «Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе», г. Калуга, 2011.

[5] Сидоров А.А., Киселев С.В. Влияние охлаждения сопловых лопаток высокотемпературной паровой турбины на неоднородность потока в кромочных следах за лопатками. – ISSN 0236-3941. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение», 2011, сс.191-196.

Киселёв Сергей Викторович – инженер-конструктор 1 категории.
E-mail: SKV1985@yandex.ru

Сидоров Альберт Александрович – канд. техн. наук, доцент
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alb.sidoroff2017@yandex.ru

А.А. Жинов, С.А. Иванов

ВЛИЯНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ЛОПАТОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СТУПЕНЕЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Наличие жидкой фазы в рабочем теле паровых турбин вызывает дополнительные потери энергии в ступенях и эрозионный износ элементов проточной части. Наибольший эрозионный износ имеют рабочие лопатки последних ступеней конденсационных турбин, в связи с максимальным содержанием крупнодисперсной влаги в потоке с максимальными скоростями. Различная плотность фаз рабочей среды приводит к рассогласованию скоростей жидкости и пара, как по скоростям, так и по направлениям. Это приводит к ударам капель влаги о лопатки и другие элементы проточной части и их эрозионному износу.

Не смотря на активное изучение данной проблемы [1,2,4], разработанные теории возникновения и взаимодействия капельной влаги с элементами проточной части, пока не дают четких представлений и объяснений многим физическим эффектам, происходящим в проточной части. Сегодня наблюдается рост случаев повреждения последних ступеней из-за воздействия крупнодисперсной влаги. Учитывая возросшие периоды эксплуатации агрегатов, работающих на частичных режимах и рост числа данных агрегатов, проблема каплеударной эрозии становится важным направлением для изучения.

Наибольшим повреждениям от влаги подвержена периферийная часть пера рабочей лопатки, значительный износ которой приводит к изменению собственных частот колебаний и уменьшению динамической прочности и надежности. От эрозии изменяются условия обтекания лопаток, растут профильные и иные виды потерь, ухудшается КПД ступеней. Эрозионный износ приводит к изменению и перераспределению напряжений в лопатках, создает концентраторы напряжений, способствует трещинообразованию, что может значительно ухудшить прочностные характеристики лопаток.

В настоящее время получили распространение несколько видов моделей каплеударной эрозии лопаток.

В основе математических моделей эрозии первого поколения лежат принятые функциональные зависимости между коэффициентом эрозионной опасности E [1] в проточной части и выбранными параметрами ступени (геометрическими, режимными), подвергающейся воздействию эрозионной среды. К математическим моделям эрозии первого поколения можно отнести модели МЭИ [1], фирм «Хитачи», «ALSTHOM», «KWU», «ABB».

Эмпирические модели эрозии второго поколения позволяют учитывать вклад в эрозионный процесс различных эффектов, связанных с образованием и движением в проточной части эрозионно-опасных капель влаги [3].

К математическим моделям эрозии третьего поколения относят модели, которые определяют форму поверхности эродирующей рабочей лопатки в виде некоторой функции времени эксплуатации ступени. Эти модели позволяют прогнозировать глубину эрозионного износа как функцию времени экспозиции (t) и осевой координаты (z) выбранной точки по обводу профиля рабочей лопатки в заданном по высоте сечении: $Y = Y(t, z)$. К таким моделям сегодня можно отнести только модернизированную математическую модель эрозии «IMP PAN», а также модель «МАИ», разработанную под руководством проф. Р.Г. Перельмана.

К математическим моделям эрозии переходного типа, которые по своим возможностям занимают промежуточное положение между моделями второго и третьего поколений, можно отнести математическую модель эрозии, разработанную Р.М. Яблоником и В.В. Поддубенко («ЦКТИ»). В модели принимается гипотеза линейного суммирования некоторой обобщенной глубины эрозионного износа (H), складывающейся из видимой (измеряемой) глубины износа (Y), и условно существующей глубины износа (Y_0), которая определяет толщину слоя, где произошло накопление микроповреждений материала. При этом предполагается, что скорости соударения с преградой отдельных групп капель из полидисперсного потока равны скорости соударения с данной преградой капель модального размера из этого потока, а общая масса капель различного размера, приходящаяся на единицу площади эродирующей поверхности, равна такой же массе капель модального размера. Данный вывод удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными, полученными на каплеударном стенде «ЦКТИ», но он не может быть распространен на случай каплеударного воздействия полидисперсного потока вторичной капельной влаги на входные кромки реальных рабочих лопаток влажно-паровых ступеней.

Все выше перечисленные модели должны учитывать кинетическую природу разрушения лопаточных материалов, находящихся под действием высокоскоростных импульсных каплеударных нагрузок. Одной из таких моделей является модель «ЛПИ-БИТМ» [5]. Авторы модели И.П. Фаддеев и А.В. Лагереv рассматривают механизм эрозионного разрушения как усталостный, обусловленный действием нормального напряжения на фронте упругой плоской продольной волны. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [6] показывают, что основным фактором эрозионного разрушения является волна Рэлея. Кроме того, в результате гидродинамического процесса в капле на месте контакта возникает нестационарное давление. В модели «ЛПИ-БИТМ» давление удара на пятне контакта принимается стационарным, а его величина определяется в упрощенной постановке – по одномерной теории гидроудара.

Уменьшить эрозионный износ лопаток влажнопаровых турбин можно путем сепарации крупнодисперсной влаги из потока, применяя защитные покрытия на лопатках, ударопрочные материалы для лопаток и других конструктивных элементов, применяя гидрофобные покрытия, используя специальные системы дробления капель и т.д.

При совершенствовании систем удаления влаги на периферийных обводах ступеней решается комплексная задача повышения эффективности отбора влаги с одновременным снижением утечек рабочего тела во влагулавливающие щели. Перспективным направлением совершенствования периферийного влагоудаления является использование для улавливания и удержания влаги на периферийном обводе желобчатых поверхностей определенного профиля [7].

Другим эффективным средством ослабления вредного влияния влаги на рабочие процессы может оказаться специальное профилирование направляющих лопаток, выполненное на основе уменьшения хорды в верхней трети направляющих лопаток последней ступени.

Перспективы совершенствования систем внутриканального влагоудаления связываются с применением сепарационно-испарительного влагоудаления, когда помимо отвода влаги в щели на направляющих лопатках используется нагрев лопатки перегретым или насыщенным паром с возможным выдувом этого пара через выходные кромки лопаток [8].

Таким образом, можно сформулировать вопросы, требующие дополнительного изучения для эффективной борьбы с эрозионным износом лопаток последних ступеней влажнопаровых турбин:

- Исследование влияния эрозионного износа лопаток на экономичность ступеней турбины.
- Исследование влияния эрозии на прочностные характеристики лопаток.
- Влияние эрозионного износа элементов проточной части на осевые усилия, действующие на ротор турбины.
- Совершенствование математических моделей каплеударной эрозии.
- Совершенствование и модернизация систем сепарации влаги в проточной части.
- Исследование возможности применения современных численных методов для прогнозирования и анализа состояния лопаток, подверженных эрозионному износу.

Список литературы

- [1] Филиппов Г.А., Поваров О.А., Пряхин В.В. Исследования и расчеты турбин влажного пара – М.: Энергия, 1973
- [2] Трояновский Б.М. Турбины для атомных электростанций – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978.
- [3] Engelke, W. Erosion of LP blades, W. Engelke Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separators: Theory, Instrumentation, Engineering. – Washington; London: Hemisphere Publ. Corp – 1976. – P. 298-312.
- [4] Somm E. Problems in the Development of Last Stage Blades for Large Steam Turbines, Proc. of the III Conf. on Steam Turbines of Great Output. – Gdansk, Poland.: Trans. IFFM, 1976. – № 70. – P. 55-80
- [5] Фаддеев, И.П. Вероятностная оценка напряженного состояния поверхностного слоя рабочей лопатки турбомашин при каплеударном нагружении / Фаддеев И.П., Лагерева А.В. // Изв. вузов. Сер. Энергетика. – 1984. – № 3. – С. 62-67
- [6] Шубенко-Шубин Л.А. Кинетическая модель процесса и оценка инкубационного периода разрушения материалов, подвергаемых воздействию капельных потоков / Шубенко-Шубин Л.А., Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. // Теплоэнергетика. – 1987. – № 2. – С. 46-50
- [7] Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Каплеударная эрозия лопаточных аппаратов паровых турбин. Прогнозирование и методы защиты, ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ПРОЦЕСИ Й УСТАТКУВАННЯ, -2012. - С. 76-87
- [8] Тищенко В.А. Разработка и реализация методики определения параметров жидкой фазы влажнопарового потока в элементах проточных частей. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, М.: МЭИ, – 2016 г.

Жинов Андрей Александрович – д-р техн. наук, зав. кафедрой КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru

Иванов Сергей Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Sergio.kotildo@yandex.ru

М.А. Малинкина, А.К. Карышев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО СОПЛОВОГО АППАРАТА СИЛОВОЙ ТУРБИНЫ ПРИВОДНЫХ ГТУ - ВАЖНЫЙ ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Газотранспортная система России представляет собой сложный народно-хозяйственный комплекс. В эксплуатации на компрессорных станциях (КС) находятся более 4100 ГПА, суммарной установленной мощностью свыше 48 МВт. Газотурбинный привод составляет более 80% парка ГПА и потребляет около 10% транспортируемого газа, при этом КПД, осредненный по всем станциям, не превышает 25%. Около 90% газотурбинного привода ГПА морально и физически устарели. Эксплуатация таких агрегатов за пределами расчетного ресурса приводит к дополнительным затратам из-за перерасхода природного газа на собственные нужды.

Для обеспечения бесперебойной передачи газа потребителям необходимо в год вводить 100-125 новых агрегатов общей мощностью 2000 МВт. Парк ГПА включает 65 типов приводных двигателей, 90% которых расположены на линейных станциях, 9,2% на дожимных промысловых и 0,8% на головных станциях. Когда расстояние от места добычи газа до потребителя превышает 4000 км., доля расходов на транспортировку в цене газа может достигать (30-50)%. Прогнозируемый рост потребления газа в Китае, Индии, Европе на 2005-2020 годы составит около 200 млн. куб. метров. Основная доля поставок будет удовлетворяться трубопроводным транспортом из России. Разработка новых месторождений газа удаленных от потребителей на тысячи километров, и расположенных, как правило, в местах с тяжелыми климатическими условиями (Штокман, Ямал) будет затратной, что приведет к росту стоимости газа и может сделать конкурентно способными другие источники энергии (сжиженный газ, уголь, ядерное топливо, возобновляемые источники энергии). Для сохранения лидирующего положения потребуются поиск и создание новых мало затратных технологий добычи и транспортировки газа. К ним можно отнести – увеличение диаметра труб и повышение в них давления газа, что уменьшит затраты на перекачку и снизит потребности в основном оборудовании, стоимость которого достигает 10-15% от стоимости всего газопровода. Большие резервы имеются в снижении стоимости строительства транспортных систем, получаемых путем внедрения новых технологий сварки, новых материалов и использования на КС более мощного оборудования для перекачки газа, а также повышение единичной мощности и экономичности газотурбинного привода.

Как известно, производители газотурбинного привода выполняют поставку ГТУ определенной расчетной мощности для районов с различными климатическими условиями (температура, давление, влажность наружного воздуха), так что ГТУ привод в основном, оказывается в эксплуатации в нерасчетном режиме. Кроме того, сезонные колебания потребления газа обуславливают работу ГПА на частичных нагрузках, что так же снижает КПД привода. Уменьшение влияния нагрузки на КПД может быть достигнуто применением двухконтурной системы регулирования, позволяющей выбирать оптимальную программу регулирования при изменении режима работы. При таком подходе теоретически становится возможной реализация режимов в любой точке на характеристике компрессора.

Вторым регулирующим фактором может рассматриваться расход рабочего тела через ГТУ, изменяемый поворотом направляющих лопаток компрессора или сопловых лопаток турбины. Для ГТУ со свободной силовой турбиной изменение расхода достигается только поворотом сопловых лопаток силовой турбины. При этом показывается, что наиболее эффективным является применение поворотных лопаток 1-ой ступени соплового аппарата – в этом случае каждому углу поворота соответствует большее изменение расхода.

Анализ переменных режимов работы ГТУ – сложная и дорогостоящая задача. Для исследования процессов, происходящих в установке пользуются различными математическими моделями. Разработанная в [4] математическая модель проточной части свободной силовой турбины с регулируемым сопловым аппаратом (РСА) в первой ступени показывает возможности достижения максимальных внутренних КПД ступеней осевых турбин средней веерности при различных значениях коэффициентов расхода и нагрузки с учетом изменения степени реактивности в одномерной постановке. В работе уточнена математическая модель регулируемой турбинной ступени, что делает возможным ее использование при проектировании регулируемых ступеней новых осевых турбин. Установлено влияние геометрических параметров во взаимосвязи с кинематическими параметрами ступени на возможно достижимые значения КПД регулируемых ступеней. Показано, что для исследуемой модели турбины, если управление выполнять в основном в направлении прикрытия РСА на характерных режимах, то при использовании такого ГТД будет наблюдаться не снижение, а повышение КПД регулируемой ступени и всей турбины.

Несколько иная математическая модель газотурбинного привода газоперекачивающего агрегата с регулируемой силовой турбиной в виде аппроксимационных зависимостей относительных величин мощности и КПД от режимных параметров предложена в [3].

В [7] автор отмечает, что для целом ряде областей применения газовых турбин наиболее целесообразным приемом их регулирования являются поворотные сопловые лопатки. Это дает возможность осуществить работу аг-

регата при параметрах, теоретически охватывающих все поле характеристики компрессора. В случае поворотных сопловых лопаток работа агрегата может быть осуществлена не при однозначной связи расхода, температуры, давления газа и числа оборотов, а при различных вариантах её.

Регулируемый сопловой аппарат в ряде случаев дает значительные преимущества по тепловой экономичности установки на частичных нагрузках. Применение регулируемого соплового аппарата в силовой турбине двухвального газотурбинного двигателя с регенератором фирмы Дженерал Электрик позволило получить экономию топлива на частичных режимах. Кроме того, регулируемый сопловой аппарат позволяет избежать режимов в зоне неустойчивой работы компрессора, улучшить показатели работы установки при изменении температуры наружного воздуха. Расчеты, подтверждаемые опытами, показывают, что путем поворота сопловых лопаток можно производить регулирование установки в широком диапазоне режимов. Использование регулируемого соплового аппарата дает возможность организовать переменные режимы транспортного газотурбинного двигателя по двум законам: постоянства начальной температуры газа, постоянства оборотов установки. Сохранение при частичных нагрузках постоянной температуры обеспечивает повышение экономичности двигателя, а сохранение постоянных оборотов на частичных режимах значительно улучшает приемистость двигателя. Поэтому применение поворотных лопаток для ГТД, несмотря на некоторые сложности конструкции, является перспективным.

Компрессорные станции обычно оснащают несколькими агрегатами, работающими параллельно или последовательно. Как известно, максимальная располагаемая мощность ГТУ непрерывно снижается в течение периода между капитальными ремонтами (из-за увеличения радиальных зазоров лопаточного аппарата, эрозии лопаток компрессора и загрязнений). Поэтому, при эксплуатации требуется изменять нагрузку работающих машин вплоть до включения или выключения отдельных агрегатов.

В реальных ГТУ изменения расхода и давления рабочего тела при изменениях параметров окружающего воздуха и нагрузки определяются характеристиками компрессоров и турбин.

Для большинства установок, рабочие точки на характеристике компрессора располагаются на одной кривой, иными словами, каждой нагрузке соответствует лишь одно значение расхода, степени сжатия, температуры и других параметров.

Большинство двигателей, установленных на компрессорных станциях чаще всего регулируют по законам: $t_2=const$, или $t_m=const$ в жаркое время года и $n_n=const$ – в холодное время года [5]. Применение первого закона основывается на том, что летом располагаемой мощности ГТУ обычно не

хватает для обеспечения заданной производительности газопровода из-за повышенной температуры воздуха и транспортируемого газа и вследствие снижения КПД компрессора и турбины при увеличении радиальных зазоров. Второй закон регулирования, обеспечивающий несение заданной нагрузки используют, когда имеется необходимый запас по мощности ГТУ. При очень низких температурах воздуха газотурбинные установки с хорошим состоянием проточной части несут нагрузку с заметным запасом по температуре газа, значительную часть которого, без ущерба для ресурса, можно использовать для повышения экономичности [2].

Добавление второго регулирующего фактора (совместно с регулированием подачи топлива в камеру сгорания), позволяет контролировать сразу два параметра, иными словами, осуществлять законы регулирования $n_n = const$ и $t_m = const$ одновременно.

Наиболее эффективным вторым регулирующим фактором, в соответствии с теорией газовых турбин является регулируемый сопловой аппарат силовой турбины [6]. В случае его применения появляется возможность работать при параметрах, охватывающих все поле характеристики компрессора. Соответственно, заданную нагрузку можно нести при наиболее выгодной температуре газа и при соответствующих значениях основных параметров. Изменение площади проходного сечения соплового аппарата силовой турбины позволяет избежать помпажа компрессора при малых нагрузках и облегчить запуск установки. Регулирование проходного сечения соплового аппарата может быть осуществлено, например, путем применения поворотных лопаток.

Целесообразно совместное применение регулируемого входного направляющего аппарата (РВНА) компрессора совместно с регулируемым сопловым аппаратом турбины. При выделении компрессора вместе с компрессорной турбиной в отдельный блок, РВНА служит только для регулирования самого компрессора и частично его турбины (т.к. влияет на к.п.д.). В приводных ГТУ с регулируемой турбиной эффективность дополнительного регулирования установки во многом зависит от ширины зоны рабочих режимов компрессора. Расширение рабочей области достигается за счет оснащения осевого компрессора несколькими рядами поворотных направляющих лопаток.

Список литературы

[1] Автоматизация газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / [К. А. Тельнов, А. А. Файнштейн, С. З. Шабашов и др.; Науч. ред. К. А. Тельнов]. - Л. : Недра : Ленингр. отд-ние, 1983. - 280 с.

[2] Варивода О.А., Васин О.Е., Ревзин Б.С. Экономический эффект от оптимизации программы регулирования в приводных ГТУ. Газотурбинные технологии, 2001, №4, с. 32-33.

[3] К математическому моделированию газотурбинных приводов газоперекачивающих агрегатов / В.П. Герасименко, А.И. Дутчак, А.С. Мандра, Н.Б. Налесный, Т.М. Нурмухаметов // Питання розвитку газової промисловості України: Зб. наук. пр. «УкрНДІгаз». – Харків. – 2006. – Вип. XXXIV. – С. 232-237.

[4] Комаров О.В. Исследования и одномерная оптимизация проточной части свободных силовых турбин с регулируемой первой ступенью приводных ГТУ и ГТД. Дис. ... к.т.н. Екатеринбург, 2005, – 141 с.

[5] Котляр, И.В. Частичные и переходные режимы работы судовых газотурбинных установок [Текст]. - Ленинград : Судостроение, 1966. - 290 с.

[6] Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 432 с.

[7] Федотов А.С. Совершенствование проточной части турбинной ступени с регулируемым сопловым аппаратом : диссертация ... кандидата технических наук : 05.04.01 Харьков, 1984 119 с. : 61 85-5/3003.

Малинкина Мария Александровна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: k1kf@bmstu-kaluga.ru

Карышев Анатолий Константинович – канд. техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: k1kf@bmstu-kaluga.ru

А.А. Жинов, Г.А. Круглова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПАРОРАЗГРУЗОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ ДИСКОВ ТУРБИНЫ НА ОСЕВОЕ УСИЛИЕ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Осевое усилие, действующее на ротор турбины, возникает вследствие перепадов давлений на элементы проточной части турбины, уступы ротора, уплотнения. Это усилие стремится сдвинуть ротор в направлении уменьшения давления, то есть, в направлении движения пара [4]. Для восприятия осевого усилия, действующего на ротор во время работы турбины, и передачи его на детали статора служит упорный подшипник [5]. Он фиксирует осевое положение вращающегося ротора турбины по отношению к ее неподвижным деталям, при этом положение ротора в упорном подшипнике и положение самого упорного подшипника в корпусе определяют величину осевых зазоров в проточной части турбины и уплотнениях [1]. При чрезмерном увеличении осевые усилия способны нарушить нормальную работу упорного подшипника, что может привести к поломке подшипника, проточной части турбины и повреждению концевых и диафрагменных уплотнений ротора. Такие аварии крайне опасны, требуют экстренной остановки турбины, длительного и дорогостоящего ремонта.

Для того, чтобы частично разгрузить ротор турбины от осевого усилия применяют следующие методы:

- 1) использование разгрузочного поршня (думмиса);
- 2) применение разгрузочных отверстий в дисках рабочих колес;
- 3) применение двухпоточной конструкции турбины;
- 4) в многоцилиндровых турбинах направляют потоки пара в разных цилиндрах во взаимно противоположные стороны [5].

В данной работе рассмотрен метод уменьшения осевого усилия с применением пароразгрузочных отверстий, которые снижают разность давлений на полотно диска, тем самым уменьшая усилие, действующее на ступень и на ротор турбины в целом.

Исследовалось то, как расположение разгрузочных отверстий на диске влияет на осевое усилие. Была написана компьютерная программа по методике РТМ 108.021.08-86 [2,3] и проведен численный эксперимент, в ходе которого рассчитывалось осевое усилие, действующее на ступень давления теплофикационной турбины ПГУ Т-48 производства ОАО «КТЗ». Диаметр расположения разгрузочных отверстий на диске ступени: $D_o = 0,62$ м, $D_o = 0,72$ м, $D_o = 0,82$ м. Основные исходные данные расчетов приведены в таблице 1. Моделировался номинальный режим работы ступени с определением расхода пара через уплотнение диафрагмы, расхода пара через пароразгрузочные отверстия, утечки пара через корневой и надбандажные зазоры.

Основные исходные данные

| Наименование | Обозначение | Величина |
|--|-------------|-------------|
| Статическое давление перед ступенью | p_1 | 53,53 бар |
| Статическое давление за ступенью | p_3 | 42,99 бар |
| Температура пара за сопловым аппаратом | T_2 | 473 °C |
| Частота вращения ротора | n | 3000 об/мин |
| Расход пара через ступень | $G_{ст}$ | 55,111 кг/с |
| Средний диаметр ступени | $D_{ср}$ | 1,072 м |
| Высота рабочей лопатки | l_l | 0,02 м |
| Диаметр уплотнения диафрагмы | $D_{уд}$ | 0,44 м |

Некоторые результаты моделирования представлены на рисунках 1 и 2.

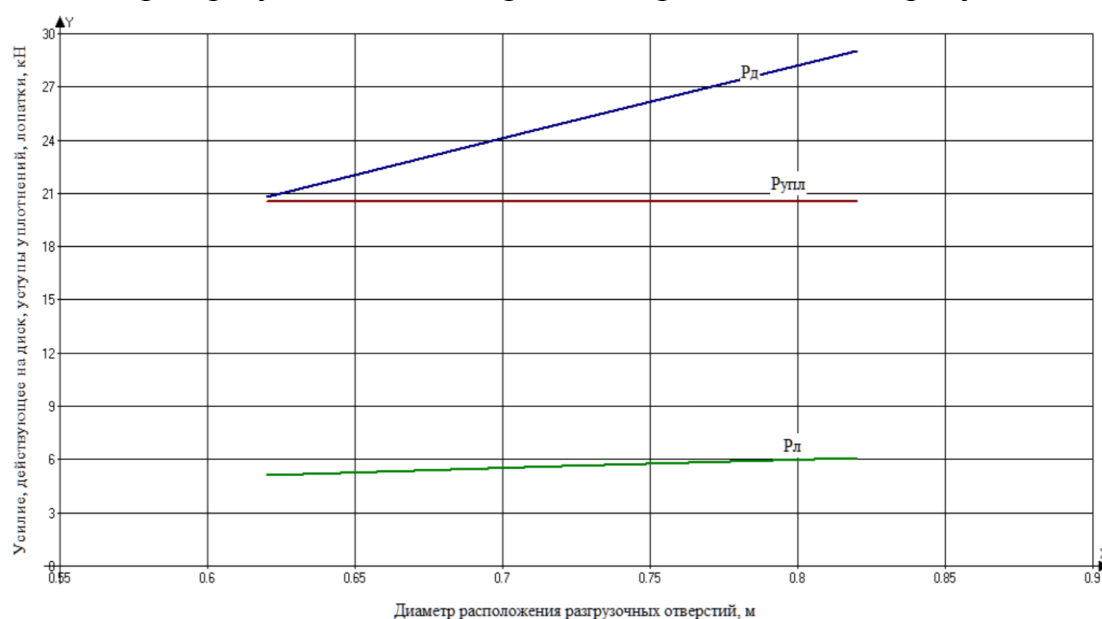


Рис. 1. Влияние расположения разгрузочных отверстий на осевое усилие, действующее на диск, уплотнения и лопатки турбины

Из проведенного исследования следует, что расположение пароразгрузочных отверстий сильно влияет на осевое усилие, действующее на ступень турбины. Чем дальше от оси ротора находятся разгрузочные отверстия, тем больше осевое усилие. Особенно сильно от такого расположения зависит усилие, действующее на диск. В то же время, усилие в уплотнении остается практически неизменным, а усилие, действующее на рабочие лопатки, постепенно перестает зависеть от расположения отверстий на диске.

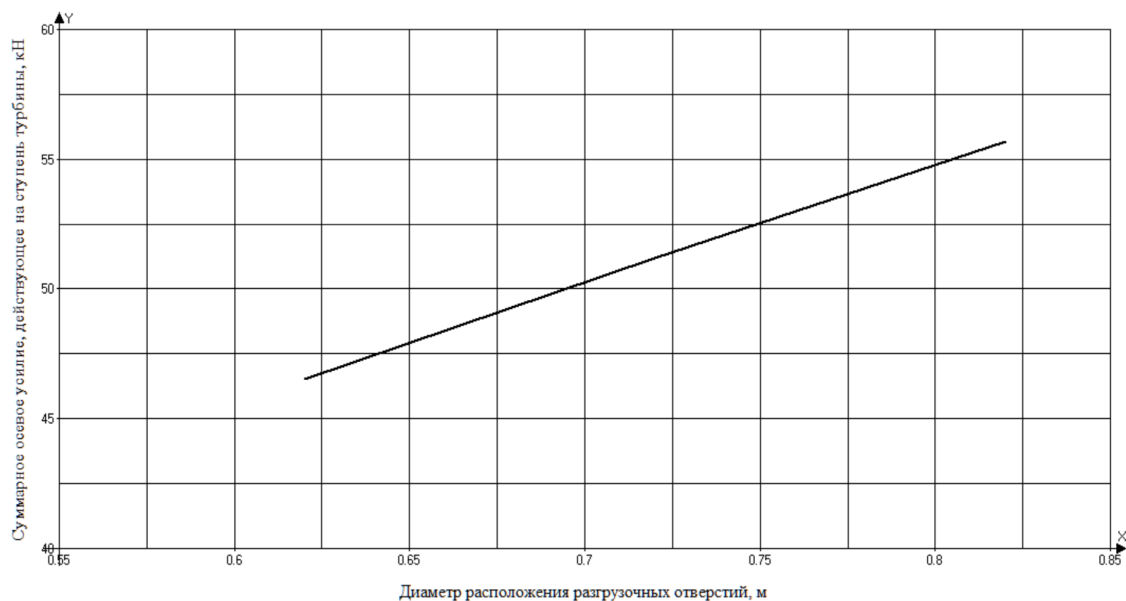


Рис. 2. Зависимость величины суммарного усилия на ступень турбины от диаметра расположения разгрузочных отверстий

Результаты исследования могут быть полезны при проектировании паровых турбин. Снижая диаметр расположения разгрузочных отверстий можно уменьшить усилие, действующее на ступень турбины и соответственно на ротор, при этом необходимо провести поверочные прочностные расчеты диска и решить вопросы с технологией изготовления пароразгрузочных отверстий на малых диаметрах.

Список литературы

- [1] Ремонт паровых турбин: Учебное пособие/В.Н.Родин [и др.]; под ред. Ю.М. Бродова, В.Н. Родина. Екатеринбург: УГТУ - УПИ, 2002. – 203 с., ил.
- [2] РТМ 108.021.08-86. Турбины паровые стационарные. Расчет осевого усилия.
- [3] РТМ 24.021.08. Турбины паровые стационарные. Нормы теплового расчета. Расчет осевого усилия.
- [4] Турбины тепловых и атомных электрических станций: Учебник для вузов. – 2-е изд., пререб. и доп./А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; Под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова. –М.: Издательство МЭИ, 2001. -488с. ил.
- [5] Сережкина Л.П., Зарецкий Е.И. Осевые подшипники мощных паровых турбин. – М.: Машиностроение, 1988. – 176 с.: ил.

Жинов Андрей Александрович – д-р техн. наук, зав. кафедрой КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru

Круглова Галина Алексеевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: signora.pandora@ya.ru

Д.В. Шевелев, А.А. Заикин

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИДЕАЛЬНОГО ЦИКЛА ГТУ С ИЗОТЕРМИЧЕСКИМ РАСШИРЕНИЕМ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Тепловые двигатели с подводом тепла при постоянном давлении (цикл Брайтона) нашли широкое применение. Цикл Брайтона лежит в основе рабочего процесса авиационных турбореактивных и турбовальных двигателей, стационарных газотурбинных установок (ГТУ). Характеристики цикла Брайтона хорошо известны и описаны в литературе [1-4]. Предельное значение термического КПД цикла Брайтона совпадает с КПД цикла Карно, однако в этом случае полезная работа цикла будет равна нулю. В остальных случаях, термический КПД цикла Брайтона меньше КПД цикла Карно.

Увеличить работу цикла ГТУ возможно за счет осуществления изотермического сжатия и изотермического расширения.

Свойства идеального цикла ГТУ с изотермическим сжатием хорошо известны. Вывод ключевых формул приводится в литературе. Однако, свойства идеального цикла ГТУ с изотермическим расширением в массовой литературе не представлены, как и не представлено сравнение этих циклов.

Осуществим вывод термического КПД цикла ГТУ с подводом тепла при постоянном давлении и изотермическом расширении (Рис. 1).

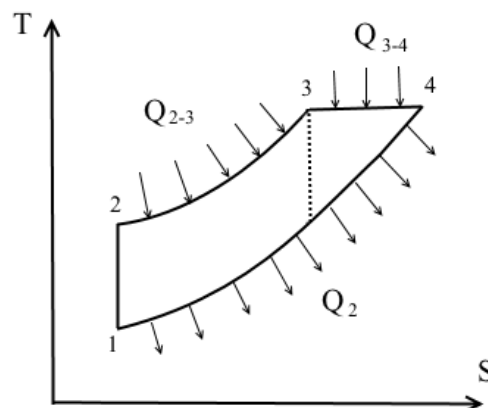


Рис. 1. T - S диаграмма цикла ГТУ с изотермическим расширением

Для упрощения выкладок, введем общепринятые при термодинамическом анализе циклов допущения:

- постоянства теплоемкостей рабочего тела, что влечет за собой неизменность величины показателя адиабаты $k = c_p / c_v$;

– неизменности величины расхода рабочего тела на протяжении всех этапов цикла.

Термический КПД теплового двигателя определяется выражением

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1)$$

где $Q_2 = c_p(T_4 - T_1) = c_p(T_3 - T_1)$ – количество отведенного в цикле тепла; Q_1 – количество подведенного в цикл тепла.

Для цикла с изотермическим расширением, величина Q_1 может быть представлена как

$$Q_1 = Q_{2-3} + Q_{3-4}$$

Величина Q_{2-3} представляет собой количество тепла подведенного к рабочему телу при постоянном давлении p_2 и определяется по формуле

$$Q_{2-3} = c_p(T_3 - T_2)$$

Величина Q_{3-4} представляет собой количество тепла которое необходимо подвести к рабочему телу, чтобы компенсировать понижение его температуры в процессе его расширения. Количество этого тепла будет определяться работой расширения:

$$Q_{3-4} = -l_{расш} = -\int \frac{dp}{\rho}$$

Принимая во внимание, что для изотермического процесса расширения $k=1$ и $\frac{p}{\rho} = const$, теплота Q_{3-4} может быть определена как

$$Q_{3-4} = -\int_3^4 \frac{dp}{\rho} = -const \int_3^4 \frac{dp}{p} = -RT_3 \ln \frac{p_1}{p_2} = mc_p T_3 \ln \frac{p_2}{p_1} = c_p T_3 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^m$$

где $m = \frac{k-1}{k}$.

С учетом вышеизложенного, термический КПД идеального цикла ГТУ с изотермическим расширением определится как

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{c_p(T_3 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2) + c_p T_3 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^m} = \frac{\left(\frac{T_3}{T_1} - 1 \right)}{\left(\frac{T_3}{T_1} - \frac{T_2}{T_1} + \frac{T_3}{T_1} \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^m \right)} \quad (2)$$

Введем следующие обозначения:

$\pi = \frac{p_2}{p_1}$ – степень повышения давления в цикле;

$\tau = \frac{T_3}{T_1}$ – степень повышения температуры в цикле.

С учетом этого выражение (2) может быть преобразовано к виду

$$\eta_t = 1 - \frac{\tau - 1}{\tau - \pi^m + \tau \ln \pi^m}$$

Работа цикла теплового двигателя определяется как $l_u = Q_1 - Q_2$ и с учетом вышеизложенного:

$$l_u = c_p T_3 \left(\ln \pi^m + \frac{1}{\tau} (1 - \pi^m) \right) \quad (3)$$

На рис.2 представлено сравнение удельных параметров цикла Брайтона и циклов с изотермическим сжатием и расширением. Расчеты произведены для степени повышения температуры в цикле $\tau = 3,5$ и значении показателя $m = 0,286$.

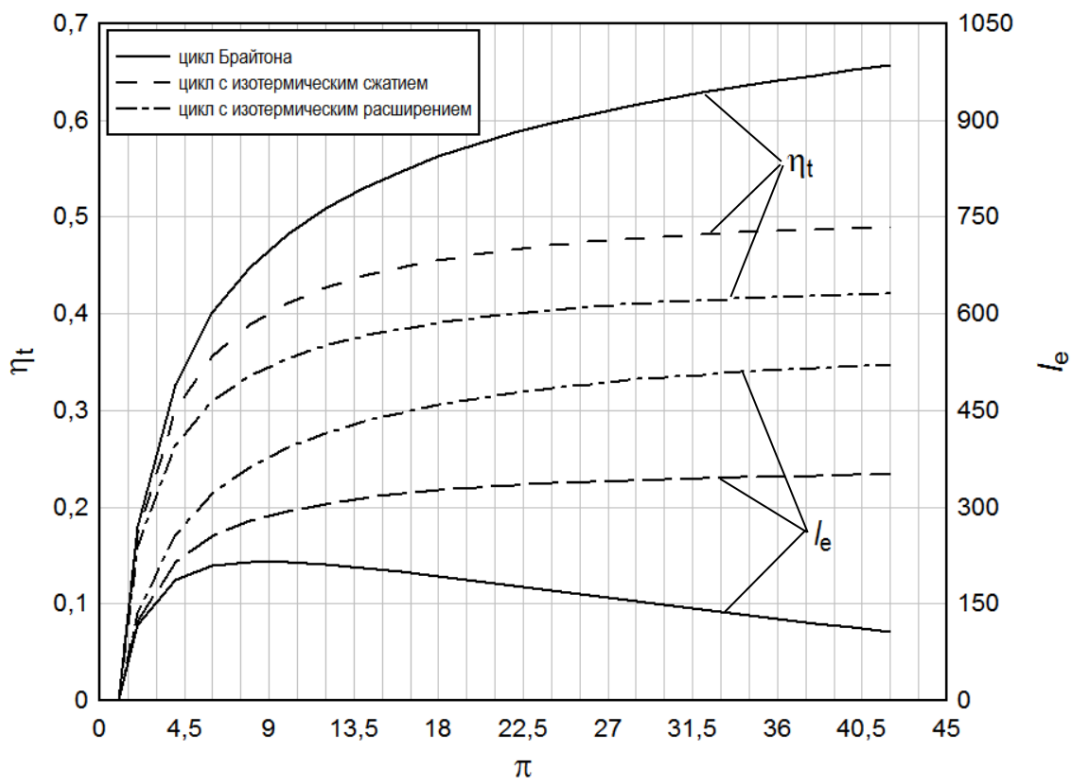


Рис. 2. Удельные параметры циклов ГТУ

Как видно из рис. 1, введение изотермического расширения существенно увеличивает удельную работу цикла как по сравнению с циклом Брайтона, так и по сравнению с циклом с изотермическим сжатием. Увеличение работы объясняется большей работой изотермического расширения газа по сравнению с работой изоэнтропного расширения в простом цикле.

Снижение термического КПД цикла с изотермическим расширением объясняется возрастанием количества тепла отводимого в цикле Q_2 .

Список литературы

[1] Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок./ Ю.С. Елисеев, Э.А. Манушин, В.Е. Михальцев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.

[2] Кириллов И.И. Газовые турбины. Москва. Издательство машиностроительной литературы. 1948.

[3] Газовые турбины. Термодинамические процессы и теплообмен в конструкциях/ Шнеэ Я.И., Капинос В.М., Котляр И.В.М. – М.:Машиностроение, 1976.

[4] Уваров В.В. Газовые турбины и газотурбинные установки. М.:Высшая школа, 1970.

Шевелев Денис Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

Заикин Андрей Анатольевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

А.С. Голиков

НАУЧНО-УЧЕБНАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОУПРУГИХ ЯВЛЕНИЙ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Надежность лопаточного аппарата является одним из важных условий безаварийной работы турбомашин. Существует достаточно большое количество факторов различного происхождения, которые влияют на надежность работы лопаточного аппарата. Для исследования этих факторов, их возникновения, степени влияния, используются различные научные методы.

Однако газодинамические процессы, движения жидких смесей, растворов и многофазных сред происходящие в машинах, чрезвычайно сложны, и чисто теоретическое изучение их весьма затруднено. Поэтому при исследовании и разработке новых конструкций широко пользуются экспериментом [1].

Для исследования взаимодействия потока рабочего тела с элементами турбомашин, и определения степени влияния этих факторов на вибрационную надежность лопаток, была создана научно-учебная установка.

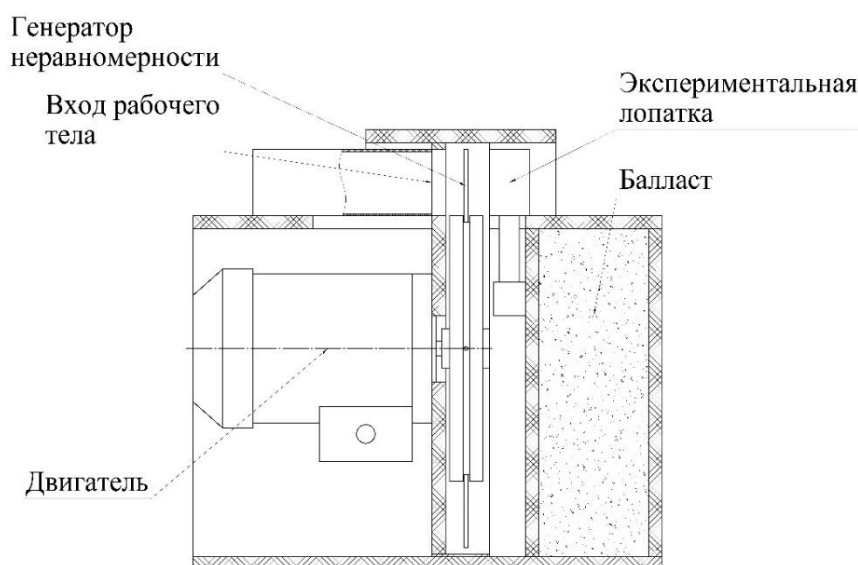


Рис. 1. Установка для исследования аэроупругих явлений

Особенностью конструкции установки является возможность изменения направления движения рабочего тела (прямое и обратное) относительно решетки экспериментальных профилей. Также имеется возможность создания течения рабочего тела с частичным отводом за и перед экспериментальной решеткой профилей. Генератор неравномерности позволяет имитировать различные виды неравномерности потока, часто встречающиеся в проточной части турбомашин. Скорости, которые могут быть получены в

установке достигают 0,3М, а также больше, при особых условиях организации течения рабочего тела. Имеется возможность распыла капельной жидкости в проточную часть для исследования влияния двухфазных потоков на колебания лопаток.

Виды экспериментов, которые позволяет проводить установка по изучению влияния потока.

Исследование явления резонанса в лопатках турбомашин:

- влияние кромочных следов;
- влияние отдельных элементов конструкции;
- влияние режима течения рабочего тела;
- исследование взаимодействия решеток различных профилей турбинных лопаток с потоком;

Исследование явления резонанса в дисках турбомашин:

- взаимодействие потока рабочего тела с облопаченным диском;

Благодаря широкому диапазону экспериментального моделирования различных аэродинамических явлений, расширяются возможности как научных исследований по НИОКР, так и повышение уровня квалификационных работ бакалавров и магистров за счет добавления в работу экспериментальных данных, полученных на этой установке.

Список литературы

[1] Повх Н. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / Повх Н. Л. – «Машиностроение», 1974. – 480 с.

[2] Самойлович Г. С. Нестационарное обтекание и аэроупругие колебания решеток турбомашин / Самойлович Г. С. – М.: 1969 – 444 с.

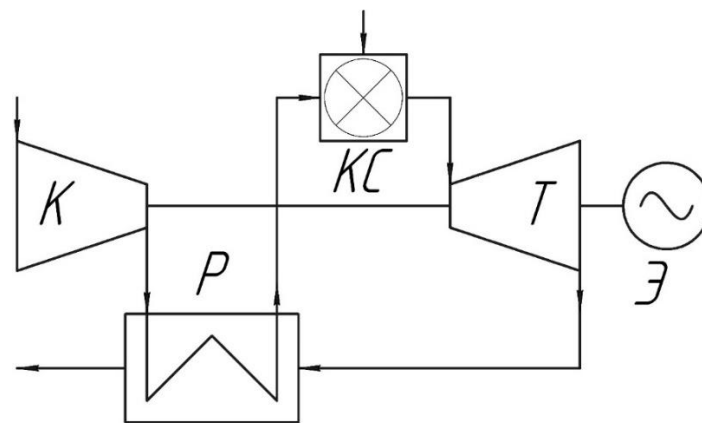
Голиков Андрей Сергеевич – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: golickov.a.s@yandex.ru

П.М. Сидоров, А.А. Жинов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ РЕГЕНИРАЦИИ ГТУ МИНИ-ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Для повышения эффективности мини-электростанции на базе существующей газотурбинной установки (ГТУ) простого цикла предлагается улучшить её термодинамический цикл путем подогрева воздуха перед камерой сгорания теплом отработавших в турбине газов. Это может быть осуществлено относительно несложной модернизацией конструкции самой рассматриваемой ГТУ, и введения в схему теплообменника-рекуператора. Схема ГТУ с рекуператором представлена на рисунке 1.



*К – компрессор; Т – турбина; Р – рекуператор;
КС – камера сгорания; Э – электрогенератор.*

Рис. 1. Схема ГТУ с рекуператором

Рассматривалась ГТУ со следующими характеристиками: мощность $N_e=200$ кВт; степень повышения давления в компрессоре $\pi_k^* = 5,818$; температура газов перед турбиной $T_3^* = 1146K$; КПД компрессора $\eta_k^* = 0,733$; КПД турбины $\eta_t^* = 0,878$; расход воздуха $G_B=1,7396$ кг/с.

Суммарное гидравлическое сопротивление в рекуператоре характеризуется коэффициентом ε [1]:

$$\varepsilon = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{1-\sigma}{\sigma} \cdot \left(\frac{\Delta p}{p} \right)_\Sigma \quad (1)$$

где k – показатель адиабаты;

σ – степень регенерации тепла в рекуператоре;

$\left(\frac{\Delta p}{p} \right)_\Sigma$ – суммарные потери полного давления в рекуператоре.

$$\left(\frac{\Delta p}{p}\right)_{\Sigma} = \frac{\Delta p_{\text{г}}}{p_{\text{г}}} + \frac{\Delta p_{\text{в}}}{p_{\text{в}}} \quad (2)$$

где $\Delta p_{\text{г}}/p_{\text{г}}$ – потери полного давления в рекуператоре по газу; $\Delta p_{\text{в}}/p_{\text{в}}$ – потери полного давления в рекуператоре по воздуху.

Величина коэффициента ε в значительной степени определяет облик рекуператора, его размеры, стоимость и увеличение общей эффективности ГТУ (уменьшение удельного расхода топлива) от введения системы регенерации тепла.

В работе определялась оптимальная степень регенерации тепла в рекуператоре при рациональном уровне гидравлического сопротивления ε .

По методике, описанной в [1], был выполнен расчёт цикла ГТУ с рекуператором при различных значениях степени регенерации (от 0 до 0,9 с шагом 0,1) и коэффициента ε (от 0 до 0,02 с шагом 0,002).

Зависимости удельного расхода топлива $C_{\text{г}}$ в ГТУ от степени регенерации σ для различных значений ε представлены на рисунке 2.

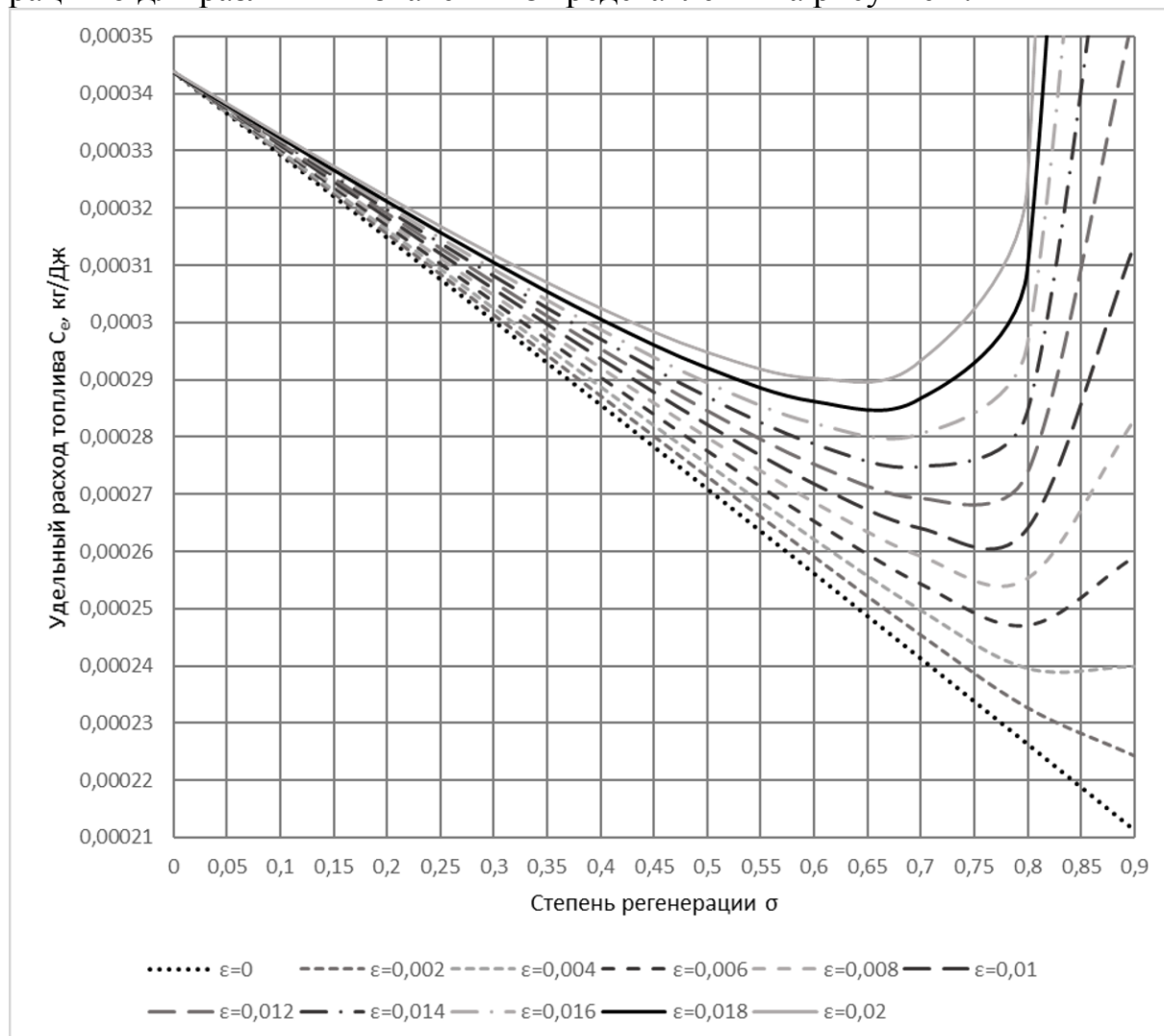


Рис. 2. Зависимости удельного расхода топлива от степени регенерации для различных значений ε

Из рисунка видно, что при значениях $\varepsilon < 0,004$ зависимость удельного расхода топлива от степени регенерации $Se(\sigma)$ не имеет экстремума и постоянное увеличение степени регенерации приводит к постоянному снижению удельного расхода топлива, но при этом размеры и стоимость рекуператора будут большими.

При более высоких значениях ε функция $Se(\sigma)$ имеет минимум в пределах исследуемого интервала значений степени регенерации. С ростом коэффициента ε минимумы удельного расхода топлива смещаются в сторону более низких значений степени регенерации, при этом размеры и стоимость рекуператора снижаются. При $\sigma > 0,75$ и $\varepsilon > 0,004$ начинается резкое увеличение удельного расхода топлива. При дальнейшем увеличении степени регенерации и $\varepsilon > 0,011$ удельный расход топлива в ГТУ с рекуператором становится выше чем у ГТУ простого цикла.

Можно сделать вывод, что степень регенерации $\sigma = 0,7 \dots 0,75$ является оптимальной для данной ГТУ, так как это позволяет получить минимальный удельный расход топлива при не слишком жёстких требованиях к суммарному гидравлическому сопротивлению рекуператора, что позволит упростить его конструкцию, повысить его технологичность и уменьшить стоимость.

Список литературы

[1] Елисеев Ю.С., Манушин Э.А., Михальцев В.Е. и др. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок М.: издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000 г.

Сидоров Пётр Михайлович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: SidorowPM@yandex.ru

Жинов Андрей Александрович – д-р техн. наук, зав. кафедрой "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru

В.Ю. Ильичев, И.С. Хахалев

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ НА ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

При проектировании турбогенератора проточная часть турбины обычно рассчитывается на номинальном режиме работы. После этого известен каждый параметр всех ступеней.

При эксплуатации турбины работают на переменных режимах, что обусловлено постоянно изменяющейся нагрузкой энергоблоков и расходов в отборах пара потребителям, изменением начальных параметров, и параметров промежуточного перегрева, износа элементов проточной части, а так же при частичном отключении, монтаже или замены элементов тепловой схемы (ПВД, ПНД, конденсатор и т.д.) Все эти критерии непосредственно влияют на параметры в ступенях турбины [1].

При изменении расхода водяного пара и отклонении термодинамических параметров от номинальных значений, располагаемые теплоперепады ступеней проточной части паровой турбины, а также отношение скоростей u/c_ϕ также изменятся. Наиболее существенное изменение происходит в ступенях, где срабатывается большая часть теплоперепада всей установки. Как правило, это регулирующие ступени в отсеке ЧВД, а также последние ступени в отсеке ЧНД [2].

Зачастую на тепловых станциях эксплуатируются паровые турбины с промышленным и теплофикационным отбором. Турбины такого типа оснащены поворотными диаграммами для регулировки отбора пара, подаваемого на промышленные нужды завода или на нужды потребителю. В таком случае турбина может работать на нерасчетных режимах, что будет сказываться на экономичности. Докажем это на примере расчёта ступени.

Рассмотрим влияние уменьшения теплоперепада в ступени на основе анализа треугольников скоростей, представленных на рис. 1. В условиях работы турбины с постоянной частотой вращения окружные скорости не меняются ($u=const$). Очевидно, что при этом уменьшается абсолютная скорость за сопловой решеткой ($c_{11}<c_1$) и возрастает отношение u/c_ϕ . Тогда новое значение относительной скорости $w_{11}<w_1$ определяет отрицательный угол атаки на входе в рабочую решетку ($\delta_1=\beta_1-\beta_{11}$) и соответствующее снижение экономичности ступени в условиях нерасчетного обтекания рабочих лопаток. При этом $w_{21}<w_2$, что изменяет значение и направление абсолютной скорости c_2 на выходе из рабочей решетки ($\delta_2=\alpha_2-\alpha_{21}$). Изменение треугольников скоростей при увеличении располагаемого теплоперепада в ступени показано на рис. 2. Здесь увеличение скорости c_{11} приводит к формированию положительного угла атаки δ_1 на входе в рабочую решет-

ку и возможному отрыву потока в области выпуклой поверхности рабочих лопаток. При этом отношение u/c_ϕ уменьшается, что сказывается на экономичности ступени паровой турбины [3].

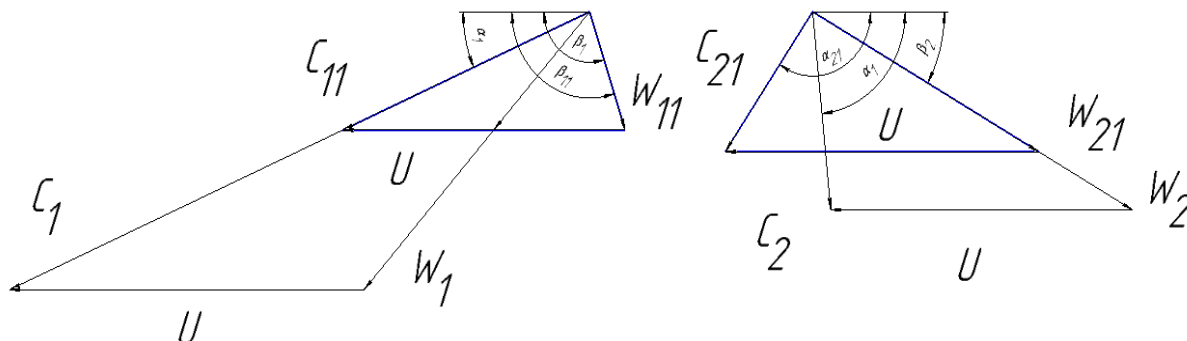


Рис. 1. Влияние уменьшения теплоперепада в ступени

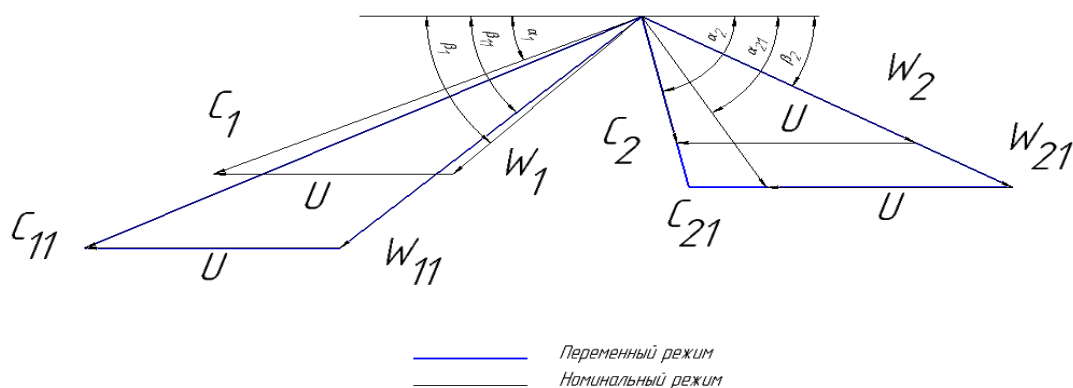


Рис. 2. Влияние увеличения теплоперепада в ступени

Одна из задач исследования работы турбины на переменном режиме - оценка изменения экономичности и надежности основных элементов паровой турбины при отклонении режима ее эксплуатации от номинального. Для этого выполняют соответствующие тепловые и прочностные расчеты при неизменных размерах сопловых и рабочих решеток ее отдельных ступеней.

На надёжность и экономичность работы турбины на переменном режиме влияют также и некоторые конструктивные особенности её проточной части, например выбранный способ регулирования подвода пара в отсеки среднего и низкого давления. Такой пароподвод чаще всего осуществляется с помощью поворотных диафрагм одним из двух способов: дроссельным или сопловым.

Механика подвода рабочего тела через поворотную регулируемую диафрагму с сопловым парораспределением заключается в том, что осуществляется последовательное открытие окон перед сегментами сопел. Такой вид подвода характеризуется значительной неравномерностью параметров потока пара в окружном направлении и в пределах каждого сегмен-

та, а также при переходе от одного сегмента к другому. Это создает неблагоприятные условия работы лопаточного аппарата ступени. При этом в окружном направлении наблюдается сильное изменение теплоперепада в сопловом аппарате, а также изменение углов атаки рабочего колеса. Эти возмущения вызывают дополнительные потери энергии и переменные нагрузки, действующие на рабочие лопатки [4].

При дроссельном парораспределении поворотной диафрагмы подвод рабочего тела осуществляется одновременно через все сопловые сегменты. Таким образом, поля температур и давлений по окружности выравниваются значительно лучше, что приводит к снижению амплитуды переменных усилий на лопатки при работе турбины на переменном режиме.

Необходимо учитывать, что в частично открытых регулирующих окнах больше потери на дросселирование, чем при сопловом выполнении поворотной диафрагмы, где дросселирование не происходит в окнах, которые уже полностью открыты.

В связи с этим, наряду с учётом всех факторов, влияющих на работу турбины на переменном режиме, необходимо более подробное сравнение преимуществ и недостатков двух типов парораспределения в поворотных диафрагмах при работе на переменных режимах. Планируется произвести такое исследование на примере турбин, работающих в настоящее время на электростанциях.

Список литературы

[1] Бененсон Е.И., Иоффе Л.С. – Теплофикационные паровые турбины - М.: Энергоатомиздат. - 1986 г. – С. 88-127.

[2] Доброумов Л.А. Телякова Т.В. Паротурбинные установки для ТЭС и АЭС. - М.: Энергоатомиздат. - 1995 г. – С. 189-197.

[3] Щегляев А.В. Паровые турбины. Т.2. Теория теплового процесса и конструкции турбин – М.: Энергоатомиздат. – 1993 г. – 127 с.

[4] Жуков В.С., Иванов С.Н., Осипенко Е.В., Березин А.Р. Поворотная регулирующая диафрагма паровой турбины – патент – 2004 г.

Ильичев Владимир Юрьевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: patrol8@yandex.ru

Хахалев Игорь Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: patrol8@yandex.ru

В.А. Богов, Н.В. Гридчин

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОНАПОРНЫХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В современных высокотемпературных газовых турбинах в качестве первых охлаждаемых ступеней часто применяются высоконагруженные турбинные ступени. Использование таких ступеней является комплексной задачей, поскольку уменьшение числа ступеней с одной стороны позволяет уменьшить стоимость установки, повысит надежность, сэкономят охлаждающий воздух и т.д., но с другой стороны может приводить к уменьшению газодинамической эффективности, т.е. к уменьшению КПД турбины [1].

Поэтому улучшение работы таких ступеней в наибольшей степени будет влиять на повышение эффективности работы всей установки.

Для обеспечения высокой надёжности, ресурса и повышения КПД высоконапорных нагруженных ступеней необходимо вести разработки в следующих направлениях:

- разработка сложных систем охлаждения лопаток, для обеспечения внутреннего струйного и внешнего плёночного охлаждения с целью работы лопаток при высоких температурах и повышения их ресурса;
- разработка барьерных покрытий на основе безуглеродистых жаропрочных никелевых сплавов [2];
- применение градиентного принципа нанесения покрытий, согласно которому тип покрытия на отдельном участке пера лопатки выбирается по его температурному и напряжённому состоянию;
- разработка методов снижения возбуждающих сил, действующих на рабочие лопатки, с целью избегания их вибрационного разрушения;
- оптимизация лопаточных решёток с применением современных вычислительных мощностей и численных методов исследования;
- усовершенствование методик профилирования рабочих и сопловых лопаток ТВД, с целью снижения профильных потерь;
- снижение потерь, связанных с выпуском охлаждающего воздуха в проточную часть [3];
- увеличение КПД ТВД за счёт увеличения температуры воздуха на входе в турбину;
- разработка методов охлаждения дисков ТВД;
- упрощение доступа к лопаточному аппарату для его диагностики и быстрой замены повреждённых лопаток, путём горизонтального разёма ТВД.

В современных установках повышение температуры и давления газа на входе в турбину привело к необходимости использования охлаждения

лопаток. Применение охлаждения, в свою очередь может привести к уменьшению газодинамической эффективности, и, следовательно, к уменьшению КПД турбины. Поэтому разработка методик повышения экономичности охлаждаемых высоконагруженных турбин является актуальной задачей [4,5].

Так же следует отметить, что течение газа в межлопаточных каналах высоконапорных турбин обладает рядом особенностей, которые необходимо учитывать при их проектировании:

- работа ступеней в трансзвуковом диапазоне скоростей, характеризующаяся появлением в межлопаточных каналах местных сверхзвуковых зон и скачков уплотнения, которые могут вызывать отрывы потока;
- увеличение потерь в межлопаточных каналах, в следствие усложнения структуры потока при работе на трансзвуковых режимах;
- дополнительные потери, вызванные изменением структуры пристенных течений из-за выдува охлаждающего воздуха через ряды отверстий на поверхности сопловых и рабочих лопаток;
- большая чувствительность трансзвукового потока к незначительным изменениям формы венцов и условиям работы;
- необходимость в точном определении расхода газа, во избежание погрешностей при определении характеристик турбины и распределению параметров по ступеням;
- утолщение профиля и в особенности входных и выходных кромок, вследствие применения охлаждения;
- относительно высокая степень реактивности для увеличения конфузности межлопаточных каналов и снижения потерь;
- относительно высокая закрутка потока и высокие скорости на выходе из турбины.

Для минимизации потерь в ступенях высоконапорных газовых турбин разрабатывались различные методики проектирования плоских решёток и пространственных венцов (метод сопряжения дуг окружностей и гиперболических спиралей, а также лемнискат Бернулли, метод характеристик для формирования спинки в косом срезе при сверхзвуковых скоростях на выходе и так далее), однако данные методики предназначались в основном для неохлаждаемых лопаток с тонкими выходными кромками.

Профилирование решёток с профилями, имеющими толстые выходные кромки потребовали применения новых подходов, в частности, метода доминирующей кривизны и метода локальной аппроксимации.

В настоящее время при проектировании высоконапорных турбин особое внимание следует уделять особенностям профилирования лопаточных решёток. Усовершенствование приведённых выше методов профилирования и их совокупное применение с численным объёмным проектированием с помощью ЭВМ позволит в дальнейшем увеличить газодинамическую эффективность и КПД высоконапорных нагруженных ступеней турбоустановок.

Список литературы

[1] Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели – ОАО «Авиадвигатель» – 2006 г. – С.368–376.

[2] Каблов Е.Н., Мубояджян С. А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД. – ВИАМ. – 2011 г. – №1. – С.5–7.

[3] Венедиктов В.Д. Газодинамика охлаждаемых турбин. – Машиностроение. – 1990 г. – С.11–21.

[4] Грановский А. В. Разработка методов повышения газодинамической эффективности высоконагруженных ступеней охлаждаемых газовых турбин – ОАО «Авиадвигатель» – 2011 г. – С.3–26.

[5] Грановский А. В. Разработка методов повышения газодинамической эффективности высоконагруженных ступеней охлаждаемых газовых турбин. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / ГОУВПО "Московский энергетический институт (технический университет)". Москва, 2011.

Богов Виктор Алексеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: bogov.viktor@yandex.ru

Гридчин Николай Викторович – ст. преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gridchin2610@gmail.com

Ф.Г. Завальный, Н.В. Гридчин

ПАССИВНЫЕ СИСТЕМЫ ВИБРОГАШЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Снижение передачи вибрации через компенсаторы трубопроводов большого диаметра и под высоким давлением является сложной проблемой, особенно актуальной в условиях крайнего севера, где вибрационные возмущения, переданные на фундамент, могут привести к ползучести грунта. Взаимное перемещение опор, как следствие ползучести, может вызвать разрушение трубопровода, компенсаторов и поломку агрегата.

Компенсатор трубопровода – устройство, которое позволяет воспринимать и компенсировать движения трубопровода при прохождении различных сред внутри труб, компенсировать тепловое расширение вследствие нагрева рабочей средой стенок трубопровода, гасить вибрацию, принимая на себя смещение труб при оседании почв и опор трубопровода.

Для большинства резинометаллических виброизоляторов вибрационная жесткость превышает статическую в два – три раза и несколько увеличивается с ростом частоты до частот порядка сотен Гц, где уже начинаются волновые явления в упругом материале амортизатора. При этом в большинстве случаев на этот рост сильное влияние оказывает наличие рабочей среды внутри компенсатора.

Вибрационные жесткости углового компенсатора с водой показаны на рисунке 1. С увеличением частоты деформирования переходная вибрационная жесткость увеличивается на три порядка – от 0,1 Тс/см (1 кН/м) на частотах ниже 10 Гц до 10 Тс/см (100 кН/м) на частотах выше 75 Гц.

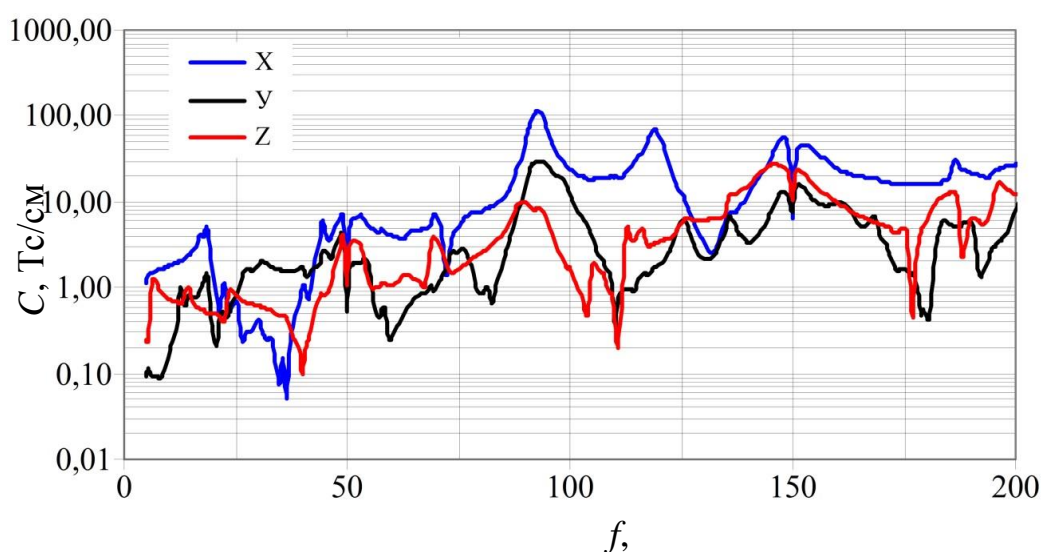


Рис. 1. Переходные вибрационные жесткости углового компенсатора рукавного типа Ду 150 мм с водой в трех направлениях при давлении 10Мпа

Пульсации давления, действуя на поверхности компенсатора и трубопровода, порождают динамические усилия. Известно, что наибольшей эффективностью обладает источник пульсаций давления объемного типа – монополь [1-4]. Источником вибрации объемного типа являются деформируемые полости РКО компенсатора (рисунок 2-4). При их заполнении воздухом вместо воды жесткость компенсатора уменьшилась на два порядка. Возможны и другие механизмы взаимодействия жидкости и структуры при вибрационном деформировании компенсаторов. Это, например, резонансы масс жидкости на жесткости упругих элементов.

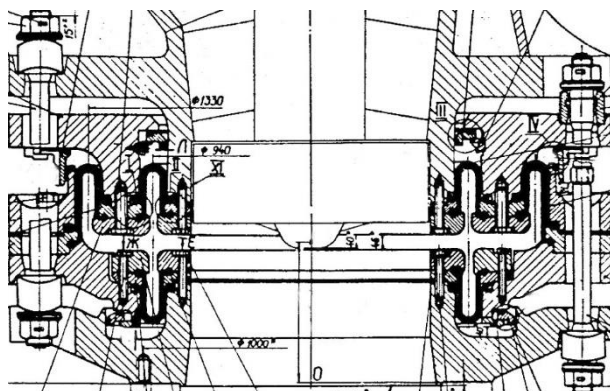


Рис.2. Поперечный разрез компенсатора высокого давления на основе РКО диафрагменного типа

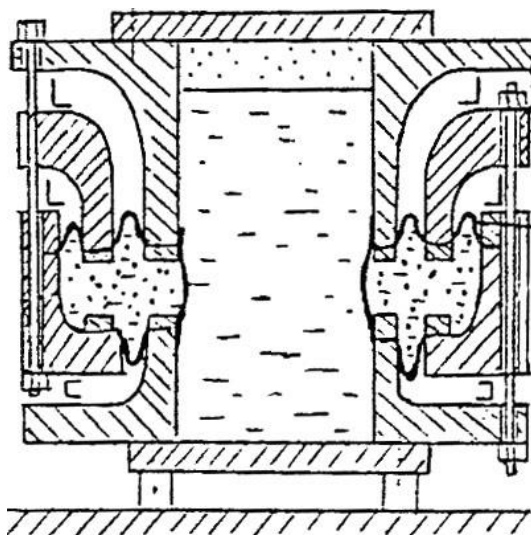


Рис. 3. Схема испытаний компенсатора высокого давления на основе РКО диафрагменного типа с воздухом в кордах

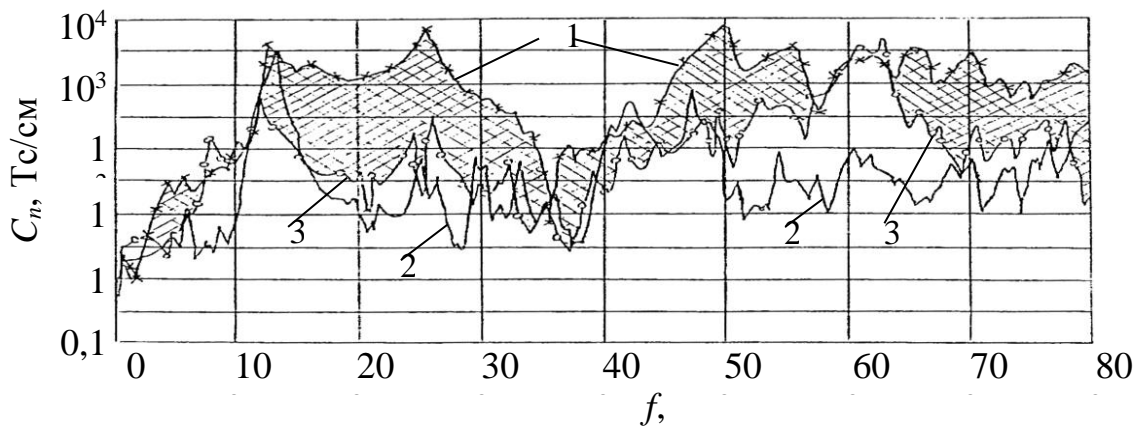


Рис. 4. Результаты определения осевой вибрационной переходной жесткости: 1 – вода, 2 – воздух, 3 – воздух в кордах

Структурные резонансы на низких и средних частотах возможно снизить путем уменьшения линейных размеров компенсатора и его упругих элементов вдоль оси трубопровода. Влияние пульсации давления объемного типа возможно уменьшить путем исключения локальных полостей с жидкостью в конструкции компенсатора. Идеальный вариант - чтобы в компенсаторе присутствовали бы только сдвиговые деформации, при которых минимальны возникающие пульсации рабочей среды.

С целью проверки эффективности этих предложений в МНИЛ «Турбоконт» были спроектированы и изготовлены компенсаторы на основе плоских кольцевых тонкослойных резинометаллических элементов (ТРМЭ) (рисунок 5) [5].

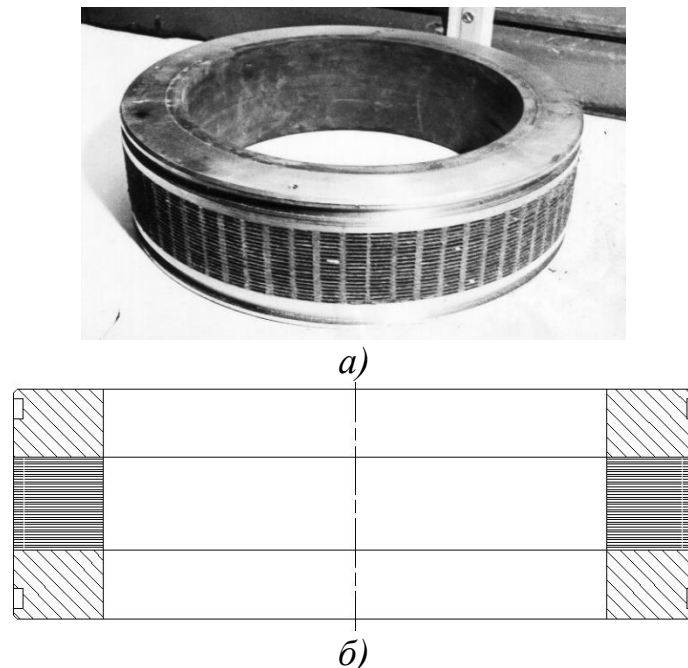


Рис. 5. Компенсаторы на основе плоских кольцевых тонкослойных резинометаллических элементов:
 а) внешний вид б) поперечный разрез плоского кольцевого ТРМЭ

Плоский кольцевой ТРМЭ состоит из двух кольцевых фланцев, которыми он соединяется с трубопроводами, и слоеного набора чередующихся плоских тонких колец резина- металл, расположенных между фланцами и скрепленных между собой клеем или вулканизацией. При этом толщина резиновых слоев существенно меньше их ширины. В результате этого осевая жесткость ТРМЭ, определяемая объемным модулем жесткости резины, оказывается на три порядка выше поперечной, определяемой сдвиговой жесткостью слоев резины. Такой компенсатор работает только на сдвиг, имеет очень малые размеры вдоль оси, его структурные резонансы расположены на высоких частотах и хорошо задемпфированы резиной.

Сравнение вибрационной жесткости компенсаторов Ду 750 мм с ТРМЭ (1,2) и компенсатора на основе РКО (3) представлено на рисунке 6.

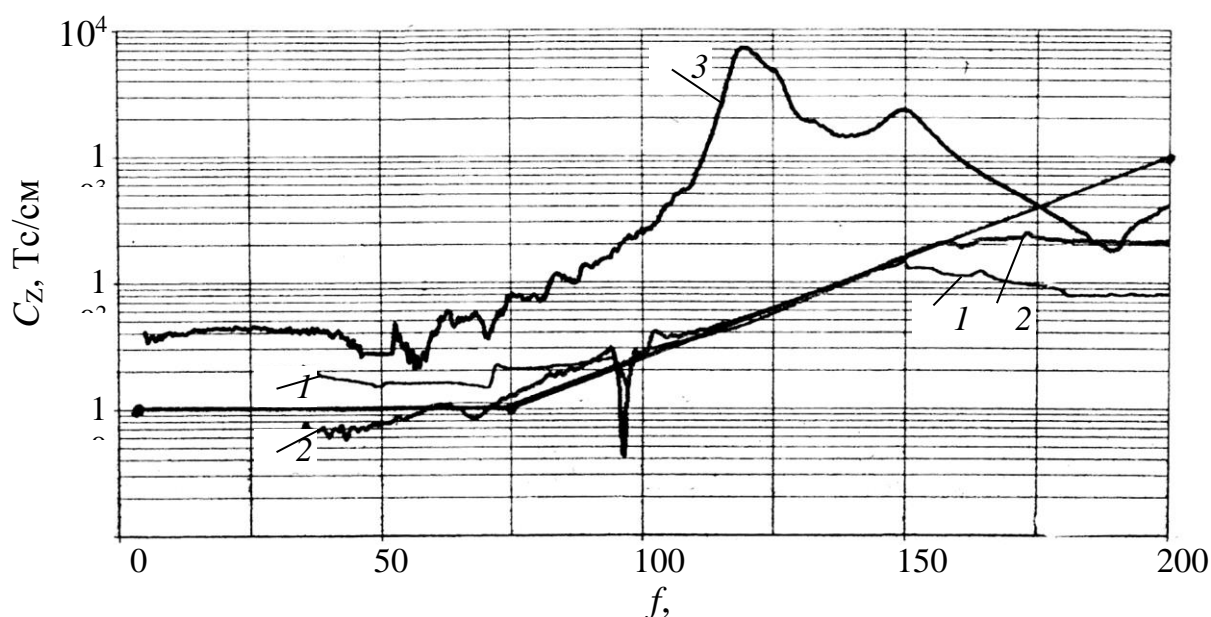


Рис. 6. Сравнение вибрационной жесткости компенсаторов Ду 750 мм с ТРМЭ (1,2) и компенсатора на основе РКО (3) в диапазоне частот 0- 200

Гц при давлении воды 1,0 МПа:

- 1 – ПК-Б поперечное направление, 2 – ПК-Б осевое направление,
3 – ПК-10 осевое направление

Таким образом, на основе расчетно-экспериментальных исследований влияния различных факторов, таких, как жесткость компенсатора, граничные условия в трубопроводе, наличия податливых элементов в жидкости и податливости стенок компенсатора на величину пульсации позволят провести разработку и проверку принципов создания конструкций развязок с минимальной связанностью вибрации фланцев и пульсаций давления и снизить передачу вибрации по ним в десять и более раз в широком диапазоне частот.

Список литературы

- [1] Лайтхилл Дж, Волны в жидкостях, М, Мир, 1981.
- [2] Хекла М., Х.Мюллера, Л. Справочник по технической акустике // Судостроение. 1980. 440 с.
- [3] Кирюхин А.В., Тихонов В.А., Чистяков А.Г., Яблонский В.В.. Активная виброзащита, назначение, принципы, состояние. 2. История разработок и состояние // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. №3. с.63-69.
- [4] Компенсатор для трубопровода: виды, производители, описание: [сайт]. URL: <http://fb.ru/article/219085/kompensator-dlya-truboprovoda-vidyi-proizvoditeli-opisanie-i-otzyivyi-kompensatoryi-dlya-truboprovodov-iz-polipropilena> (дата обращения 10.10.2017).
- [5] Kiryukhin A.V., Milman O.O., Ptakhin A.V. A search for the physical principles of improving the power unit pipeline expansion joint with fluid vibro-isolating properties // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Т. 11. № 23. С. 11176-11183.

Завальный Федор Геннадьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fedor.zavalnyj1995@gmail.com

Гридчин Николай Викторович – ст. преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gridchin2610@gmail.com

Е.А. Юрик, Д.С. Таганов

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И РЕМОНТА ЭЛЕМЕНТОВ ТУРБИНЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

К основным элементам паровой турбины относятся лопатки, роторы, и корпуса. Для их изготовления применяется ряд технологических методов. В данной статье представлены прогрессивные методы производства элементов паровой турбины.

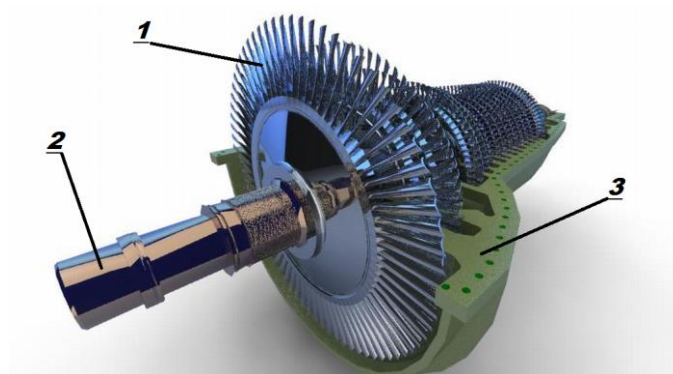


Рис.1 Элементы паровой турбины: 1-лопатки, 2- ротор, 3-корпус

Технологический процесс изготовления лопаток можно условно разделить на два этапа:

- 1) отливка монокристаллической бесприпусковой (по перу лопатки) исходной заготовки по выплавляемым моделям;
- 2) механическая обработка лопаток турбины.

Наибольший интерес представляет механическая обработка лопаток.

На рисунке 2 представлена последовательность изготовления исходной заготовки и ее механическая обработка, которые обеспечивают главную задачу – выполнение показателей качества [1].

Одним из перспективных способов изготовления лопаток турбин является способ с использованием пластической деформации. Он заключается в том, что изготовление турбинных лопаток, содержащих перо и хвостовик, осуществляют путем получения литьем заготовки по форме турбинной лопатки из сплава на основе гамма-алюминиды титана с добавками в пределах 0,5-8 атомных процентов. Затем заготовку подвергают горячему изостатическому прессованию. Проводят горячую пластическую деформацию хвостовика и бандажной пластины с образованием материала с мелкозернистой структурой. Осуществляют термообработку, по меньшей мере, части литой заготовки при температуре 1200°C-1400°C. Горячую пластическую деформацию ведут в заданном диапазоне температур и скорости деформации. Для этого возможно использовать ковочный пресс. Перед горячей пластической деформацией и термообработкой проводят гомогенизацию при заданной температуре. [4]



Рис.2 Технологический процесс обработки лопатки турбины

Ротор является наиболее ответственной частью турбины. В условиях эксплуатации турбины ротор подвергается действию центробежных сил, крутящего и изгибающего моментов, растягивающих осевых сил и нагрузки от собственного веса [2].

Типовой технологический маршрут обработки роторов [3].

- проверка поковки для определения размеров припусков на обработку и разметка центровых отверстий (гнезд или центров);
 - обработка центровых отверстий;
 - обдирка поковки с припуском по 15-20 мм на сторону;
 - сверление и предварительная расточка центрального отверстия с припуском 15-20 мм на диаметр;
 - термическая обработка для повышения механических свойств с последующим высоким отпусканием для снятия внутренних напряжений.
- Основными этапами чистовой обработки ротора являются:
- точение с припуском 0,5-0,6 мм на диаметр;

- травление поверхностей опорных шеек и торцов для выявления флокенов и снятие серных отпечатков;
- предварительное шлифование;
- окончательное шлифование;
- фрезерование шпоночных пазов;
- обработка пароразгрузочных отверстий.

Для изготовления сварно-литых корпусов конструкторским бюро завода выпускаются сборочный чертеж и комплект детальных чертежей. По детальным чертежам производятся отливка и механическая обработка деталей под сварку, по сборочному чертежу – сборка, сварка и окончательная механическая обработка корпуса.

Типовая схема этапов окончательной обработки корпусов:

1. Очистка после термической обработки (обычно дробеструйная).
2. Обработка базовых поверхностей и плоскостей горизонтальных разъемов.
3. Разметка под обработку отверстий на фланцах горизонтальных разъемов.
4. Сверление и нарезание отверстий на разъемах.
5. Сборка верхней и нижней половин под растачивание.
6. Растачивание.
7. Разметка под растачивание.
8. Разметка под обработку всех мелких площадок и фланцев.
9. Обработка на расточных станках всех площадок и фланцев.
10. Разметка под сверление отверстий на площадках и фланцах.
11. Сверление и нарезание отверстий 24.
12. Гидравлические испытания.

На ряду с производством элементов турбины важное значение имеет технология их ремонта:

Ремонт корпуса. Коробление из-за термических напряжений, трещины, свищи и коррозионные разрушения – основные дефекты корпусов турбин. Трещины, свищи и коррозионные разрушения устраняются сваркой и наплавкой. Сварочные работы должны проводиться до пригонки плоскостей разъема корпуса. В процессе сварки принимаются меры для снижения остаточных напряжений и деформаций.

Коробление корпуса в плоскостях разъема при зазорах до 0,15 мм устраняется шабрением. При значительных короблениях до 2 мм плоскости разъема шлифуют или фрезеруют (строгают). Для обработки в судовых условиях используют переносные фрезерные станки. Окончательная пригонка плоскостей производится шабрением при точности пригонки не менее 2 пятен на 1 см². Щуп толщиной 0,05 мм не должен проходить в плоскость разъема корпуса и крышки.

1. Ремонт роторов. Дефекты роторов: износы, задиры и риски на опорных шейках, ослабление посадки дисков, прогиб оси ротора и трещины. Роторы с трещинами заменяют. Износы шеек устраняют шлифовани-

ем. Уменьшение диаметра шеек вала допускается не более 0,5% построечного значения. Деформации ротора могут устраняться при стрелках прогиба соответственно: до 0,12 мм – проточкой, до 0,2 мм – механической правкой (в том числе односторонним наклепом с вогнутой стороны), до 0,4 мм – термической правкой с односторонним нагревом и свыше 0,4 мм – термомеханической правкой.

2. Замена лопаток дисков турбин. Технология замены лопаток зависит от конструкции диска и способа посадки лопаток. В процессе замены лопаток обрубает кромки шипов и снимают бандажную ленту. Удаляют (отпаивают) связующую проволоку. Высверливают замок и выбивают лопатки. Подготовленные новые лопатки взвешивают, распределяют в зависимости от массы по пакетам набора и маркируют. Составляется схема набора лопаток, которая учитывает условия балансировки: лопатки одинаковой массы должны находиться на противоположных радиусах диска. Набор лопаток начинается со стороны, противоположной замку, в обе стороны одновременно. Лопатки и промежуточные тела должны входить в паз от легких ударов молотка массой до 500 г. После полного набора лопаток вновь проверяют их положение в диске. Затем протягивают связующую проволоку и окончательно регулируют положение лопаток. После этого подгоняют и заделывают замок. Далее по шипам лопаток размечается бандажная калиброванная стальная лента. В заключение производится расклепывание шипов.

Таким образом, современные методы изготовления элементов паровой турбины должны быть направлены на снижение себестоимости их получения, применение новых материалов, использование высокопроизводительного оборудования. Ремонт элементов турбины должен продлевать ресурс их работы и снижать потребность в новых деталях.

Список литературы

[1] Демин Ф.И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей [Электронный ресурс] : [учебник] / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев; под. общ. ред. проф. Ф. И. Демина. – 2-е изд. – Самара: Изд-во СГАУ, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

[2] Новиков В.А. Технология производства и монтажа паровых и газовых турбин Учебное пособие. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. - 670 с.

[3] Н.Я. Бауман, М.И. Яковлев, И.Н. Сверчков. Технология производства паровых и газовых турбин. Москва, "Машиностроение", 1973.

[4] Гонсеровский Ф.Г., Силевич В.М. Техничко-экономическое обоснование способа ремонта эрозионно-изношенных паротурбинных лопаток в условиях электростанций // Тяжелое машиностроение. 2001.

Юрик Елена Алексеевна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. аумана. E-mail: ea_yurik@gmail.ru

Таганов Дмитрий Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dimbos404@yandex.ru

П.М. Сидоров, Д.В. Шевелёв

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫСОКОНАПОРНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Компрессор – это один из самых важных и технически сложных элементов газотурбинной установки. Эффективность компрессора оказывает существенное влияние на КПД двигателя и, следовательно, на его экономичность. В частности, ухудшение КПД компрессора на 1% приводит к увеличению удельного расхода топлива примерно на 1% [1]. Кроме того, КПД компрессора оказывает влияние на массогабаритные характеристики двигателя, так как от его значения зависит удельная мощность двигателя, а, следовательно, и потребный расход воздуха. Снижение массы двигателя также достигается путём уменьшения его осевых габаритов и сокращения составляющих элементов за счёт применения высоконапорных центробежных ступеней. Увеличение напора приводит к росту общей аэродинамической нагруженности ступени компрессора и снижению его КПД. Учитывая это, актуальной является задача повышения эффективности высоконапорных центробежных компрессоров.

Традиционные методики расчёта и профилирования ступени центробежного компрессора, разработанные в рамках представлений господствующих в середине прошлого века, например [1, 2, 3], не позволяют добиться КПД высоконапорной ступени выше 0,76...0,81. Причем большие значения соответствуют ступеням с колёсами закрытого типа. Но такие колёса сложны в изготовлении и по соображениям прочности имеют ограничения по окружной скорости, что приводит или к уменьшению их напорности или повышению радиальных габаритов.

В настоящее время в авиационном моторостроении есть опыт создания высоконапорных центробежных ступеней со степенью повышения полного давления $\pi_k^* = 6 \dots 10$ и высоким уровнем КПД $\eta_k^* = 0,8 \dots 0,82$ [4-6].

Такие параметры получены благодаря значительным успехам достигнутым в последнее время в области создания высокопроизводительных вычислительных систем и численного моделирования газодинамических процессов в CFD пакетах ANSYS-CFX, Fluent, Flowvision и т.п.

Все это позволяет без проведения дорогостоящих и продолжительных натурных экспериментов адекватно исследовать сложные процессы в проточной части центробежных компрессоров, и, тем самым сокращать время их доводки.

В работе [4] описываются особенности конструкции высоконапорной центробежной компрессорной ступени с параметрами $\pi_k^* = 7,5$, $G = 30$ кг/с. К таким особенностям авторы относят:

1) Применение поворотного входного направляющего аппарата (ВНА), обеспечивающего предварительную закрутку потока перед рабочими лопатками, с целью снижения относительной скорости потока на входе в рабочее колесо, т.к. течение на входе может быть сверхзвуковым, что приведёт к дополнительным потерям энергии. Дополнительными функциями поворотного ВНА также являются снижение мощности компрессора на режимах запуска и возможная оптимальная настройка компрессора на основных рабочих режимах;

2) Составное рабочее колесо, включающее осевую и радиальную части. Для минимизации потерь радиальная часть центробежного колеса выполнена с окружным смещением относительно осевой части. Взаимное проникновение лопаточных венцов в межлопаточные каналы локально увеличивает густоту решетки в месте стыка дисков, что положительно воздействует на поток, уменьшая интенсивность отрывных явлений в периферийной части выходной кромки осевой лопатки. Составная конструкция колеса также позволяет использовать различные материалы для осевой и радиальной частей рабочего колеса.

Адиабатический КПД ступени такой конструкции $\eta_k^* = 0,83$. Для сравнения можно отметить, что типовой стационарный компрессор К-905-62-1 (разработка НЗЛ) на близкие аэродинамические параметры имеет 6 ступеней и $\eta_k^* = 0,7$ [7].

Для быстрого и достоверного определения характеристик компрессоров и их конструирования профессор СПбПУ Ю.Б. Галёркин создал метод оптимального газодинамического проектирования, который является результатом обобщения и анализа большого объема экспериментальных данных, накопленных в СПбПУ. Комплекс соответствующих компьютерных программ получил название Метода универсального моделирования (МУМ) [8]. В статье [9] описывается применение этого метода для оптимизации ступени ЦБК с параметрами: условный коэффициент расхода $\Phi = 0,105$; коэффициент теоретического напора $\Psi_T = 0,56$; число Маха $M_u = 0,7$; число Рейнольдса $Re_u = 5600000$.

Согласно МУМ сначала определяется оптимальное число лопаток рабочего колеса. Меньшее число лопаток требует увеличения выходного угла $\beta_{л2}$ из-за роста нагрузки [8], следствие этого – увеличение диффузорности и более ранний отрыв пограничного слоя, что приводит к росту потерь энергии. Больше число лопаток приводит к росту площади обтекаемой поверхности и, следовательно, росту потерь на трение. Далее оптимизируется относительный диаметр входа в рабочее колесо из условия минимальной скорости на входе в межлопаточные каналы у покрывного диска. Затем сопоставляются варианты с различным положением входной кромки (потери на трение растут по мере приближения положения входной кромки

ки лопатки к началу рабочего колеса [9]). В результате этой оптимизации был достигнут КПД ступени – 86,2%.

В работе [10], описывается промышленно-исследовательский проект немецких и швейцарских производителей турбокомпрессоров. Целью проекта было проектирование и исследование высоконапорного центробежного компрессора с трансзвуковой скоростью потока на входе (степень повышения давления $\pi_k = 6,1$; число Маха на входе $M_{w1} = 1,3$). В ходе этого проекта были проведены обширные лазерные измерения поля скоростей вдоль межлопаточного канала, которые показали наличие зоны отрыва и обратного тока на выходе из рабочего колеса из-за слишком большого замедления потока. Это явление было полностью устранено, благодаря уменьшению площади выходного сечения межлопаточного канала на 15% и применению новой конструкции лопаток полученной в результате CFD-расчёта. Спроектированный компрессор имеет КПД 84%.

В исследовании [11] был проанализирован эффект внутренней утечки тепла через крыльчатку и корпус, а также его влияние на эффективность и надёжность высоконапорного центробежного компрессора при различных степенях повышения давления. Эффективность компрессора определялась при помощи CFD-расчёта. В результате исследований было установлено, что внутренняя утечка тепла уменьшает максимальную степень повышения давления в компрессоре π_k^* , однако, при $\pi_k^* < 5$ её влияние почти не сказывается. Внутренний теплообмен снижает эффективность компрессора, причём его влияние на КПД экспоненциально возрастает с увеличением π_k^* и для $\pi_k^* > 5$ его необходимо учитывать (при $\pi_k^* = 11$ КПД снижается на 2,5%). Между тем, передача тепла внутри рабочего колеса из горячей области в холодную эффективно снижает его максимальную температуру. Обычные симуляции часто пренебрегают этим, в следствии чего завышают значения этой температуры. Утечки тепла через корпус компрессора мало влияют на температуру рабочего колеса. Влияние теплообмена внутри крыльчатки должно учитываться при разработке компрессоров с $\pi_k^* > 5$.

Приведённый выше обзор публикаций, посвящённых тематике высоконапорных ступеней ЦБК свидетельствует о том, что создание высоконапорной центробежной ступени (с высоким уровнем адиабатического КПД) для энергетических установок возможно. Ясно, что для разработки методики расчёта и профилирования такой ступени потребуется большая дополнительная работа.

Список литературы

- [1] Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 612 с.
- [2] Бекнев В.С., Куфтов А.Ф., Тумашев Р.Э. Расчет и проектирование центробежных компрессоров ГТД. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. – 44 с.
- [3] Ден Г.Н. Проектирование проточной части центробежных компрессоров: Термогазодинамические расчёты. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. – 232 с.
- [4] Ануров Ю.М., Пеганов А.Ю., Шаляев Д.В. Особенности проектирования высоконапорного центробежного компрессора для стационарных установок // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №3/10 (51). – С. 12-16.
- [5] Созонов А.И. Конструкция и основы эксплуатации авиационных двигателей: конспект лекций. – Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2011. – 78 с.
- [6] Барышева Е.С., Бойко Л.Г., Дрынов О.Н., Кубакин В.В. Газодинамическое совершенствование высоконапорной центробежной ступени современного авиационного двигателя // Вестник двигателестроения. – 2010. - №2. – С. 86-90.
- [7] Каталог: компрессорные машины и турбины АООТ «Невский завод». – СПб.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 2000. – 160 с.
- [8] Галеркин Ю.Б. Турбокомпрессоры. Рабочий процесс, расчет и проектирование проточной части. – М.: ООО «Информационно издательский центр «КХТ», 2010. – 596 с.
- [9] Галеркин Ю.Б., Дроздов А.А. Оптимизация центробежной компрессорной ступени с осерадиальным рабочим колесом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2015. - №4(231). – С. 179-188.
- [10] Hartmut Krain, Franz-Arno Richter, Valentin Tiede Investigations of the Flow Through a High Pressure Ratio Centrifugal Impeller // материалы конференции «ASME Turbo Expo 2002» 3-6 июня, Амстердам, Нидерланды.
- [11] S. Mostafa Moosania, Xinqian Zheng Effect of internal heat leakage on the performance of a high pressure ratio centrifugal compressor // Applied Thermal Engineering. – 2017. - №111. – С. 317-324.

Сидоров Павел Михайлович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: SidorowPawel95@yandex.ru

Шевелев Денис Владимирович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

Я.А. Сафронова, А.А. Сидоров

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ (ЧНД) ТУРБИНЫ С ОТОПИТЕЛЬНЫМ ОТБОРОМ ПАРА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Современные теплоэлектростанции (ТЭС) служат для снабжения внешних потребителей теплом и электроэнергией. Основное оборудование ТЭС состоит из турбоагрегатов, в которых паровая турбина имеет регулируемые отборы пара. Такие установки в широком диапазоне режимов решают указанную задачу. Для примера на рис.1 на общем виде турбины с отопительным отбором пара показана ее проточная часть.

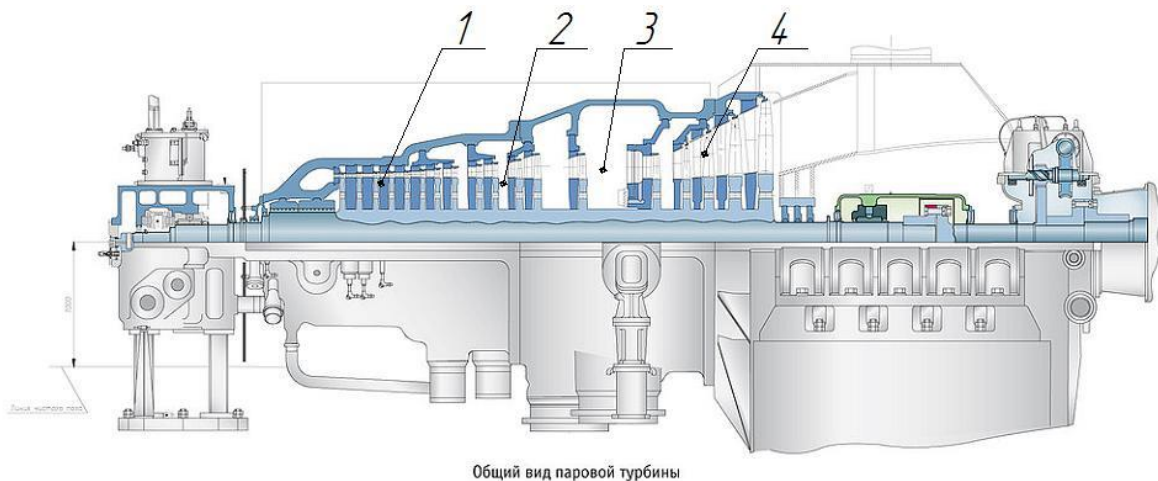


Рис.1 Общий вид турбины. 1 - часть высокого давления (ЧВД),
2 – часть среднего давления (ЧСД), 3 – камера отбора,
4 – часть низкого давления (ЧНД)

На схеме видно, что отбор делит проточную часть турбины на две части – одна часть до отбора и вторая часть, которую называют частью низкого давления (ЧНД), после отбора. Очевидно, что при работе по тепловому графику будет наблюдаться определенная особенность в работе ЧНД. Например, переход от режима с полным отопительным отбором пара, который условно назовем «зима» к режиму «лето», когда отбор существенно сокращается, сопровождается тем, что через ступени части низкого давления протекает разное количество пара. Очевидно, что КПД ЧНД турбины в этих случаях будет также разным. Абсолютные величины КПД будут определяться мерой отклонения расхода пара через ступени ЧНД от расхода, при котором определялась геометрия лопаток этих ступеней. Назовем этот расход оптимальным или расчетным. Возникает естественный вопрос – что такое расчетный расход пара через ЧНД? На этот вопрос ответить

просто, если заранее знать на каком режиме в основном будет эксплуатироваться турбина, работая по тепловому графику. Иначе обстоит дело, если тепловой график изменяется во времени.

На этот счет в ранее опубликованной технической литературе [1,2,3] существуют разные предложения. Например, в [1] рекомендуют проектировать ступени ЧНД при расходе равном 80% от максимального расхода при верхнем значении давления в отборе. В [2] другая рекомендация – 65% от максимального расхода. В [3] назван конденсационный режим работы турбины с максимальной мощностью. Такое разнообразие мнений по данному вопросу в настоящее время нельзя считать нормальным, так как назначение расчетного расхода определяет геометрию проточной части низкого давления (высоту лопаток), а это уже конструкция, которая в свою очередь определяет эффективность работы турбины.

Для дальнейшего анализа вопроса рассмотрим работу ЧНД теплофикационной турбины Т – 48/62 – 7,4/0,12, работающей в составе ПГУ. Номинальная электрическая мощность турбины 48 МВт, максимальная – 62 МВт, отбор пара на тепловое потребление 36 т/ч, частота вращения 50 с⁻¹. Все последующие расчеты проведены, ориентируясь на номинальную (полную) мощность турбины. В общем случае турбина может иметь множество режимов по отбору пара, причем каждому из них соответствует вполне конкретный пропуск пара в конденсатор (в ЧНД). Выделим из них два характерных режима работы турбины по тепловому графику, о которых сказано выше: режим с минимальным пропуском пара в ЧНД (в конденсатор) – режим «зима» и режим «лето». Отметим, что второй режим также требует повышения давления в камере отбора. Будем в дальнейшем называть его конденсационным режимом с полной мощностью. Оба режима иллюстрируются с помощью диаграммы режимов [1, 6]. Так как расчетные характеристики турбины известны, определим величины расходов в конденсатор на данных режимах. Для этой цели используем формулы, приведенные в работе [1]. Результаты расчетов:

1. Расход пара в конденсатор на режиме «зима» - 19,4 кг/с,
2. Расход пара в конденсатор на режиме «лето» - 41 кг/с.

Поиск расчетного расхода пара в ЧНД проведем по следующему плану: выполним расчет геометрии решеток ступеней ЧНД при разных расходах пара в конденсатор и проверим эффективность полученных проточных частей на нерасчетных режимах с помощью внутреннего относительного КПД. Далее сравним полученные КПД и выберем лучший вариант конструкции ЧНД. Этому варианту соответствует искомый оптимальный расход пара.

Для этой цели в диапазоне расходов 19,4 – 41 кг/с выделим дополнительно режим с расходом 30 кг/с. Таким образом, предполагается получить три варианта проточных частей ЧНД на расходы 19,4; 30; 41 кг/с. Далее задаемся исходными данными расчетов, частично показанными в таблице 1.

Таблица 1

| | Расход пара в проточной части, G [кг/с] | Средний диаметр ступени №1 (м) | Давление на входе в ступень, P ₀ [МПа] | Энтальпия на входе в ступень, i ₀ [$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$] | Теплоперепад ступени Н ₀ [$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$] | Отношение скоростей, u/c _ф ступени №1 |
|---|---|--------------------------------|---|---|--|--|
| 1 | 41 | 1,22 | 0,15 | 2693 | 71,56 | 0,50 |
| 2 | 30 | 1,22 | 0,12 | 2683 | 70,24 | 0,40 |
| 3 | 19,4 | 1,22 | 0,12 | 2683 | 69,32 | 0,51 |

Расчеты геометрии проточных частей выполнены по программам, рекомендованным в работе [4]. Полученные расчетные характеристики вариантов ЧНД представлены в таблице 2.

Таблица 2

| | Расход пара в проточной части, G [кг/с] | Кол-во ступеней | D _{ср} [м] последней ступени | L [м] последней ступени | Внутренний относительный КПД ЧНД |
|---|---|-----------------|---------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 1 | 41 | 5 | 1,712 | 0,578 | 0,83 |
| 2 | 30 | 6 | 1,513 | 0,434 | 0,81 |
| 3 | 19,4 | 7 | 1,603 | 0,501 | 0,79 |

Результаты расчетов показывают, что изменение расхода пара влияет на эффективность ЧНД, высоты лопаток и число ступеней. Дальнейшие расчеты были посвящены испытанию полученных проточных частей на нерасчетных режимах или точнее – на пониженных нагрузках с целью выяснения зависимости КПД от расходов [5,6]. Результаты расчетов показаны на графиках рис. 2. Видно, что проточная часть ЧНД, полученная на расходе пара, соответствующему режиму «лето», (зависимость 1) более эффективна во всем диапазоне режимов работы турбины. Любопытно отметить, что КПД всех вариантов мало отличаются на режиме «зима». Таким образом, при выборе конструкции ЧНД важно знать диапазон изменения тепловой нагрузки турбины.

Здесь необходимо сказать еще о том, что полученный результат не учитывает одного эффекта, присущего всем теплофикационным турбинам. Он заключается в том, что полный конденсационный расход пара в таких турбинах вызывает некоторое повышение давления в конденсаторе. Если учесть сказанное, то лопатки последней ступени можно сделать короче. Это приведет с одной стороны к удешевлению конструкции турбины, а с другой – к уменьшению эффективности ЧНД на переменных режимах по причине увеличения потерь с выходной скоростью. Таким образом, выбор

длины лопаток последней ступени становится предметом технико-экономического обоснования.

В заключение на рис. 3 показана расчетная проточная часть низкого давления (ЧНД) турбины Т – 48/62 – 7,4/0,12, соответствующая оптимальному расходу 41 кг/с и принятым в турбостроении нормам [7,8,9].

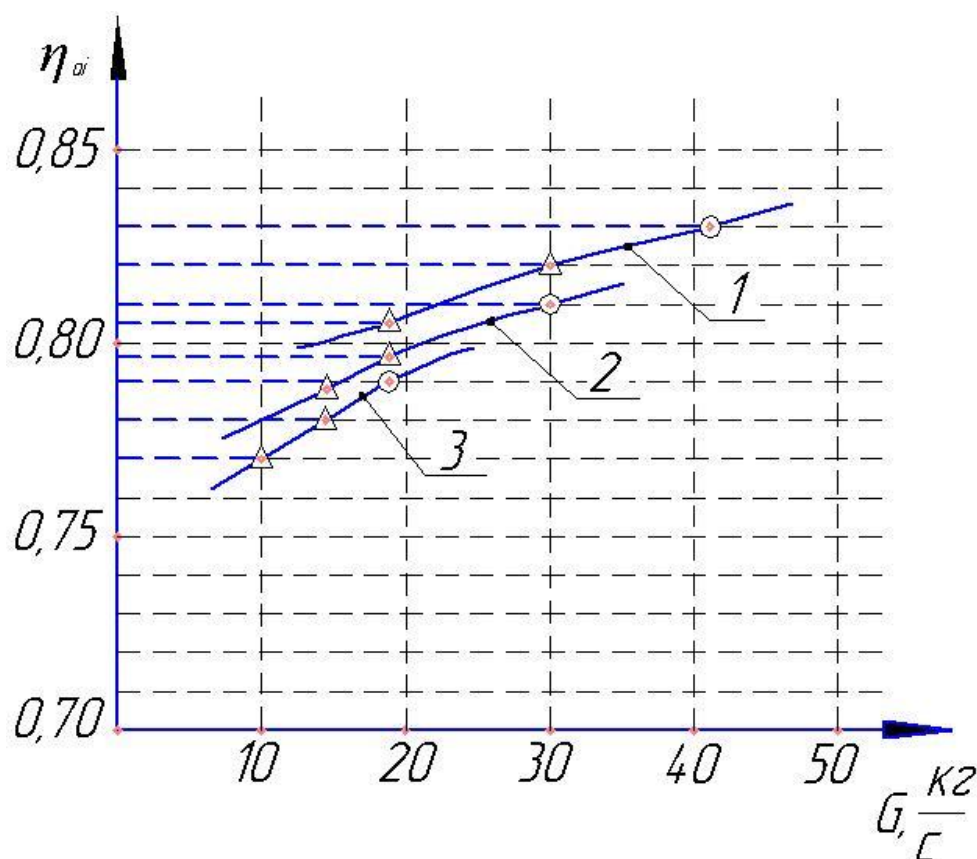


Рис. 2. Зависимости КПД вариантов проточных частей ЧНД от расходов пара
 1 – расчетный расход $G=41 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$; 2 – расчетный расход $G=30 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$;
 3 – расчетный расход $G=19,4 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$

Здесь O – расчетные режимы; Δ – нерасчетные режимы

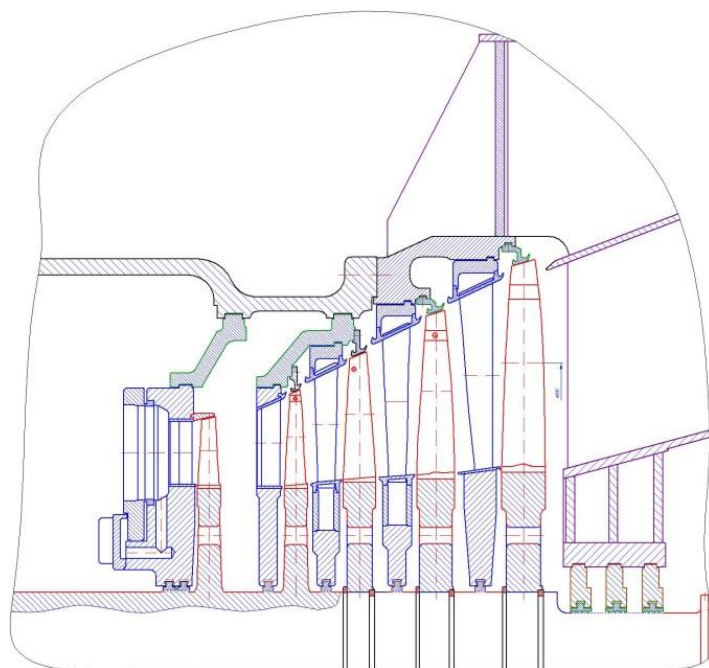


Рис. 3. Расчетная проточная часть ЧНД при $G=41$ кг/с

Таблица 3

| Расход пара в проточной части, G [кг/с] | Кол-во ступеней | $D_{\text{ср}}$ [м] последней ступени | L [м] последней ступени | Внутренний относительный КПД ЧНД |
|---|-----------------|---------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| 41 | 5 | 1,712 | 0,578 | 0,83 |

Выводы

1. Расчеты показывают, что если турбина работает в широком диапазоне тепловых нагрузок, то проточную часть ЧНД выгодней проектировать на конденсационный расход пара при полной мощности турбины.

2. Проточная часть ЧНД с большими проходными сечениями (с относительно высокими соплами) лучше приспособлена к нерасчетной нагрузке, т.к. имеет более высокие КПД на всех режимах.

Список литературы

[1] Щегляев А.В. Паровые турбины: учебн. для вузов. - М.: Энергия, 1976. 357с

[2] Кириллов И.И., Иванов В.А., Кириллов А.И. Паровые турбины и паротурбинные установки. - Л.: Машиностроение, 1978. 276 с

[3] Бененсон Е.Н., Иоффе Л.С. Теплофикационные паровые турбины. - М.: Энергия, 1977. 264 с

[4] Жинов А.А. Комплекс программ для расчета осевой паровой турбины по среднему диаметру: методическое пособие, РИО МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 20 с

[5] Жинов А.А. Расчет ступеней давления паровой турбины на переменном режиме: методическое пособие, КФ МГТУ, 2009. 7 с

[6] Самойлович Г.С., Трояновский Б.М. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах: учебн. пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1982, 278 с

[7] Костюк А.Г., Фролов В.В. (под ред.) Паровые и газовые турбины: учебн. для вузов.- М.: Энергоатомиздат, 1985. 351 с

[8] Сахаров А.М. Тепловые испытания паровых турбин. - М.: Энергоатомиздат, 1990. 233 с

[9] Кирюхин В.И., Тараненко Н.М. и др. Паровые турбины малой мощности КТЗ. - М.: Энергоатомиздат, 1987. 215 с

Сафронова Яна Андреевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: safronovayna17@gmail.com

Сидоров Альберт Александрович – канд. техн. наук, доцент
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alb.sidoroff2017@yandex.ru

Е.А. Юрик, Р.И. Мусин

ПРОЦЕСС ОБКАТА РОТОРОМ СТАТОРА ТУРБОУСТАНОВКИ И ПРИЧИНЫ ЕГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В практике эксплуатации паровых турбин имеются случаи глобальных аварий, которые приводили к полному или частичному разрушению турбоагрегата. Одной из причин аварий может стать процесс обката ротора по статору, который происходит после задевания ротора о статор. По классификации [1] к явлению обката относят движение ротора с постоянным (безотрывное движение) и периодическим контактом ротора со статором, сменяющимся движением в зазоре между ротором и статором, и понятие развитие «синхронного» или «асинхронного» обката являются определяющими. При этом режим с постоянным контактом, по-видимому, имеет большее основание на существование в системе с податливым статором, а в случае жёсткого статора, по крайней мере, на установившемся этапе развития обката. Первое описание проблем, связанных с задеванием ротором статора приведено в работах Ньюкерна (1929 г.).

Контакт ротора о статор, заканчивающийся разными последствиями, возможен при нарушении нормальной работы и значительных амплитудах колебаний ротора турбоустановки, вызываемых такими причинами как:

- Импульсное воздействие в виде ударной волны контактного взрыва, землетрясение;
- Неуравновешенность ротора, например, при пуске плохо прогретого турбоагрегата (тепловой небаланс);
- Попадание посторонних предметов в проточную часть турбоустановки;
- Разгон ротора по оборотам из-за отказа автоматики;
- Расцентровка опор в процессе эксплуатации турбины;
- Внезапная разбалансировка ротора, связанная с отрывом одной или нескольких лопаток, или любого другого вращающегося элемента ротора. [2]

После любого из указанных воздействий может развиваться нестационарный процесс контактного взаимодействия ротора со статором. Данный контакт может привести к авариям с катастрофическими последствиями, разрушению ротора, фундамента, здания, пожару и полному разрушению установки в короткий промежуток времени.

Исследования показывают, что в процессе контакта вращающегося ротора со статором трение скольжения, при взаимном их перемещении (относительно друг друга), способствует появлению позиционных неконсервативных сил обката, возбуждающих прецессионное движения ротора в направлении, обратном вращению ротора (асинхронный обкат). К позиционным эти силы относят, потому что зависят они от положения ротора при

взаимодействии со статором и пропорциональны смещениям ротора. Не-консервативные позиционные силы обката действуют на ротор только в моменты времени, пока продолжается взаимодействие ротора со статором, т. е. пока действуют силы трения скольжения между поверхностями ротора и статора. При разрыве контакта эти силы перестают действовать на ротор до следующего задевания ротором статора. [3]

Характерные особенности развивающегося обката:

- Громкие посторонние звуки в процессе эксплуатации турбоустановки;
- Стирание поверхностей ротора и статора во время касания;
- Значительные амплитуды колебания всей установки;
- Повышенные силы давления на статор.

На рисунке 1 показано, что сила трения T в месте контакта неуравновешенного ротора со статором, создает силу, приложенную к центру C сечения ротора, перпендикулярную смещению OC ротора. Сила T способствует возбуждению и развитию обката. P – точка контакта ротора со статором; O – центр расточки статора; C – центр сечения ротора; ω – угловая скорость вращения ротора; N – реакция статора; R – сила от небаланса ротора.

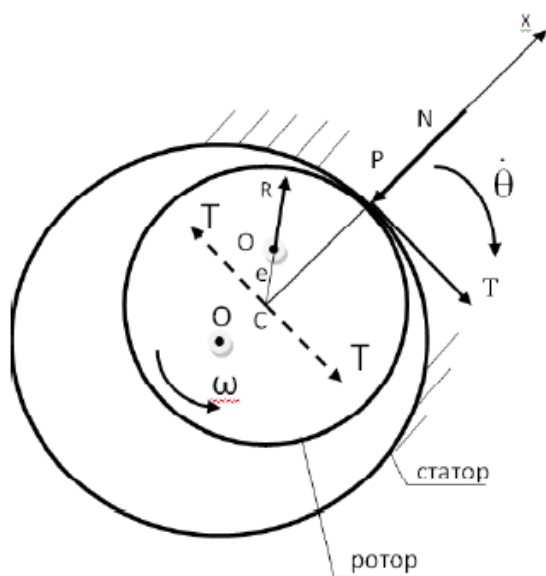


Рис. 1. Силы, действующие на ротор при контакте со статором

Сам процесс развития обката и особенно момент перехода синхронного обката в асинхронный, пока недостаточно изучены. Предварительный анализ показывает многообразие форм обката ротора по статору. Обкат может быть не только синхронным или асинхронным, но, в зависимости от условий контакта, синхронный обкат переходит в асинхронный и обратно. [3]

Опасность асинхронного обката связана с практически мгновенным развитием самовозбуждающихся колебаний ротора при контакте со статором и опасными для целостности турбины амплитудами колебаний ротора, силами давления на статор. Режим, когда генератор после внезапной разбалансировки не отключён от сети и на валу действует постоянный момент

($\omega = \text{const}$), больше способствует возбуждению асинхронного обката. Обкат ротора на неравно жёстких опорах по статору несет больше опасности, чем в случае равно жёстких опор.

При появлении опасности развития аварийной ситуации турбоагрегат должен быть незамедлительно отключён от сети с прекращением подачи рабочего тела (пара) в проточную часть турбины. Эту роль выполняет система защиты турбоагрегата, которая должна иметь высокую степень надёжности, т.е. быть практически безотказной, действовать автоматически и, самое главное, обладать достаточным быстродействием с момента возникновения сигнала, например, по предельному уровню вибрации, и до прекращения подачи пара в турбину быстрозапорными устройствами, чтобы исключить действие момента на валу турбины. В современных турбинах цепочка срабатывания различных элементов системы защиты с закрытием стопорных, обратных клапанов, вплоть до регулирующих клапанов и поворотных диафрагм, выполняет свою функцию в течение некоторого промежутка времени, определяемого временем. Существуют несколько типов исполнения системы защиты: электрическая или электрогидравлическая. Прохождение электрического сигнала до исполнительного механизма (например, до механизма закрытия стопорных клапанов) $t_1 = 0,05$ сек. Ход стопорного клапана от поступления сигнала и до закрытия клапана с прекращением подачи пара в турбину $t_2 \approx 0,35-0,4$ сек. В электрогидравлической системе защиты это время, по оценкам, удваивается. [4]

Развитие процесса обката ротором статора турбоустановки, безусловно, является крайне опасным и может привести к тяжелым последствиям. Поэтому, при проектировании турбоустановки, данное явление необходимо тщательно исследовать при помощи математического моделирования.

Список литературы

[1] Позняк Э. Л. Крутильный удар в валопроводе при внезапной и сильной разбалансировке. Машиноведение, 1976 - №1 с. 52-56.

[2] Шатохин В. Ф. Некоторые предложения по предотвращению катастроф, связанных с разрушением турбоагрегата. Вестник машиностроения. 2007 - №6 с. 25-31

[3] Щегляев А. В., Костюк А. Г. Действие внезапной разбалансировки на ротор турбоагрегата. Теплоэнергетика. 1969 - №8 с. 5-15

[4] Шатохин В. Ф., Циммерман С. Д. Влияние быстродействия системы защиты турбоагрегата на развитие обката ротора по статору. Двигатели и энергоустановки аэрокосмических летательных аппаратов. 2013 - №9 с. 115-124

Юрик Елена Алексеевна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ea.yurik@gmail.ru

Мусин Роман Ильдусович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: zenitromanmusin@gmail.com

А.А. Каретин, Н.В. Гридчин

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ НИЗКОДАВЛЯЮЩЕГО ПАРОВОГО КОМПРЕССОРА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ РЕКОМПРЕССИИ ПАРА

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Центробежные компрессоры, также называемые радиальными компрессорами, являются критичным оборудованием для многих применений в различных областях промышленности.

Эти машины предоставляют надежное сжатие в очень компактных конфигурациях. Центробежные компрессоры различают между собой по типу конструкции (горизонтальные или вертикальные), по профилю лопаток на рабочем колесе, по степени сжатия рабочего тела, по толщине стенок частей под определенное рабочее давление [1,2].

Их прямое назначение заключается в сжатии жидкости, газа или смеси газа и жидкости в небольшой объем с одновременным увеличением давления и температуры сжимаемой среды.

Центробежные компрессоры относятся к классу динамических машин или турбокомпрессорам. Прогресс в производственных методах стал ключевым фактором в развитии современных высокотехнологичных турбомашин. Основные динамические компоненты в центробежном компрессоре – это направляющие лопасти, рабочее колесо, диффузор, спиральная камера и боковой выход. Импеллеры отвечают за всю работу, производимую с потоком среды и поэтому невозможно достичь эффективности во всем компрессоре или ступени компрессора без рабочего колеса, спроектированного надлежащим образом.

Центробежные компрессоры используются:

- в химической и нефтехимической промышленности при производстве этилена и пропилена, ароматических углеводородов, при сжижении газа, для сжатия водорода, СО, метанола, аммиака и тд.
- в переработке нефти на установках каталитического крекинга, печах риформинга, при сероочистке.
- при переработке природного газа на установках для сжижения газа, газоперерабатывающих установках.
- для механического сжатия паров (для уплотнения паров создаваемых маточной жидкостью, повышая и давление, и температуру) при опреснении морской воды и в целлюлозно-бумажной промышленности.
- для улавливания и хранения углекислого газа. СО₂ улавливают непосредственно у источника, не допуская выброса в атмосферу, а затем транспортируют в заданное место.

- в энергетике для нагнетания топливных газов, удаление серы из топочных газов, подачи воздуха при продувке сажи, для подачи технологического воздуха, в качестве воздушных компрессоров пневмораспыла для газовых турбин.

Механическая рекомпрессия пара – один из способов возврата тепла в цикл с помощью компрессора, который сжимает пар низкого давления, повышая при этом его температуру. Как правило, энергозатраты при этом составляют лишь 5-10% тепла, получаемого таким образом.

Процесс механической рекомпрессии пара нашел широкое применение в таких отраслях как: пищевая промышленность, производство питательной воды для котлов, вторичная переработка особых металлов, опреснение воды и др. (рисунок 1) [3,4].

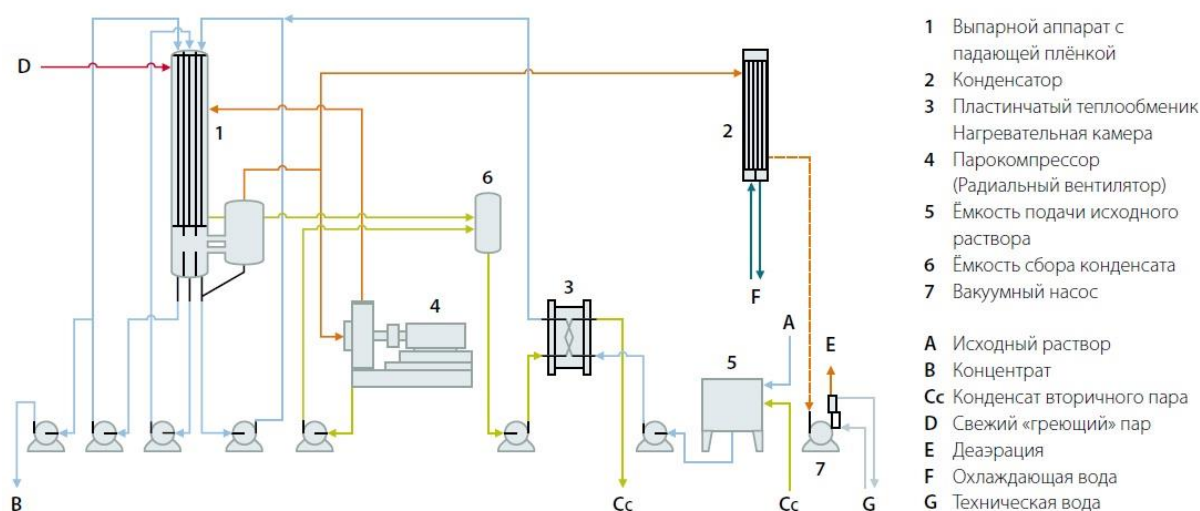


Рис. 1. Схема механической рекомпрессии пара

Центробежный компрессор, используемый в данном цикле, характеризуется малыми значениями степени повышения давления (1,15-2), большим диаметром крыльчатки (в зависимости от мощности может достигать 1500 мм) и малыми оборотами (3000 об/мин), что обусловлено приводом от электродвигателя.

Как известно, в России разработка и внедрение подобных установок в промышленность развито слабо, хотя они имеют явные преимущества, такие как повышение эффективности, снижение вредных выбросов путем уменьшения затрат на выработку первичной энергии и простота конструкции.

Расчет и проектирование низконапорных компрессоров имеет огромное теоретическое и практическое значение, учитывая курс государства на импортозамещение, в будущем возможно налаживание собственного производства линейки высокоэффективного энергетического оборудования. Что в свою очередь требует разработки достоверной методики расчета таких компрессоров с применением численного объёмным проектированием с помощью ЭВМ.

Список литературы

[1] Епифанова В.И. Компрессорные и расширительные турбомашинны радиального типа. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. – 624 с., ил.

[2] Палладий А.В., Фосс С.Л. Термогазодинамический расчет центробежных компрессоров. – К.: Казан. гос. технол. ун-т, 2007. – 125 с.

[3] Y.Wang, S.Komori, Z., 1999. «Design and performance prediction of centrifugal impellers.» *IMechE, Part A (1999)*, pp. 210 463-476.

[4] Krain, H., 2005. “Review of Centrifugal Compressor’s Application and Development”, SAE Transactions, 127, Issue 1.

Каретин Алексей Алексеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: karetin_aleksei@mail.ru

Гридчин Николай Викторович – ст. преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gridchin2610@gmail.com

СЕКЦИЯ 5.

КЛАССИЧЕСКИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ; АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ

А.А. Брынза, М.О. Корлякова

АНАЛИЗ СВЯЗИ СТРУКТУРЫ СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ТОЧНОСТЬЮ КЛАССИФИКАЦИИ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В последнее десятилетие машинное обучение стало набирать все большую и большую популярность и сегодня занимает одну из лидирующих позиций в сфере информационных технологий. В настоящее время, данный тип обучения активно используется для распознавания речи и образов, а также на его основе построены многие поисковые системы.

Основной целью машинного обучения является обучение компьютера таким образом, чтобы он самостоятельно, без помощи человека, мог принимать решения, основанные на предыдущем опыте, для решения поставленной перед ним задачи. Активное развитие машинного обучения привело к распространению искусственных нейронных сетей [1]. Рассмотрим особенности применения и настройки современного типа нейронных сетей, которые принято называть свёрточными.

Свёрточная нейронная сеть. Сверточная нейронная сеть была впервые предложена Я.Лекуном и Й.Бенгуа [2]. Ученые исследовали зрительную кору головного мозга кошки, содержащую карты местных рецептивных полей, уменьшающиеся по мере детализации объекта, на который смотрит животное. Я.Лекун и Й.Бенгуа пришли к выводу, что математическую модель поведения зрительных рецепторов кошки можно построить, опираясь на следующие этапы обработки изображений:

- свертка исходного изображения объекта при помощи нескольких небольших фильтров;
- субдискретизация (объединение) полученных на предыдущем шаге ключевых признаков;
- повтор предыдущих шагов (свертки, а затем субдискретизации) до тех пор, пока на выходе не получится достаточное количество признаков исходного изображения;
- использование модели полносвязного слоя для получения решения конкретной задачи. Таким образом, свёрточная нейронная сеть благодаря своей архитектуре в основном используется для решения сложных графических задач распознавания и классификации изображений.

Свёрточная нейронная сеть (CNN) имеет ряд значительных преимуществ, благодаря которым она обходит по вычислительной мощности алгоритмы распознавания прошлых десятилетий [3]:

- Инвариантность к поворотам.
- Инвариантность к неравномерному распределению света.

- Низкая чувствительность к сдвигам.
- Высокое качество распознавания.

Рассмотрим особенности CNN на примере классической задачи распознавания рукописных символов, в различных условиях освещённости и ориентации. Проведем анализ взаимосвязи точности классификации обученной сети, от ее структуры и объема. Общая схема сети приведена на рис.1. Опишем основные составляющие этой схемы.

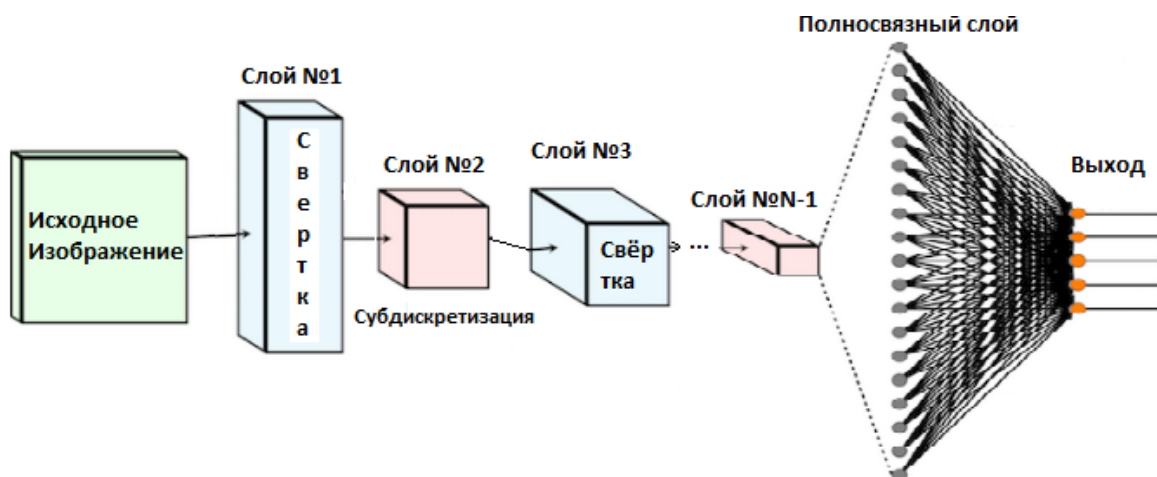


Рис. 1. Общий вид структуры свёрточной нейронной сети

Слой свертки. Пиксели, находящиеся близко друг к другу, теснее «взаимодействуют» при формировании интересующего нас признака, чем пиксели, расположенные в противоположных углах. Кроме того, если в процессе классификации изображения небольшая черта считается очень важной, не будет иметь значения, на каком участке изображения эта черта обнаружена.

Используется понятие оператора свертки. Имея двумерное изображение I и небольшую матрицу K - ядро свертки, построенное таким образом, что графически кодирует какой-либо признак, вычисляем свернутое изображение $I * K$, накладывая ядро на изображение всеми возможными способами и записывая сумму произведений элементов исходного изображения и ядра:

$$(I * K)_{xy} = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w K_{ij} \times I_{x+i-1, y+j-1}$$

Параметры задаваемые на каждом слое свёртки:

- Глубина - сколько ядер и коэффициентов смещения в каждом слое;
- Высота и ширина каждого ядра;
- Величина смещения ядра на каждом шаге при вычислении следующего пикселя результирующего изображения.

Для решения задачи распознавания, анализируются матрицы свёртки различной размерности. Генерация ядра производится случайным образом, для получения наиболее разнообразного набора карт признаков. Примеры исходного фрагмента и полученных сверток на 1-м и на 3-м слое свёртки приведены на рис.2 и 3 соответственно.



Рис. 2. Примеры фрагментов свёртки



Рис. 3. Примеры фрагментов свёртки

Процесс субдискретизации. Популярный способ субдискретизации изображения слой подвыборки, который получает на вход маленькие отдельные фрагменты изображения (обычно 2x2) и объединяет каждый фрагмент в одно значение. Существует несколько возможных способов агрегации, наиболее часто из четырех пикселей выбирается максимальный. (рис.4.).

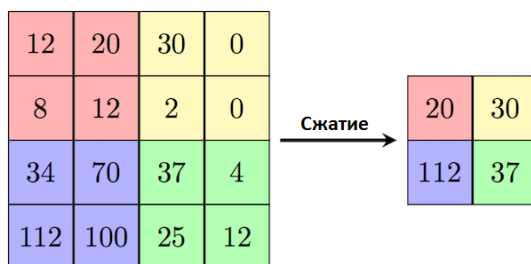


Рис. 4. Представление процесса субдискретизации

Примеры фрагментов, полученных на 2м слое (субдискретизации) на рис. 5.



Рис.5. Фрагменты, полученные на 2-м слое

Важным требованием при формировании структуры сети является соблюдение верной последовательности размерностей слоёв. При работе на глубинных слоях, размер изображения не должен быть меньше слоя свёртки. Желательно, чтобы слой, идущий перед полносвязным, был слоем субдискретизации, поскольку наличие свёрточного слоя в качестве последнего может привести к искажению анализируемых признаков.

Полносвязный слой. Данный слой выводит N-мерный вектор (N – число классов) для определения нужного класса. Работа организуется путем обращения к выходу предыдущего слоя (карте признаков) и определения свойств, которые наиболее характерны для определенного класса.

Рассмотрим несколько различных структур нейронной сети. Используется выборка символов MNIST состоящая из 10000 фрагментов рукописного текста в различных вариациях, равномерно поделённых на 10 классов. Для обучения используется выборка, состоящая из 1000 произвольно отобранных фрагментов. И тестовая выборка, состоящая из 500 фрагментов. На всех первых слоях сети, изображение преобразуется на 6 карт признаков, на третьих слоях на 16 карт, на пятых слоях 120 карт. В сетях, с числом слоёв свыше 6, на 7м слое получаем набор из 190 карт, на 9м слое – 300 карт. На слоях субдискретизации в качестве метода агрегации используется суммирование всех элементов выделенного фрагмента. На выходе каждой сети идёт полносвязный слой. Результаты обучения и точности классификации приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты моделирования CNN сетей

| № Исп. | Размер матриц свёртки | Размер изображений | Размер обуч. выборки | Число слоёв | | Время обучения | Размер тестовой выборки | Точ-ть класс. |
|--------|---------------------------------|--------------------|----------------------|-------------|-------|---------------------|-------------------------|---------------|
| | | | | Сверт. | Субд. | | | |
| 1 | 1-3 слой: 5x5 | 32x32 | 1000 | 7 | | 33 мин. 21 сек. | 500 | 69.4% |
| | | | | 3 | 3 | | | |
| 2 | 1-3 слой: 5x5 | 24x24 | 1000 | 6 | | 28 мин. 37 сек. | 500 | 62.8% |
| | | | | 3 | 2 | | | |
| 3 | 5x5 5x5 5x5 3x3 | 44x44 | 1000 | 8 | | 56 мин. 14 сек. | 500 | 64.1% |
| | | | | 4 | 3 | | | |
| 4 | 5x5 5x5 4x4 5x5 | 64x64 | 1000 | 9 | | 107 мин. 11 сек. | 500 | 71.9% |
| | | | | 4 | 4 | | | |
| 5 | 5x5 5x5 5x5 5x5 5x5 | 92x92 | 1000 | 10 | | 145 мин. 41 сек. | 500 | 58.7% |
| | | | | 5 | 4 | | | |

В качестве первого эксперимента рассматривалась сеть, состоящая из 7 слоёв: три свёрточных и три субдискретизирующих плюс полносвязный. Результат продемонстрировал удовлетворительное качество классификации, размерность ядра свёртки на всех слоях составлял 5x5 пикселей (см. Таблица 1.). На 2м слое использовалась структура, уменьшенная на один

слой субдискретизации, и оканчивающаяся свёрточным слоем. Несмотря на упрощение структуры и уменьшение размера обучающих фрагментов, точность классификации уменьшилась, из этого можно сделать вывод, что отсутствие слоя субдискретизации перед полносвязным слоем несколько снижает точность распознавания в итоге. Это связано с искажением полученного набора карт признаков из-за случайной генерации ядра свёртки. Третий и последующие структуры имеют увеличенное число слоёв сети, и работают с фрагментами большей размерности. Последовательное увеличение размерности фрагмента с размером сети позволяет повысить качество классификации, однако, использование слишком больших фрагментов для обучения приводит к избыточности рассматриваемых признаков, что снижает точность классификации, и к существенному возрастанию времени обучения. Сеть AlexNet, обученная на полной выборке MNIST, смогла решить поставленную задачу распознавания с точностью 99.5% [4].

Выводы. В результате проведенного исследования, можно сделать вывод, что увеличение размера свёрточной сети, до наступления высокой избыточности признаков анализируемых фрагментов, позволяет существенно повысить качество классификации. Важно учитывать характер решаемой задачи, и исходя из этого, формировать структуру сети. Учёт особенностей и характера сети позволяет добиться наилучших показателей классификации при решении любых задач распознавания.

Список литературы

[1] An introduction to Convolutional Neural Networks.[Электронный ресурс] URL:http://white.stanford.edu/teach/index.php/An_Introduction_to_Convolutional_Neural_Networks (Дата обращения 12.10.17).

[2] Samer Hijazi, Rishi Kumar, Chris Rowen. Using Convolutional Neural Networks for Image Recognition. [Электронный ресурс] URL: <http://www.cadence.com/en/default.aspx> (Дата обращения 14.10.17).

[3] Vivek S., Navdeep S. Artificial Neural Networks Based Optical Character Recognition // An International Journal (SIPIJ) Vol.3, No.5, October 2012.

[4] Deep Convolutional Neural Networks for Endotracheal Tube Position and X-ray Image Classification [Электронный ресурс] URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5537094> (Дата обращения 14.10.17).

Брынза Андрей Андреевич – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: wolf_93_21@mail.ru

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Д.В. Мельников, Чжо Ту Аунг

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТУРБИНЫ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

При изучении динамических характеристик систем регулирования энергетических турбин особое значение имеют математические методы [1, 2]. Они являются не только основой аналитических методов, но и становятся составной частью экспериментальных исследований. Непременным условием успеха при этом должно быть построение математических моделей, корректно отражающих динамические свойства элементов. Математическая модель позволяет определить количественные показатели качества регулирования турбин, что является ответственной задачей, т. к. без знания этих показателей нельзя ни эксплуатировать существующие системы регулирования и, следовательно, турбины, которыми они оснащены, ни разрабатывать новые системы [3]. Желательно, чтобы уровень сложности модели не превышал требуемых для данного вида исследований.

Математическое моделирование в исследованиях систем регулирования турбин основано на методах общей теории автоматического управления, изложенных в соответствующей литературе. Это относится и к приемам составления моделей звеньев системы, и к способам аналитического исследования, которые выбирают в зависимости от цели исследования и особенностей математической модели. Как и в других областях техники, в регулировании турбин наблюдается постоянная тенденция к использованию все более сложных методов аналитического исследования. Если в начале развития систем регулирования турбин ограничивались изучением устойчивости и быстродействия линейной модели, то затем получил все большее распространение анализ нелинейных моделей, стали применяться стохастические подходы, оптимизационные методы и т. д. [4, 5] Это связано главным образом с усложнением требований, предъявляемых к качеству функционирования систем регулирования турбин [6]. Данная работа посвящена моделированию систем регулирования энергетических турбин Калужского турбинного завода. В качестве примера приведем модель конденсационной турбины Калужского турбинного завода ПТ-25/30-90/10М. Эта система турбины предназначена для поддержания частоты вращения ротора турбина на требуемом уровне и уравнения турбины можно представить в следующем виде

$$T_{\varphi} d\varphi / dt = (1 - \theta)(\xi - \lambda) - \theta\varphi \quad (1)$$

$$T_{\xi} d\xi / dt = \mu - \xi \quad (2)$$

$$T_{\mu} d\mu / dt = F(z) \quad (3)$$

$$T_z dz / dt = (-\varphi / \delta) - \mu - z \quad (4)$$

Уравнениями (1), (2), (3), (4), описывающих динамику турбины соответствует структурная схема, представленная на рис. 1.

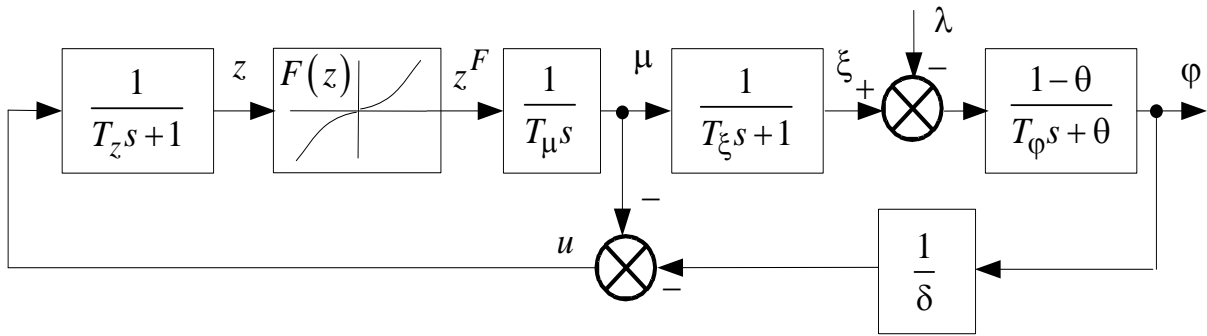


Рис. 1. Структурная схема нелинейной системы регулирования энергетической турбины ПТ-25/30-90/10М

где T_φ – постоянная времени ротора и имеет размерность времени; T_ξ – постоянная времени камеры эквивалентного объема (время полного заполнения камеры при определенном расходе пара); T_μ – постоянная времени сервомотора; T_z – постоянная времени золотника; $\varphi = (\Omega - \Omega_{\text{ном}}) / \Omega_{\text{ном}}$ – относительное отклонение угловой частоты вращения ротора от номинального значения $\Omega_{\text{ном}}$; θ – эквивалентный коэффициент самовыравнивания; λ – относительное отклонение электрической нагрузки генератора; ξ – относительное изменение расхода пара в турбине; μ – относительное отклонение поршня сервомотора; z – относительное отклонение поршня золотника; δ – степень неравномерности системы регулирования; $F(z)$ – Функция описывает нелинейный элемент.

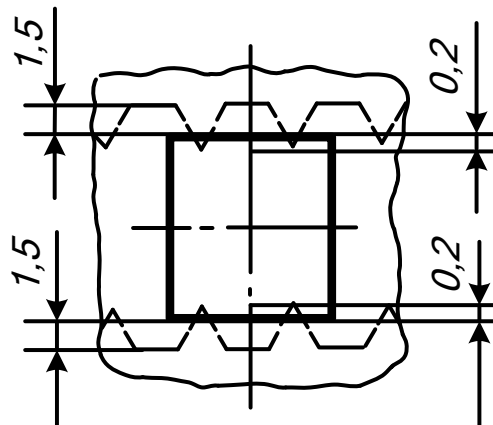


Рис. 2. Форма кромок отсечного золотника сервомотора энергетической турбины ПТ-25/30-90/10М

Функция $F(z)$, описывает нелинейный элемент, определяемый формой кромок отсечного золотника сервомотора турбины (рис. 2), а также специально вводимой для сервомотора зоной нечувствительности (перекрыши)[7].

Нелинейность $F(z)$ для золотника турбины ПТ-25/30-90/10М описывается следующей зависимостью:

$$F(z) = \begin{cases} 0, & \text{при } |z| \leq \varepsilon_0, \\ 0,5(z - \text{sign}(z)\varepsilon_0) + 0,25 \frac{(z - \text{sign}(z)\varepsilon_0)^2}{\Delta z_0} \text{sign}(z - \text{sign}(z)\varepsilon_0), & \text{при } |z| \leq \Delta z_0 \\ z - \text{sign}(z)\varepsilon_0 - 0,25\Delta z_0 \text{sign}(z - \text{sign}(z)\varepsilon_0), & \text{при } |z| > \Delta z_0, \end{cases} \quad (5)$$

где Δz_0 – относительные высоты треугольного профиля кромок поршня отсечного золотника, ε_0 – величина, характеризующая степень нечувствительности сервомотора.

Известны следующие параметры объекта регулирования и системы управления для ПТ-25/30-90/10М: $T_\varphi = 12$ с, $T_\xi = 0,2$ с, $T_\mu = 0,2$, $T_z = 0,05$, $\delta = 0,03$, $\theta = 0,05$, $\Delta z_0 = 0,3$, $\varepsilon_0 = 0,0005$.

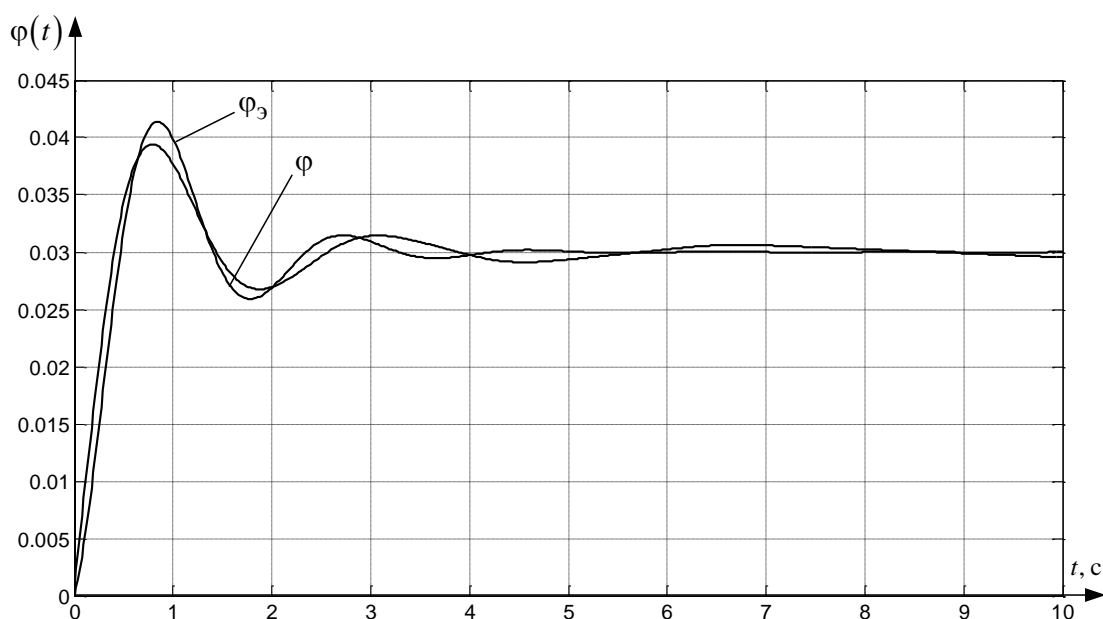


Рис.

3. Эталонный и реальный относительного изменения частоты вращения ПТ-25/30-90/10М в классе нелинейных систем

Таким образом, динамика системы регулирования турбины ПТ-25/30-90/10М описывается нелинейной системой из пяти дифференциальных уравнений. Проведенный анализ полученных моделей, путем численного решения дифференциальных уравнений на ЭВМ [8], и сравнение его результатов с результатами экспериментов подтвердил адекватность математических моделей (ошибка количественного совпадения составила около 1,4%).

Список литературы

[1] Калашников А.А. Динамика регулирования турбин. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 328 с.

[2] Кириллов И.И. Автоматическое регулирование паровых турбин и газотурбинных установок. – Л.: Машиностроение, 1988. – 447 с.: ил.

[3] Мельников Д.В., Фишер М.Р. Математическая модель контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины К-800-130/3000 / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». Специальный выпуск «Энергетическое и транспортное машиностроение». С. 197-215, 2011.

[4] Корнюшин Ю.П., Мельников Д.В., Егупов Н.Д., Корнюшин П.Ю. Исследование и расчет параметров элементов системы регулирования частоты вращения ротора турбины с учетом параметрической неопределенности математической модели // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. № 1, С. 78-93.

[5] Синергетические методы управления сложными системами: Энергетические системы / под ред. А.А. Колесникова. Изд. 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 248 с.

[6] Нормы участия энергоблоков тепловых электростанций в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности. Стандарт организации. Открытое акционерное общество «Системный оператор единой энергетической системы». Издание официальное. Москва 2013 http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto_002_2013_freq_regulation.pdf

[7] Чжо Ту Аунг, Мельников Д.В. Алгоритм исследования нелинейных систем автоматического управления в стохастических режимах // Инженерный журнал: наука и инновации 2014 № 4 (28) С. 3. <http://engjournal.ru/catalog/it/asu/1270.html>.

[8] Мельников Д.В., Корнюшин Ю.П., Мин Чжо Ту, Чжо Ту Аунг, Окар Мин. Алгоритм синтеза системы регулирования частоты вращения ротора энергетической турбины. Научное обозрение. 2015. № 20. С. 138-143.

Мельников Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, зав. кафедрой "Электротехника" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: melnikov-dv@yandex.ru

Чжо Ту Аунг – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kyawthuaung310@gmail.com

Тин Эй Чжо, Тун Тун Чжо, А.М. Макаренков

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА С НЕСКОЛЬКИМИ СЛУЧАЙНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Электрогидравлический следящий привод (ЭГСП) как силовой привод в составе систем автоматического управления широко используется в авиации, ракетостроении, робототехнике, транспортном машиностроении, энергетике и других подобных областях. Требования к точности и улучшению качества современных систем автоматического управления делают актуальной задачу повышения точности ЭГСП как их важного элемента. Данной проблеме посвящена настоящая работа, в которой рассматривается опыт применения усредненных проекционных моделей стохастических систем для оптимизации параметров ПИД-регулятора и корректирующего устройства в контуре управления ЭГСП с учетом влияния фактора случайности физических параметров ЭГСП.

Использование проекционных моделей и методов теории матричных операторов при решении задач теории управления наиболее эффективно для линейных систем, поэтому в настоящей работе в качестве исходной модели рассматривается линеаризованная математическая модель ЭГСП с ПИД-регулятором и корректирующим устройством, которая после приведения к стандартной форме вход-выход имеет вид:

$$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^i}{dt^i} y(t) = \sum_{j=0}^m b_j \frac{d^j}{dt^j} u(t), \quad (1)$$

где все или некоторые коэффициенты a_i , b_j являются случайными величинами, определяемыми как

$$a_i = m_{a_i} + \tilde{a}_i, i = \overline{0, n-1}, b_j = m_{b_j} + \tilde{b}_j, j = \overline{0, m} \quad (2)$$

где m_{a_i} , m_{b_j} – математические ожидания, \tilde{a}_i, \tilde{b}_j – центрированные случайные величины.

В модели (1) приняты следующие обозначения: $u(t)$ – напряжение на суммирующем входе электронного усилителя сигнала ошибки (входной сигнал ЭГСП); $y(t)$ – перемещение штока поршня гидроцилиндра (выходной сигнал ЭГСП). Условие физической реализуемости системы (1) формулируется как $n \geq m$. При принятых упрощающих допущениях порядок левой и правой части $n = 7$ и $m = 2$ соответственно.

Рассматривается способ минимизации влияния случайности параметров ЭГСП путем дополнительной оптимизации параметров ПИД-регулятора и корректирующего устройства, найденных без учета влияния фактора случайности параметров ЭГСП [4].

Требуемые динамические характеристики системы управления задаются функцией эталонного (желаемого) переходного процесса $x_{\text{э}}(t) = 1 \cdot 10^{-1} (1 - e^{-20t})$, который должен иметь место при подаче на вход сигнала системы. Входной сигнал $u(t)$ в общем случае будем полагать гауссовым случайным процессом, для которого задано математическое ожидание $m_u(t) = 0.01(t)$ и корреляционная функция $R_{uu}(t_1, t_2) = 4,5e^{-10|t_1 - t_2|}$.

Задача оптимизации параметров регуляторов формулируется следующим образом. Требуется определить оптимальные параметры ПИД-регулятора и корректирующего устройства, обеспечивающие заданные динамические характеристики системы управления с учетом случайности двух физических параметров модели ЭГСП, которые могут рассматриваться как случайные величины. Первым случайным физическим параметром является коэффициент механической силовой отрицательной обратной связи по положению золотника электрогидравлического усилителя, обозначаемый как $k_{\text{мос}}$. Случайность данного параметра обусловлена разбросом его значений в пределах технологического допуска. От параметра $k_{\text{мос}}$ линейно зависят коэффициенты $a_1 \dots a_5$ в модели (1). Параметр $k_{\text{мос}}$ является нормально распределенной случайной величиной, для которой известны математическое ожидание $m_{k_{\text{мос}}} = 10 [H]$ и дисперсия $D_{k_{\text{мос}}} = 7.333 [H^2]$. Вторым случайным параметром является коэффициент активного сопротивления обмотки управления ЭМП, обозначаемый как R_a . Случайность данного параметра обусловлена температурой и от него линейно зависят коэффициенты $a_1 \dots a_7$ в модели (1). Случайный параметр R_a также является нормально распределенной случайной величиной, для которой известны $m_{R_a} = 80 [Om]$ и $D_{R_a} = 500 [Om^2]$. Случайные параметры $k_{\text{мос}}$ и R_a полагаются статистически независимыми.

Алгоритм оптимизации включает два этапа. На первом этапе ищутся значения параметров ПИД-регулятора k_P , k_I , k_D и корректирующего устройства k_{ϕ} , k_T , обеспечивающие наилучшее приближение выходного сигнала системы к эталонному переходному процессу $y_{\text{э}}(t)$ при условии, что параметры ЭГСП являются детерминированными. Минимизируется следующий функционал:

$$J_1(\mathbf{p}) = \left[\mathbf{C}^{x_3} - \mathbf{C}^{x_p}(\mathbf{p}) \right]^T \left[\mathbf{C}^{x_3} - \mathbf{C}^{x_p}(\mathbf{p}) \right] \quad (3)$$

где \mathbf{C}^{x_3} – проекционная характеристика эталонного переходного процесса $x_3(t)$; $\mathbf{C}^{x_p}(\mathbf{p})$ – расчетная проекционная характеристика переходного процесса $x_p(t, \mathbf{p}) = \bar{x}(t)$, вычисленная по проекционной модели [1] эквивалентной детерминированной системы для некоторых значений параметров регулятора (элементов вектора \mathbf{p}); T – знак транспонирования.

В рассматриваемом примере вектор \mathbf{p} будет состоять из пяти элементов: $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5)$, где $p_1 = k_{II}$, $p_2 = k_{HI}$, $p_3 = k_D$, $p_4 = k_\phi$, $p_5 = k_T$.

Минимизация функционала (3) выполнялась методом Нелдера-Мида при начальных значениях $k_{II} = 1$, $k_{HI} = 0$, $k_D = 0$, $k_\phi = 0$, $k_T = 0$. Результат представлен на рис. 1(а), где кривая 1 – желаемый сигнал $x_3(t)$, кривая 2 – расчетный сигнал $x_p(t)$ до минимизации функционала (3). При этом были найдены следующие значения параметров регулятора и корректирующего устройства: $k_{II} = 2,7$, $k_{HI} = 0,0031$, $k_D = 0,0107$, $k_\phi = 9e-11$, $k_T = 0,04$ представлена на рис. 1(б), где кривая 1 – желаемый сигнал $x_3(t)$, кривая 2 – расчетный сигнал $x_p(t)$ после минимизации функционала(3).

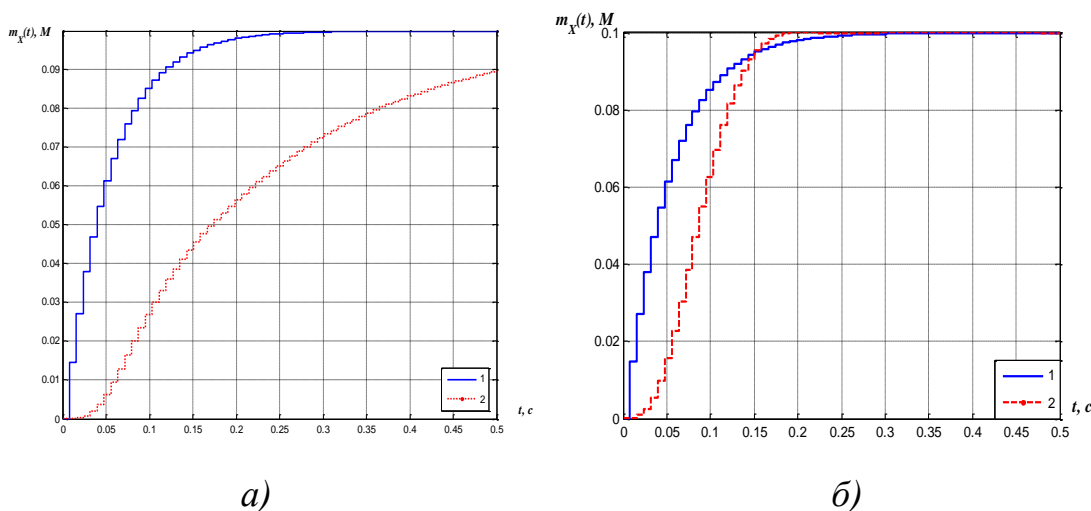


Рис. 1. Выходной сигнал ЭГСП

а) до первого этапа оптимизации; б) после первого этапа оптимизации

На втором этапе выполняется повторная оптимизация параметров регулятора с учетом влияния случайности параметров системы путем минимизации функционала:

$$J_2(\mathbf{p}) = \left[\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \left[c_{ij}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p}) \right]^2 \right]^{1/2} + \left[\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \left[c_{ij}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p}) \right]^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

где $c_{ij}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p})$ и $c_{ij}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p})$ – элементы квадратных матриц $\mathbf{C}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p})$ и $\mathbf{C}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p})$, определяемых, соответственно, как

$$\mathbf{C}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p}) = \mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p}) \left[\mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p}) \right]^T - \mathbf{C}^{m_{\bar{x}}} \left(\mathbf{C}^{m_{\bar{x}}} \right)^T, \quad \mathbf{C}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p}) = \mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p}) - \mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}},$$

где $\mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p})$ – проекционная характеристика математического ожидания выходного сигнала стохастической системы; $\mathbf{C}^{m_{\bar{x}}}$ – проекционная характеристика математического ожидания выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы с параметрами регулятора $\bar{\mathbf{p}}$; $\mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p})$ – проекционная характеристика корреляционной функции выходного сигнала стохастической системы; $\mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}}$ – проекционная характеристика корреляционной функции выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы с параметрами регулятора $\bar{\mathbf{p}}$.

На втором этапе искались значения k_{II} , k_{II} , k_D , k_{ϕ} , k_T с учетом случайности двух физических параметров $k_{мос}$ и R_a путем минимизации функционала (4) тем же методом при начальных значениях $k_{II} = 2,7$, $k_{II} = 0,0031$, $k_D = 0,0107$, $k_{\phi} = 9e - 11$, $k_T = 0,04$ найденных на первом этапе. В результате были найдены следующие значения оптимальных параметров ПИД-регулятора и корректирующего устройства при условии, что случайным является только один параметр $k_{мос}$: $k_{II} = 2,678$, $k_{II} = 1,36e - 04$, $k_D = 0,0084$, $k_{\phi} = 1,0025e - 10$, $k_T = 0,0645$ и при условии, что случайным является только один параметр R_a : $k_{II} = 2,7107$, $k_{II} = 1,19e - 05$, $k_D = 0,0139$, $k_{\phi} = 1,72e - 10$, $k_T = 0,055$. Затем были найдены значения оптимальных параметров ПИД-регулятора и корректирующего устройства при условии, что оба параметра $k_{мос}$ и R_a являются случайными: $k_{II} = 2,625$, $k_{II} = 8,53e - 09$, $k_D = 0,0026$, $k_{\phi} = 1,6e - 10$, $k_T = 0,095$.

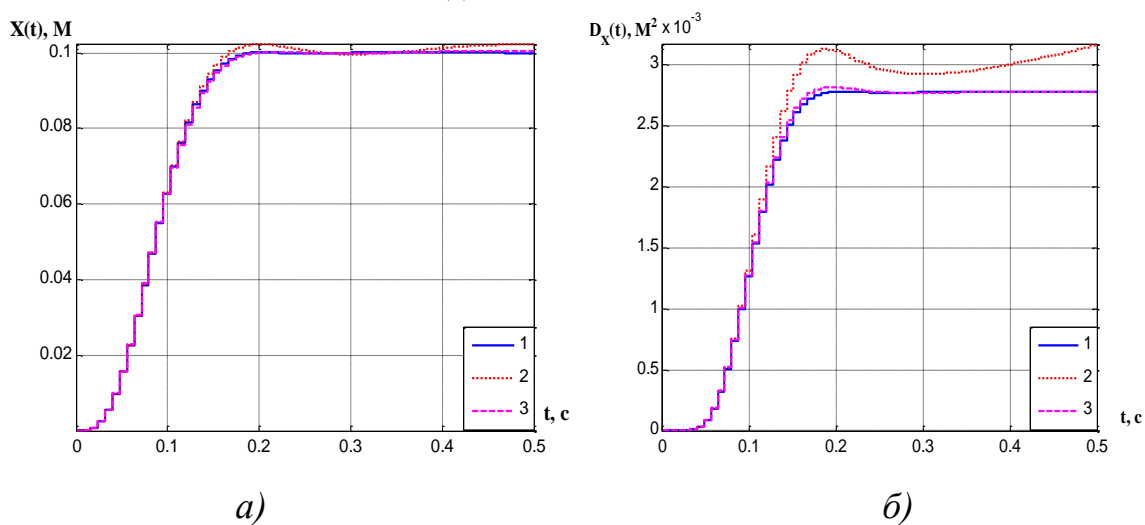


Рис. 2.

а) математическое ожидание выходного сигнала при случайном $k_{мос}$

б) дисперсия выходного сигнала при случайном $k_{мос}$

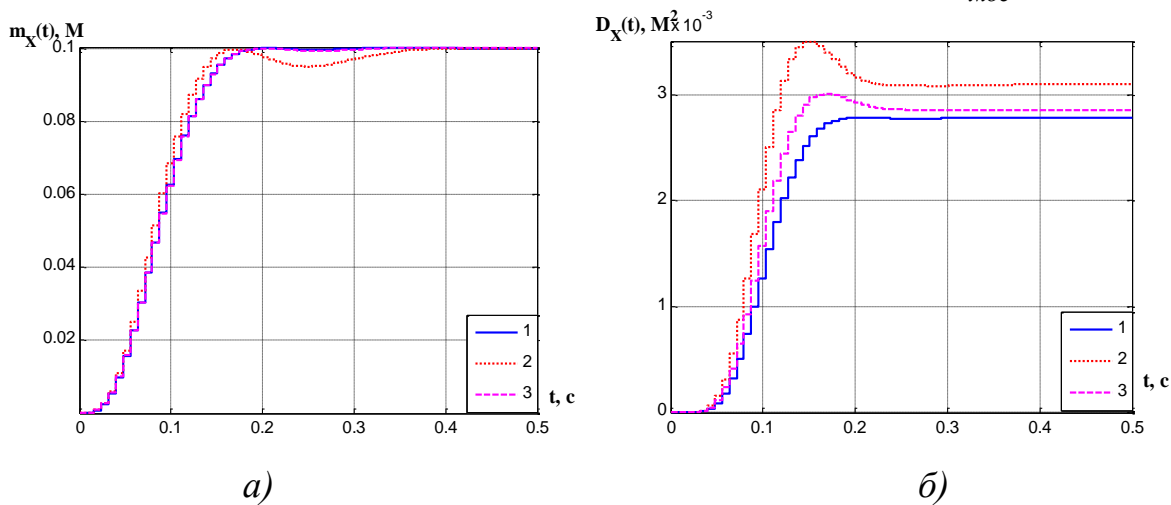


Рис. 3.

а) математическое ожидание выходного сигнала при случайном R_a

б) дисперсия выходного сигнала при случайном R_a

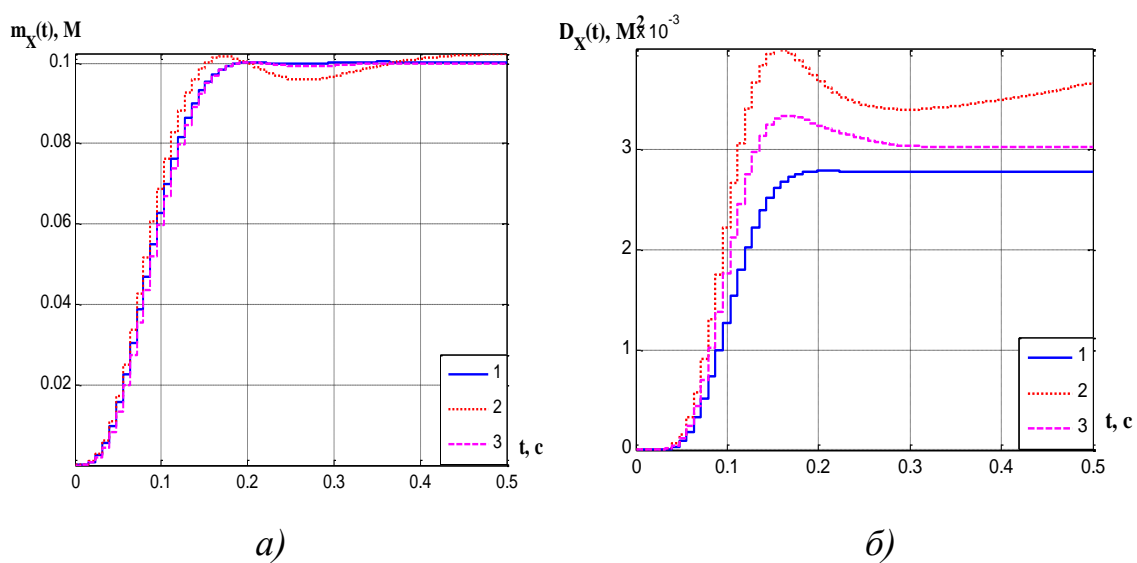


Рис. 4.

а) математическое ожидание выходного сигнала при случайном $k_{мос}$ и R_a

б) дисперсия выходного сигнала при случайном $k_{мос}$ и R_a

Результаты второго этапа оптимизации параметров ПИД-регулятора и корректирующего устройства представлены на рис. 2, рис. 3 и рис.4 (1 – детерминированная модель ЭГСП после первого этапа оптимизации; 2 – стохастическая модель ЭГСП с параметрами, найденными на первом этапе оптимизации; 3 – стохастическая модель ЭГСП после второго этапа оптимизации).

Из графиков рис.2(а), рис.3(а) и рис.4(а) видно, что на втором этапе оптимизации удалось улучшить качество переходного процесса по математическому ожиданию (кривая 3 по сравнению с кривой 2), приблизив его к переходному процессу эквивалентной детерминированной системы (кривая 1). Кроме того, график рис.2(б), рис.3(б) и рис.4(б) демонстрирует эффект уменьшения дисперсии выходного сигнала в установившемся режиме (кривая 3 по сравнению с кривой 2). Видно, что дисперсия выходного сигнала приближаются к дисперсии выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы (кривая 1).

Таким образом, рассмотрен пример применения метода оптимизации параметров последовательных корректирующих устройств систем автоматического управления [4], позволяющий учесть влияние случайного разброса параметров объекта управления. По сравнению с традиционным подходом к синтезу последовательных корректирующих устройств, предлагаемый метод обеспечивает лучшее качество регулирования и, как следствие, более высокую точность работы системы управления в целом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект № 16-41-400701).

Список литературы

[1] Тин Эй Чжо, Макаренков А.М., Тун Тун Чжо, Широкова З.Г. Оптимизация параметров регуляторов стохастических систем // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 4-1. – С. 70-76;

Тин Эй Чжо – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tinayekyaw87@gmail.com

Тун Тун Чжо – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: htaminnyaw@gmail.com

Макаренков А.М. – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru

Н.В. Лохмачев, М.О. Корлякова, Д.С. Трушков, О.И. Савина

ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ВИРТУАЛЬНОЙ КАМЕРЫ И ФОРМИРОВАНИЮ СНИМКА ВИРТУАЛЬНЫЙ СЦЕНЫ В MATLAB

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Виртуальная камера используется во всех сложных программах по моделированию объектов, более подробного изучения сложных объёмных графиков, кроме того в последнее время остро встала проблема съёмки и анализа кадра для правильной работы современных роботов и систем автоматического пилотирования автомобилей и беспилотных летательных аппаратов. В математическом пакете MatLab виртуальная камера реализована в форме объекта, но для нее не реализована модель дискретизации и физического формирования изображений как это происходит в реальных системах, поэтому возникает задача моделирования не только геометрической составляющей камеры, но и ее свойств как физического датчика.

Рассмотрим особенности функционирования камеры в виртуальной сцене:

- Камера смотрит на виртуальную сцену из некоторой позиции.
- Камера может снять эту сцену (т.е. необходимым разрешением сохранить цветную картинку под заданным ракурсом с заданной моделью камеры).
- Камера формирует файл результата (фото или видео)

Задачи, которые необходимо решить:

- Построить формальную модель камеры.
- Реализовать преобразование проектирования (определение частей объекта, которые будут проектироваться на экран и которые из них будут отсечены, как не попадающие в поле зрения (рис.1)).
- Реализовать движение камеры в сцене и интерфейс для управления ее из скриптов и через клавиатуру или компьютерную мышь.
- Реализовать процесс обработки кадра с учетом особенностей дискретизации и квантования физического сенсора.

Есть несколько методов реализации виртуальной камеры, но самым простым, доступным и удобным в использовании является метод, придуманный и реализованный ещё для первых компьютерных 3D-игр.

Важные вопросы – задание положения объекта камера в пространстве и поворот камеры относительно мировых систем координат. Для этого нужно задать объект камера и два метода к нему:

1. Процедуры перемещения камеры в мировых координатах по x, y, z (вверх- вниз, право-лево, вперёд-назад, см.рис.1)
2. Процедуры вращения куба – настойки угла, под которым куб расположен в пространстве (направление зрения).

Эти два метода удобнее реализовывать отдельно для удобства и скорости работы, так как они используют разные функции и матричные преобразования.

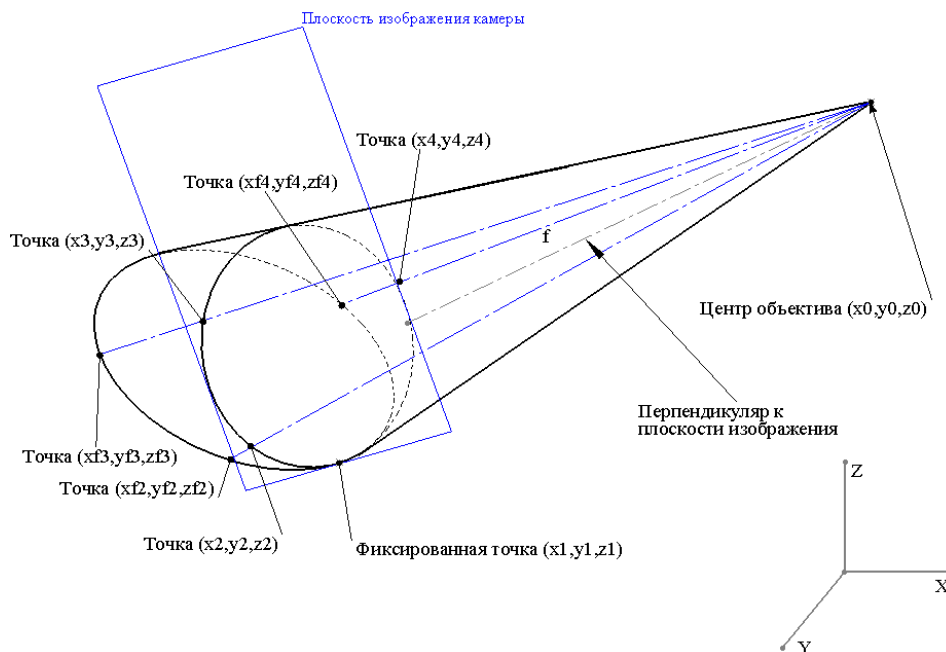


Рис. 1. Схема проецирования объекта среды в камере

Основная проблема, возникающая при создании камеры – формирование кадра, то есть проецирование видимых камерой объектов пространства на плоскость проекции (изображение, полученное на этой плоскости и будет являться кадром). Существует два основных подхода к решению этой проблемы: метод векторов и метод матричных преобразований.

Метод векторов заключается в пропускании луча через фокус линзы и пиксель на проекционной плоскости. Этот вектор пересечёт некоторые объекты сцены. После этого необходимо определить объект, который вектор пересечёт первым, определить цвет точки объекта, на которую указал вектор и закрасить пиксел на плоскости проекции в соответствующий цвет.

Плюс этого метода в том, что он позволяет легко менять формат изображения (его размер) и чёткость (количество пикселей). Минус этого метода в том, что для каждой сцены придётся проводить большое количество операций с векторами (по количеству пикселей получаемого кадра), что приводит к низкой производительности и задержке кадров. [1]

Другой подход – метод матричных преобразований: задаётся объект, привязанный к положению камеры. Этим объектом является усечённая пирамида, которая будет задавать поле зрения камеры. Задача получения изображения относится к этапу проекции, реализованному для этой пирамиды. Суть метода в том, что все объекты, лежащие внутри пирамиды (в поле зрения камеры) должны отобразиться на плоскость малого основания пирамиды. Проблема величины объектов относительно расстояния до них решается механизмами линейной алгебры с помощью матричных преобра-

зований. В результате получаем реальное изображение, спроецированное на плоскость. Далее разбиваем полученную картину на необходимое количество пикселей и выводим полученный кадр.

Плюс метода – матричные преобразования компьютером производятся достаточно быстро, что положительно скажется на скорости работы программы. Минус метода – возможная сложность матриц преобразования с точки зрения линейной алгебры.[2]

Рассмотрев возможные варианты и изучив их реализацию, выбор сделан в пользу метода матричных преобразований, исходя из скорости работы программы. Таким образом, реализовав описанные выше объекты и методы, можно получить универсальную модель камеры, удобную в использовании (с возможностью движения как по заданной кривой, определённой поверхности или клавишами управления). Реализация рассмотренных моделей производим в среде MatLab для виртуальных сцен сформированных, как сглаженные поверхности, формируемые множеством треугольников с цветом. Следует отметить, что процесс формирования изображения в виртуальной камере может быть достаточно долгим, т.к. на этапе моделирования время сцены виртуально. Таким образом, рассмотренный подход позволяет полностью учесть все особенности процесса формирования реального изображения.

Список литературы

[1] Шапиро Л. С., Дж. Стокман. Компьютерное зрение – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013, 560 с.

[2] Шикин Е. В., Боресков А. В. Компьютерная графика: полигональные модели – М.: Диалог. МИФИ, 2005, 328 с.

Лохмачев Никита Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lokhmachevnikita@gmail.com

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Трушков Дмитрий Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dim.alex@mail.ru

Савина Олеся Игоревна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mega.oliesia@inbox.ru

А.Ш. Абдурахманов, М.О. Корлякова

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ ТРЕКИНГА ПРОИЗВОЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ВО ВРЕМЕНИ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Задача трекинга объектов на видео является неотъемлемой частью многих прикладных областей, таких как построение систем видеонаблюдения, отслеживания дорожного трафика (в частности, наблюдения за определенными транспортными средствами в потоке), создание интерфейсов человек-компьютер, программ для передачи и сжатия видео и других.

При сопровождении объектов на видео необходимо обрабатывать большое количество потоковых данных, что затратно, с вычислительной точки зрения, а значит и с точки зрения затрачиваемого на обработку времени. Особенно это справедливо, если распределение положений отслеживаемого объекта не нормально, мультимодально или вообще произвольной природы.

За последние годы было предложено множество успешных подходов по решению данной задачи. Тем не менее, многие из них накладывают определенные ограничения на обрабатываемые данные, как например статичный фон и фиксированный ракурс [1], знание о типе наблюдаемого объекта [2] или даже наличие множества камер [3]. Большая часть предлагаемых подходов уделяют мало внимания возможности проводить анализ в реальном времени, хотя и некоторые из них наоборот ориентированы на строгие ограничения по ресурсам – примером последнего являются приложения в робототехнике [4].

Объектом исследования являлось отслеживание на видео объектов произвольной природы в отсутствии дополнительных предположений, таких как наличие стационарного фона при неподвижности камеры и других выше упомянутых случаев. В качестве удовлетворительной производительности рассматривалась такая, которая позволяет проводить анализ в реальном времени.

Рассмотрим отслеживание на видео объектов произвольной природы в отсутствии дополнительных предположений, таких как наличие стационарного фона при неподвижности камеры и других выше упомянутых случаев. При этом будем проводить анализ видеопотока в реальном времени, т.е. в темпе его формирования. В качестве модели трекинга будем использовать подход, который называется Сопровождение-Моделирование-Обнаружение. Этот подход сочетает адаптивное сопровождение объекта с обучением детектора объекта в процессе трекинга. [5]. После того как объект был захвачен при помощи какого-либо алгоритма захвата, траектория объекта начинает наблюдаться двумя процессами (расширяющее и урезающее события). Процессы строят детектор объекта «на лету». Оба процес-

са делают ошибки, стабильность системы достигается отменой таких событий. Обучение «на лету» и классификация производятся при помощи рандомизированного решающего леса.

Описание алгоритма. Пусть F_t и B_t – кадр видео ряда и описанный прямоугольник сопровождаемого объекта в момент времени t . Пиксели внутри прямоугольника B_t описываются вектором признаков x_t , который содержит информацию о наличии объекта сопровождения. Множество последовательных описанных прямоугольников определяет трек $T_t = \{B_0, B_1 \dots B_t\}$ длины $t+1$, который определяет траекторию объекта в пространстве изображений. T_t^f описывает соответствующую траекторию в пространстве признаков U , которое является подпространством L^* . L^* представляет все возможные состояния наблюдаемого объекта. L^* неизвестно в момент начала сопровождения, когда выбрано первое измерение $x_0 \in L^*$. Это первое измерение описывает начальное состояние модели в момент времени $t=0$: $L_0 = \{x_0\}$.

Объект сопровождается при помощи краткосрочного трекера. Траектория в пространстве признаков анализируется двумя событиями, которые непрерывно пытаются расширить или уменьшить пространство, описываемое моделью. L_t расширяется измерениями, которые скорее содержат сопровождаемый объект. Эти измерения определяются при помощи расширяющего события. Из L_t удаляются измерения, которые определены как не содержащие объект. Эти измерения определяются при помощи обрезающих событий. События работают параллельно, стремясь достичь $L_t \rightarrow L^*$ (см. рис. 1).

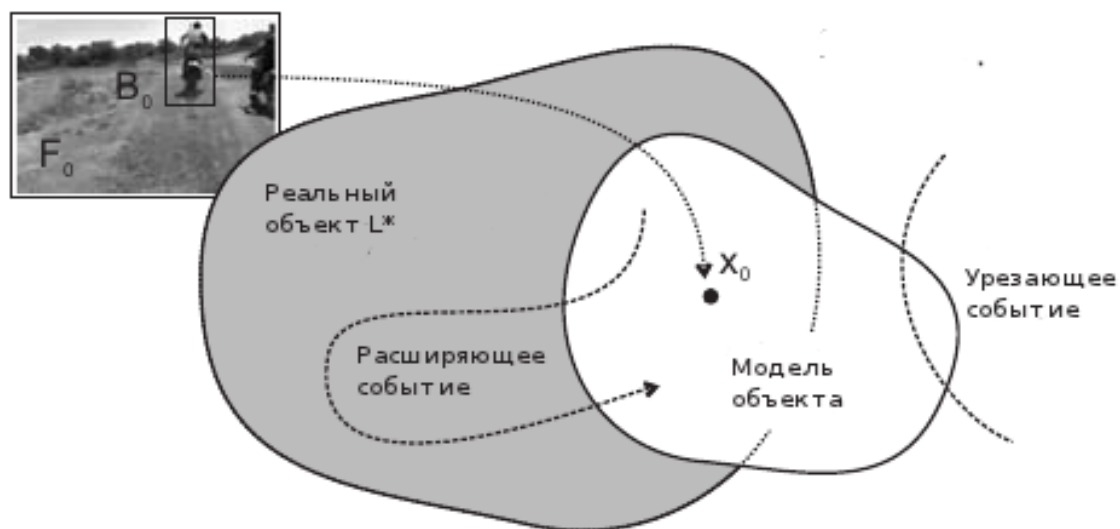


Рис. 1. Схематичное представление работы алгоритма

Главная цель построения L_t – это предоставить алгоритму память, чтобы создать детектор объекта, который непрерывно обновляется и улучшается. Алгоритм сканирует входное изображение F_t и выдаёт на выход множество описанных прямоугольников, которые содержат измерения, входящие в L_t . Эти прямоугольники описывают альтернативные гипотезы к позиции, возвращённой трекером. Слияние гипотез производится взятием позиции, которая минимизирует расстояние до L_t . Отсюда следует, что если положение от трекера очень близко к L_t , то ложные отклики детектора не влияют на трек (пока они не станут ещё ближе к L_t , чем позиция от трекера). Минимальное расстояние до L_t становится очками недоверия к результату, выданному алгоритмом. Опираясь на эти очки, алгоритм решает, виден объект или нет.

Краткосрочный трекер. Мы различаем две части L_t : правильную часть $L_t^c \subset L^*$ и ошибочную часть $L_t^e \not\subset L^*$, $L_t^c \cup L_t^e = L_t$, $L_t^c \cap L_t^e = \emptyset$. *Покрываемость (coverage)* является долей измерений с объектом уже открытых неконтролируемым процессом обучения, т.е. $coverage(L_t) = |L_t^c| / |L^*|$. *Примесью (impurity)* называется доля L_t , которая неверна, т.е. $impurity(L_t) = |L_t^e| / |L^*|$. Оператор $|\cdot|$ обозначает размер множества.

Расширяющие события. В момент времени t краткосрочный трекер создал траекторию $T_t^f = \{x_0, x_0 \dots x_t\}$. Расширяющее событие сначала выбирает определённую часть траектории, которая рассматривается положительной, $P \subset T_t^f$. Модель объекта L_t затем обновляется, т.е. $L_t = L_{t-1} + P$. После этого обновления покрытие модели увеличивается, если P содержит хотя бы одно измерение из L^* . Стратегию выбора части траектории обсудим несколько ниже.

Обрезающие события. Невозможно придумать стратегию выбора, которая бы выбирала только верные измерения. По этой причине примесь L_t постоянно увеличивается. Так как нашей целью является условие $L_t \rightarrow L^*$, то события, уменьшающие примесь модели, являются необходимыми. Если модель характеризуется определённым уровнем примеси, обрезающее событие необходимо, чтобы идентифицировать подмножество N , которое рассматривается как некорректное и удалить его из модели, т.е. $L_t = L_{t-1} - N$.

Расширяющие события в одиночку приводят к высокому уровню примеси и, следовательно, к детектору низкой точности. Обрезающие события служат отрицательной обратной связью: чем выше уровень примесей, тем больше измерений в модели определяются как неверные и удаляются. Динамическое взаимодействие расширяющих и обрезающих событий является

решающим в придании системы стабильности. Используемая мера качества. Для определения совпадения выделенного нами региона с реальным, нужно учитывать не только то, насколько близок центр рассчитанного нами выделения к реальному центру отслеживаемого объекта, но и то, насколько велика разница между реальными и вычисленными размерами объекта.

Реализация и анализ результатов. Для экспериментов в данной работе использовалась мера качества, предложенная в [6], определяющая долю пересечения двух областей в их объединении. Обнаружение считается правильным, если его перекрытие с истинным ограничивающим прямоугольником было больше 25% (см. рис. 2).

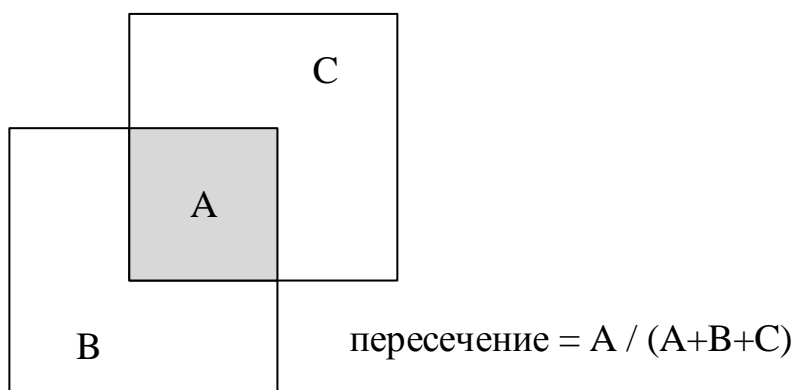


Рис. 2. Мера качества – доля пересечения регионов в их объединении

Эффективность алгоритма отслеживания оценивается, используя показатели точности P , отзыва R и f -меры F .

P - количество истинных положительных результатов, деленное на количество всех ответов, R - число истинных положительных значений, деленное на количество появлений объектов, которые должны были быть обнаружено. F объединяет эти две меры как $F = 2PR / (P + R)$.

Рассмотрим реализацию алгоритма в вычислительной среде следующего состава:

- Intel core i7 - 4770k
- Windows 7 64-bit
- Matlab 2017b

Отслеживаемые треки содержат видеопоток длительностью 130с. Размер кадра составляет 470x310. Анализ видеофрагмента движения автомобиля в дорожном потоке, включающего перекрытия объекта и пропадание объекта из кадра, потребовал 131с., что отвечает основному требованию к скорости обработки. Результаты анализа качества трекинга: показатель точности P : 92%; показатель отзыва R : 97%; показатель f -меры F : 94%

Список литературы

[1] Li H., Xiong S., Duan P., Kong X. Multitarget tracking of pedestrians in videosequences based on particle filters // Adv.MultiMedia – 2012. Vol. 6, №.1, – P. 32–47.

[2] Samuelsson O. Video Tracking Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle Surveillance. – 2012.

[3] Xu M., Orwell J., Jones G. Tracking football players with multiple cameras // IEEE International Conference on Image Processing, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos. – 2004. – P. 2909–2912.

[4] Fox D., Thrun S., Dellaert F., Burgard W. Particle filters for mobile robot localization // Sequential Monte Carlo Methods in Practice – New York: Springer Verlag, – 2000.

[5] Zdenek K., Mikolajczyk K., Matas J. Tracking-Learning-Detection // IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence, – 2010. Vol. 6, №.1, – P. 1–17.

[6] Klein D. A., Schulz D., Frintrop S., Cremers A. B. Adaptive real-time video-tracking for arbitrary objects // IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), – 2010. – P. 772–777.

Абдурахманов Акмал Шавкатович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: articles.ash@gmail.com

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Е.Ю. Корлякова, М.О. Корлякова, А.Н. Вишнякова

ПОСТРОЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕНЫ В СРЕДЕ MATLAB

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Задача построения объемной виртуальной сцены важна при моделировании автоматических мобильных систем на этапе отладки алгоритмов определения маршрута движения и выделения нужных или опасных объектов. Решение этой задачи актуально и в системах дополненной реальности, где происходит наложение реальных сцен и объектов на виртуальные. Моделирование сложных цветных трехмерных сцен поддерживается языками типа VRML ((Virtual Reality Modeling Language) [1], который определяет виртуальный мир через примитивы. Существует множество приложений и библиотек функций для различных систем программирования, поддерживающих формат описания сцен VRML. Например, в среде MatLab для разработки виртуальных сцен используют пакет Virtual Reality Toolbox, что вместе с расширением Simulink позволяет моделировать изменение систем во времени и пространстве на визуальном уровне. Однако, библиотека доступных функций позволяет использовать только определенный набор графических примитивов [2]. В MatLab нет специальных функций для моделирования сложных поверхностей, не определенных конкретными уравнениями и графическими примитивами. С другой стороны, в современных версиях среды моделирования MatLab широко представлены средства создания систем технического зрения и моделирования автопилотов (пакеты Computer Vision Toolbox и Automated Driving System Toolbox[3]), для которых формирование полностью измеряемой сцены с виртуальной камерой позволит оценить основные алгоритмы и принятые параметры системы технического зрения до ее аппаратной реализации. С этой точки зрения виртуальная сцена должна обладать следующими свойствами:

- легко формироваться пользователем в виде визуального конструктора,
- обладать возможностями создавать неподвижные и подвижные объекты,
- формировать ландшафты подобные естественным структурам: горы, лес и т.п.,
- не требовать значительных ресурсов для отображения и хранения.

Это приводит к необходимости расширить множество примитивов доступных в VRML и перейти к разработке дополнительной библиотеки функций MatLab ориентированной на задачи моделирования, а не визуализации.

Рассмотрим моделирование поверхности на основе массива входных данных – цветовой карты вида сверху, обозначающей высоту поверхности в конкретной области и наличие других деталей рельефа, таких как лес или дорога. В общем случае для построения нужной модели используется

набор масок, каждая из которых определяет свой собственный слой: высота поверхности в данной области; дорога; расположение леса или озера; дом, человек или встречный автомобиль.

При этом поверхность не может быть гладкой, для географически реалистичной сцены необходимо создание неровностей, пример на рисунке 1.

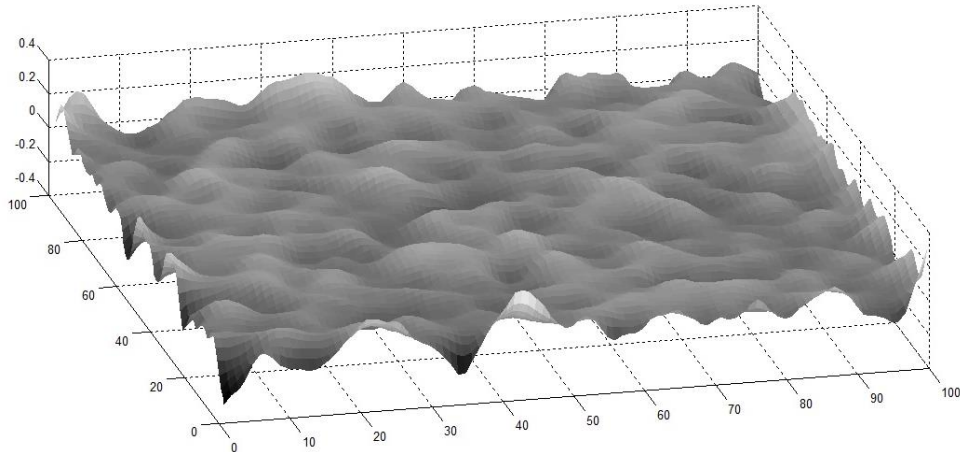


Рис. 1. Генерация поверхности со случайным расположением холмов и впадин

Принцип обработки первичных данных для создания модели виртуальной сцены. Происходит чтение файла с картинкой высот, рисунок 2, в качестве текстового файла с записью цвета пикселей определенным кодом, которые будут соответствовать определенной высоте поверхности от 0 – белый, до 1 – черный. На рисунке 3 показана получившаяся упрощенная модель и результат использования процедуры создания неровностей и сглаживания модели.

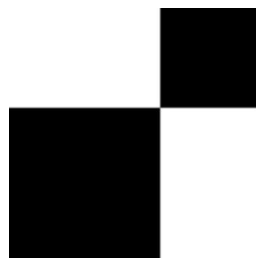


Рис. 2. Карта высот

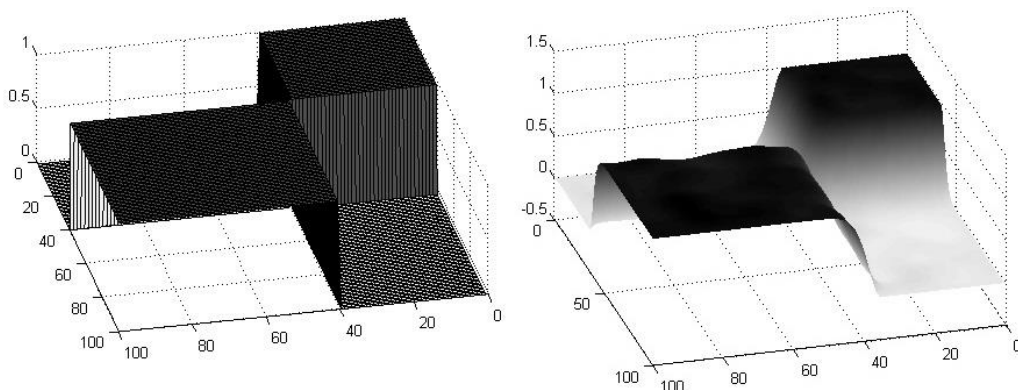


Рис. 3. Пример выполнения программы и создания сглаженной поверхности

В такой модели основным фактором является высота определенной области, тогда как образование неровностей – процесс случайный и, что важно, не меняющий общую картину и среднюю высоту на участке.

Формирование поверхности состоит из двух этапов:

1. присвоение точкам плоской матрицы $[X, Y]$ нового значения по высоте Z как суммы старого значения и малого приращения dZ , определяемого с использованием функции генерации случайного равномерно распределенного числа,

2. изменение значений высоты Z для точек в окрестностях выбранной поверхности для визуализации.

Параметры изменения dZ зависят от типа поверхности. Так, например, для поверхности “равнина” dZ мало и может принимать как положительные, так и отрицательные значения, а для поверхности “горы” dZ намного больше и строго положительно.

Второй этап представляет собой осреднение значения Z точки в зависимости от высоты окружающих точек и сам в свою очередь состоит из n повторений этого процесса. При $n = 1$, т.е. после однократного прохождения по матрице $[X, Y]$, поверхность образуется системой крупных полигонов, а с увеличением n растет мелкость их разбиения и, соответственно, количество полигонов, что ведет к зрительному сглаживанию поверхности, рисунок 4.

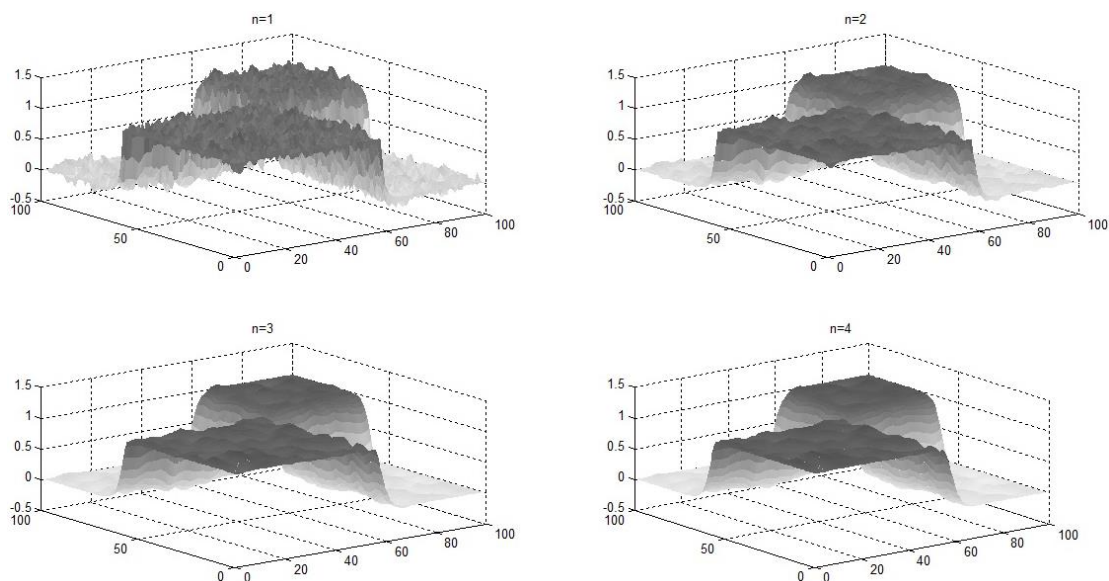


Рис. 4. Сглаживание при разном количестве итераций n

Данный метод позволяет создавать сложные виртуальные сцены аналогичные естественным образованиям, рисунок 5, моделировать детали рельефа, например, горы, и, используя в качестве моделей соответствующие матрицы, дополнять полученную статичную виртуальную сцены другими элементами, в том числе, изменяющими свое положение со временем. Это позволит построить сцены высокой сложности с произвольными деталями ландшафтов.

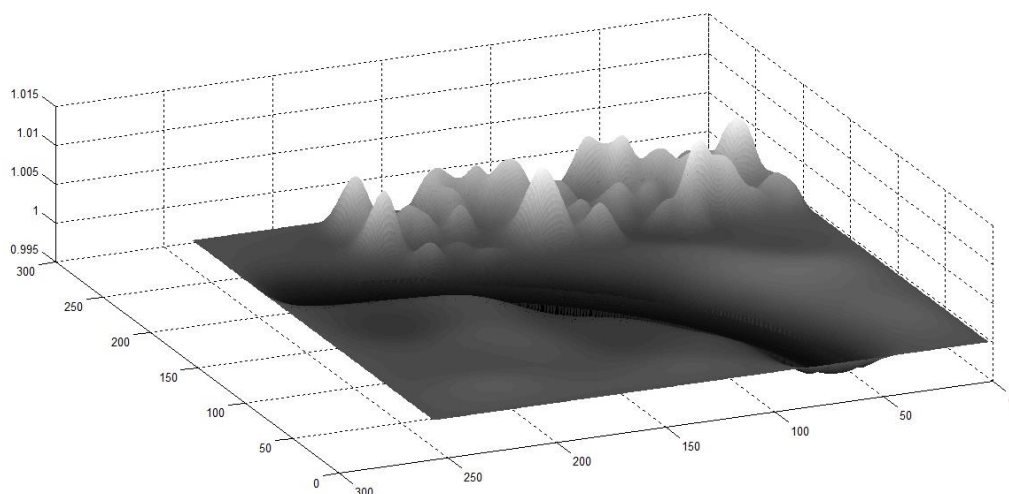


Рис. 5. Пример моделирования визуальной сцены

Список литературы

[1] Еремин Е.А. Язык трехмерного моделирования VRML и его образовательные возможности. Часть 1. Любуемся результатами технологии VRML. // Информатика (газета Издательского дома "Первое сентября"), 2008, N 2, с.2-10.

[2] MATLAB FOR STUDENTS// [Электронный ресурс] URL:https://matlab.ru/upload/Konkursy/2017-teacher-01-MATLAB_FOR_STUDENTS.pdf (дата обращения: 10.10.2017)

[3] Automated Driving System Toolbox//[Электронный ресурс] URL: <https://matlab.ru/products/automated-driving-system-toolbox>(дата обращения : 10.10.2017)

Корлякова Екатерина Юльевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: korliakova.ekaterina@yandex.ru

Корлякова Мария Олеговна – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Вишнякова Анастасия Николаевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nastya-vishnya2011@mail.ru

ПРИНЦИП АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ СЛУЧАЙНОСТИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Случайность параметров системы управления может оказывать существенное влияние на качество управления. В работе предлагается подход к решению задачи активной компенсации случайности физических параметров систем управления в смысле формирования такого входного сигнала, который минимизирует влияние случайности параметров системы на ее выходной сигнал.

Математическая модель системы управления в линейном приближении описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\sum_{i=0}^n a_i \left(d^i / dt^i \right) x(t) = \sum_{j=0}^m b_j \left(d^j / dt^j \right) y(t) \quad (1)$$

где $y(t)$ – входной сигнал, $x(t)$ – выходной сигнал. Предполагается, что все или некоторые коэффициенты a_i , b_j являются случайными величинами, определяемыми как

$$a_i = m_{a_i} + \tilde{a}_i, \quad i = \overline{0, n-1}, \quad b_j = m_{b_j} + \tilde{b}_j, \quad j = \overline{0, m} \quad (2)$$

где m_{a_i} , m_{b_j} – математические ожидания; \tilde{a}_i , \tilde{b}_j – центрированные гауссовы случайные величины. Считается также, что система физически реализуема, то есть выполняется условие $n \geq m$, и статистическая связь между входным сигналом и случайными коэффициентами отсутствует.

Для решения поставленной задачи целесообразно перейти от непрерывной модели (1) к усредненной проекционной модели [2]. В результате проекционной аппроксимации непрерывной модели (1), выполняемой с использованием методов теории матричных операторов [1], имеем следующую проекционную модель:

$$\mathbf{C}^x = (\bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}) \mathbf{C}^y \quad (3)$$

где $\bar{\mathbf{A}}$ – детерминированный матричный оператор; $\tilde{\mathbf{A}}$ – стохастический матричный оператор; \mathbf{C}^x и \mathbf{C}^y – проекционные характеристики сигналов.

Матричные операторы $\bar{\mathbf{A}}$ и $\tilde{\mathbf{A}}$ в (3) определяются следующим образом:

$$\bar{\mathbf{A}} = (\mathbf{I} + \bar{\mathbf{A}}_x)^{-1} \bar{\mathbf{A}}_y, \quad \tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A}_{x0} \left(\sum_{v=1}^k (-1)^v (\tilde{\mathbf{A}}_x \mathbf{A}_{x0})^v \bar{\mathbf{A}}_y + \sum_{v=0}^k (-1)^v (\tilde{\mathbf{A}}_x \mathbf{A}_{x0})^v \tilde{\mathbf{A}}_y \right),$$

$$\mathbf{A}_{x0} = (\mathbf{I} + \bar{\mathbf{A}}_x)^{-1}; \quad \bar{\mathbf{A}}_x = \sum_{i=0}^{n-1} m_{a_i} (\mathbf{P}^{n-i})^T; \quad \bar{\mathbf{A}}_y = \sum_{j=0}^m m_{b_j} (\mathbf{P}^{n-j})^T; \quad \tilde{\mathbf{A}}_x = \sum_{i=0}^{n-1} \tilde{a}_i (\mathbf{P}^{n-i})^T;$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_y = \sum_{j=0}^m \tilde{b}_j (\mathbf{P}^{n-j})^T; \quad \mathbf{P} - \text{матричный оператор интегрирования [1].}$$

Усреднение выражения (3) позволяет получить усредненную проекционную модель, определяющую проекционные характеристики математического ожидания и корреляционной функции выходного сигнала:

$$\mathbf{C}^{m_x} = \mathbf{M} \left[(\bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}) \right] \mathbf{C}^{m_y} \quad (4)$$

$$\mathbf{C}^{R_{xx}} = \mathbf{M} \left[(\bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}) \left(\mathbf{C}^{R_{yy}} + \mathbf{C}^{m_y} (\mathbf{C}^{m_y})^T \right) (\bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}})^T \right] - \mathbf{C}^{m_x} (\mathbf{C}^{m_x})^T \quad (5)$$

где $\mathbf{M}[\cdot]$ – оператор математического ожидания.

По проекционным характеристикам \mathbf{C}^{m_x} и $\mathbf{C}^{R_{xx}}$ можно приближенно восстановить функции математического ожидания $m_x(t)$ и корреляции $R_{xx}(t_1, t_2)$. При этом проекционные характеристики математического ожидания $m_y(t)$ и корреляционной функции $R_{yy}(t_1, t_2)$ входного сигнала на интервале исследования T определяются, соответственно, как

$$\mathbf{C}^{m_y} = \int_0^T m_y(\tau) \Phi(\tau) d\tau; \quad \mathbf{C}^{R_{yy}} = \int_0^T \int_0^T R_{yy}(\tau_1, \tau_2) \Phi(\tau_1) \Phi^T(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2.$$

Из (4) и (5) следует вывод об аддитивном характере влияния фактора случайности параметров стохастической системы на статистические характеристики ее выходного сигнала, то есть:

$$\mathbf{C}^{m_x} = \mathbf{C}^{\bar{m}_x} + \mathbf{C}^{\tilde{m}_x}, \quad \mathbf{C}^{R_{xx}} = \mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}} + \mathbf{C}^{\tilde{R}_{xx}},$$

$$\text{где } \mathbf{C}^{\bar{m}_x} = \bar{\mathbf{A}} \mathbf{C}^{m_y}; \quad \mathbf{C}^{\tilde{m}_x} = \mathbf{M}[\tilde{\mathbf{A}}] \mathbf{C}^{m_y}; \quad \mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}} = \bar{\mathbf{A}} \mathbf{C}^{R_{yy}} \bar{\mathbf{A}}^T; \quad \mathbf{C}^{\tilde{R}_{xx}} = \bar{\mathbf{A}} \mathbf{C}^{R_{yy}} \mathbf{M}[\tilde{\mathbf{A}}^T] + \\ + \mathbf{M}[\tilde{\mathbf{A}}] \mathbf{C}^{R_{yy}} \bar{\mathbf{A}}^T + \mathbf{M}[\tilde{\mathbf{A}} \mathbf{C}^{R_{yy}} \tilde{\mathbf{A}}^T] + \mathbf{M}[\tilde{\mathbf{A}} \mathbf{C}^{m_y} (\mathbf{C}^{m_y})^T \tilde{\mathbf{A}}^T] - \mathbf{M}[\tilde{\mathbf{A}}] \mathbf{C}^{m_y} (\mathbf{C}^{m_y})^T \mathbf{M}[\tilde{\mathbf{A}}^T]$$

Таким образом, статистические характеристики выходного сигнала стохастической системы определяются как

$$m_x^l(t) = \Phi^T(t) \mathbf{C}^{m_x} = \Phi^T(t) (\mathbf{C}^{\bar{m}_x} + \mathbf{C}^{\tilde{m}_x}) = \bar{m}_x^l(t) + \tilde{m}_x^l(t) \quad (6)$$

$$R_{xx}^l(t_1, t_2) = \Phi^T(t_1) \mathbf{C}^{R_{xx}} \Phi(t_2) = \Phi^T(t_1) (\mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}} + \mathbf{C}^{\tilde{R}_{xx}}) \Phi(t_2) = \bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2) + \tilde{R}_{xx}^l(t_1, t_2) \quad (7)$$

Далее рассмотрим первый поход к решению задачи активной компенсации, обеспечивающий приближение $m_x^l(t)$ и $R_{xx}^l(t_1, t_2)$ к $\bar{m}_x^l(t)$ и $\bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2)$ соответственно.

Задача компенсации по математическому ожиданию может быть сведена к решению обратной задачи динамики в статистической постановке. Для этого введем понятие усредненного матричного оператора стохастиче-

ской системы, представляющего собой матрицу математического ожидания стохастического оператора $\mathbf{A} = \bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}$:

$$\mathbf{m}_A = M\left[\left(\bar{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}\right)\right] = \bar{\mathbf{A}} + M\left[\tilde{\mathbf{A}}\right]$$

Тогда, предполагая обратимость матрицы \mathbf{m}_A , можно записать следующее соотношение:

$$\mathbf{C}^{cor m_y} = \left(\mathbf{m}_A\right)^{-1} \mathbf{C}^{\bar{m}_x}$$

которое, является формальным в том смысле, что не позволяет решить сформулированную в таком виде обратную задачу на практике, поскольку оператор $\left(\mathbf{m}_A\right)^{-1}$ фактически является дифференциальным оператором, соответствующим физически нереализуемой системе. Обойти данную проблему можно, обратившись к понятию реального дифференцирующего звена. Данное звено описывается дифференциальным уравнением $T_D x' + x = y'$, которому соответствует проекционная модель $\mathbf{C}^x = \left(T_D \cdot \mathbf{I} + \mathbf{P}\right)^{-1} \mathbf{C}^y$, где матрица $\left(T_D \cdot \mathbf{I} + \mathbf{P}\right)^{-1}$ представляет собой матричный оператор реального дифференцирующего звена (реальный оператор дифференцирования).

Вычисляя матричные операторы $\bar{\mathbf{A}}$ и $\tilde{\mathbf{A}}$ по формулам, в которых оператор интегрирования \mathbf{P} заменен оператором $\mathbf{P}^* = T_D \cdot \mathbf{I} + \mathbf{P}$, можно вычислить оператор \mathbf{m}_A^* , заменяющий оператор \mathbf{m}_A в вышеприведенном формальном соотношении, и вычислить искомое математическое ожидание скорректированного входного сигнала как

$${}_{cor} m_y^l(t) = \Phi^T(t) \left(\mathbf{m}_A^*\right)^{-1} \mathbf{C}^{\bar{m}_x} \quad (8)$$

Следующим этапом является определение корреляционной функции скорректированного входного сигнала. Из соотношения (7) видно, что для компенсации его второго слагаемого $\tilde{R}_{xx}^l(t_1, t_2)$ можно заменить $\bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2)$ на функцию $\bar{R}_{\Delta}^l(t_1, t_2) = \bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2) - \tilde{R}_{xx}^l(t_1, t_2)$, то есть

$$R_{xx}^l(t_1, t_2) = \bar{R}_{\Delta}^l(t_1, t_2) + \tilde{R}_{xx}^l(t_1, t_2) \approx \bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2) \quad (9)$$

где скорректированную корреляционную функцию выхода эквивалентной детерминированной системы можно также определить как

$$\bar{R}_{\Delta}^l(t_1, t_2) = 2\bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2) - R_{xx}^l(t_1, t_2) \quad (10)$$

то есть без необходимости отдельного вычисления $\tilde{R}_{xx}^l(t_1, t_2)$.

При выполнении практических расчетов выражение (10) целесообразно модифицировать следующим образом:

$$\bar{R}_{\Delta}^l(t_1, t_2) = k_l \left(\bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2) - k_d \left(R_{xx}^l(t_1, t_2) - \bar{R}_{xx}^l(t_1, t_2) \right) \right) \quad (11)$$

где коэффициенты $k_l \leq 1$ и $k_d \leq 1$ определяют уровень и глубину компенсации, обеспечивая выполнение условий положительной определенности функции $\bar{R}_\Delta^l(t_1, t_2)$ и физической реализуемости скорректированного входного сигнала.

Корреляционная функция скорректированного входного сигнала может быть найдена в результате решения следующей обратной задачи для эквивалентной детерминированной системы:

$${}_{cor}R_{yy}^l(t_1, t_2) = \Phi^T(t_1) (\bar{\mathbf{A}}^*)^{-1} \mathbf{C}^{R_\Delta} \left((\bar{\mathbf{A}}^*)^T \right)^{-1} \Phi(t_2) \quad (12)$$

где $\mathbf{C}^{R_\Delta} = \int_0^T \int_0^T \bar{R}_\Delta^l(\tau_1, \tau_2) \Phi(\tau_1) \Phi^T(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2$; $\bar{\mathbf{A}}^*$ – матричный оператор, вы-

числяемый с использованием оператора интегрирования \mathbf{P}^* , как это делалось выше для матричного оператора \mathbf{m}_A^* . При этом постоянная времени T_D также выбирается достаточно малой, но такой, чтобы не нарушалось условие положительной определенности найденной функции ${}_{cor}R_{yy}^l(t_1, t_2)$.

Рассмотрим еще один подход к активной компенсации случайности параметров системы, основанный на анализе выражения

$$\mathbf{C}^{R_{xx}} = M \left[\mathbf{A} \mathbf{C}^{R_{yy}} \mathbf{A}^T \right] + M \left[\mathbf{A} \mathbf{C}^{m_y} \left(\mathbf{C}^{m_y} \right)^T \mathbf{A}^T \right] - \mathbf{C}^{m_x} \left(\mathbf{C}^{m_x} \right)^T$$

(другая форма выражения (5)) из которого видно, что влияние ненулевого математического ожидания обусловлено вторым и третьим слагаемым в его правой части. Идея компенсации этого влияния состоит во введении матрицы умножителя на некоторую функцию $f(t)$ (матричный оператор умножения \mathbf{A}^f) в первое слагаемое указанного выражения, то есть

$$\mathbf{C}^{R_{xx}} = M \left[\mathbf{A} \mathbf{A}^f \mathbf{C}^{R_{yy}} \left(\mathbf{A}^f \right)^T \mathbf{A}^T \right] + M \left[\mathbf{A} \mathbf{C}^{m_y} \left(\mathbf{C}^{m_y} \right)^T \mathbf{A}^T \right] - \mathbf{C}^{m_x} \left(\mathbf{C}^{m_x} \right)^T, \quad (13)$$

что соответствует введению умножителя в цепь случайной составляющей входного сигнала системы. Далее случайная $(\tilde{y}(t) \cdot f(t))$ и детерминированная $(\bar{y}(t))$ составляющие поступают на вход сумматора, формирующего смешанный входной сигнал $y(t)$.

Уменьшение среднего уровня дисперсии выходного сигнала системы, обусловленное действием умножителя \mathbf{A}^f , компенсируется добавлением к входному сигналу второй случайной составляющей $\tilde{y}^*(t)$ в виде случайного процесса, некоррелированного с первой случайной составляющей $\tilde{y}(t)$ и имеющего корреляционную функцию того же вида, но с дополнительным коэффициентом k . Например, если корреляционная функция слу-

чайной составляющей входного сигнала имеет вид $R_{\tilde{y}\tilde{y}}(t_1, t_2) = De^{-b|t_1-t_2|}$, то корреляционная функция второй случайной составляющей $y^*(t)$ будет определяться как

$$R_{\tilde{y}^*y^*}(t_1, t_2) = kDe^{-b|t_1-t_2|} \quad (14)$$

Тогда выражение (13) будет иметь вид

$$\mathbf{C}^{R_{xx}} = M \left[\mathbf{A} \left(\mathbf{A}^f \mathbf{C}^{R_{yy}} (\mathbf{A}^f)^T + \mathbf{C}^{R_{\tilde{y}^*y^*}} \right) \mathbf{A}^T \right] + M \left[\mathbf{A} \mathbf{C}^{m_y} (\mathbf{C}^{m_y})^T \mathbf{A}^T \right] - \mathbf{C}^{m_x} (\mathbf{C}^{m_x})^T \quad (15)$$

а сигнал на входе системы будет формироваться следующим образом:

$$y(t) = \tilde{y}(t) f(t) + \tilde{y}^*(t) + \bar{y}(t) \quad (16)$$

Если детерминированная составляющая является гармоническим сигналом $\bar{y}(t) = A \sin \omega t$, то функция $f(t)$ может выглядеть так:

$$f(t) = 1 - r \frac{|A \sin(\omega t + \varphi)|}{\max |A \sin(\omega t + \varphi)|} \quad (17)$$

где коэффициент r определяет уровень компенсации, а φ – фазовый сдвиг, позволяющий получить “противофазный” сигнал $f(t)$, гасящий колебания дисперсии выходного сигнала системы.

Для нахождения параметров r , φ , k можно воспользоваться приемом минимизации функционала, выражающего близость корреляционных функций выходного сигнала стохастической системы (1) и детерминированной системы.

$$\rho(r, \varphi, k) = \left(\int_0^T \int_0^T \left[R_{xx}^d(t_1, t_2) - R_{xx}^s(t_1, t_2, r, \varphi, k) \right]^2 dt_1 dt_2 \right)^{1/2} \quad (18)$$

где $R_{xx}^d(t_1, t_2)$ и $R_{xx}^s(t_1, t_2, r, \varphi, k)$ – корреляционные функции выходного сигнала детерминированной и стохастической системы соответственно, при этом последняя зависит от искомым параметров компенсации. Заметим, что функционал, аналогичный (18), можно использовать для поиска оптимальных значений k_l, k_d, T_D при реализации активной компенсации в соответствии с первым описанным подходом. Проекционная аппроксимация модели (1) позволяет представить функционал (18) в следующей удобной для вычисления форме:

$$J(r, \varphi, k) = \left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \left[c_{ij}^{\varepsilon_R}(r, \varphi, k) \right]^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

где $c_{ij}^{\varepsilon_R}(r, \varphi, k)$ – элементы квадратной матрицы ПХ, вычисляемой как

$$\mathbf{C}^{\varepsilon_R}(r, \varphi, k) = \mathbf{C}^{R_{xx}^d} - \mathbf{C}^{R_{xx}^s}(r, \varphi, k) \quad (20)$$

где $C^{R_{xx}^e}$ и $C^{R_{xx}^s}(r, \varphi, k)$ – проекционные характеристики автокорреляционных функций $R_{xx}^d(t_1, t_2)$ и $R_{xx}^s(t_1, t_2, r, \varphi, k)$ соответственно.

Таким образом, предложены два подхода к активной компенсации случайности физических параметров систем управления. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект № 16-41-400701).

Список литературы

[1] Лапин С.В., Егупов Н.Д. Теория матричных операторов и ее приложение к задачам автоматического управления. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997. – 496 с.

[2] Пупков К.А., Егупов Н.Д., Макаренков А.М. и др. Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем. – М.: Физматлит, 2003. – 400 с.

Тун Тун Чжо – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: htaminncyaw@gmail.com

Тин Эй Чжо – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tinayekyaw87@gmail.com

Мью Паинг Сат – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: myoraingsatt85@gmail.com

Макаренков А.М. – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

В МАШИНОСТРОЕНИИ..... 3

Логутенкова Е.В., Мельников Я.С.

Анализ геометрических характеристик изделий 4

Малышев Е.Н., Степанов Е.Д.

Виды унификации технологических процессов 7

Карабахина Т.Ю., Карабахин В.Г.

Воздействие методов закрепления на материал тонкостенных труб
в трубных решетках теплообменных аппаратов 10

Малышев А.Н., Бысов С.А., Макеева О.В.

Дополнительное силовое воздействие на заготовку при вытяжке 12

Калмыков В.В., Насевич И.Р., Букреева Н.Г.

Зависимость смазывающей способности масел
от их поверхностного натяжения..... 15

Вяткин А.Г., Куделина Е.С.

Износ установочных элементов станочных приспособлений 17

Калмыков В.В., Атрощенко В.Н.

Исследование влияния методов обработки поверхностей
на их износостойкость 20

Ермачков Р.О., Антонюк Ф.И.

Исследование влияния способов наладки на точность размеров
заготовок при осадке на гидравлическом прессе..... 23

Лаковщиков И.В., Баранникова И.В., Логутенкова Е.В.

История возникновения метра как меры длины и эталона..... 26

Калмыков В.В., Барина Д.А., Кузнецов И.В.

Методы оптимизации времени обслуживания рабочего места..... 29

Федорова О.С., Рожнов А.А., Сухарева А.А.

Моделирование процессов методами математической статистики..... 32

Левин А.Д.

Недостатки метода координатной штамповки перед лазерной резкой 35

Волков А.В., Устинов И.К.

О точности формул определения сил резания 38

Бурмистров А.А., Вяткин А.Г.

Обеспечение точности высотных размеров поковок при осадке
на гидравлическом прессе 42

Гинсар И.Э., Калмыков В.В.

Оценка адгезионной прочности лакокрасочных покрытий..... 45

| | |
|---|-----------|
| <i>Клементьев Д.А., Хайченко В.Е.</i> | |
| Перспективы электрошлаково кокильного литья | 47 |
| <i>Карпов М.П., Малышев Е.Н.</i> | |
| Постановка задач исследования технологии изготовления деталей из паронита | 50 |
| <i>Малышев А.Н., Крылов А.Ю., Букреева Н.Г.</i> | |
| Применение методики FMEA для анализа рисков в штамповочном производстве | 53 |
| <i>Крюков М.В., Попков В.М.</i> | |
| Пути совершенствования технологических процессов листовой штамповки | 57 |
| <i>Зенкин Н.В., Васильев Д.В.</i> | |
| Разработка технологии восстановления ручьев шкивов лифтовых механизмов..... | 61 |
| <i>Кривов Р.Ю., Попков В.М.</i> | |
| Роль межискрового зазора при электроэрозионной обработке..... | 65 |
| <i>Волков А.В., Болдычев К.В.</i> | |
| Совершенствование операции механической обработки фрезы..... | 68 |
| <i>Тагиев Али Анар оглы, Хайченко В.Е.</i> | |
| Современное развитие литья по выплавляемым моделям..... | 73 |
| <i>Журавлева Т.А., Рожнов А.А., Паращук Ю.В.</i> | |
| Современные методы обработки экспериментальных данных | 76 |
| <i>Калмыков В.В., Лепченков А.В., Насевич И.Р.</i> | |
| Технологические способы формирования требуемого микрорельефа поверхностей | 79 |
| <i>Кузнецов И.В., Барина Д.А., Антонюк Ф.И.</i> | |
| Точность диаметральных размеров осаженных цилиндрических поковок при осадке на прессах..... | 81 |
| <i>Барков А.В., Зенкин Н.В.</i> | |
| Точность обработки при контурном фрезеровании концевыми фрезами | 83 |
| <i>Воронин В.К., Попков В.М.</i> | |
| Универсальная установка для изготовления тонкостенных деталей | 85 |
| СЕКЦИЯ 2. | |
| ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГОПРОИЗВОДСТВА | 87 |
| <i>Родин А.А., Зыбин И.Н.</i> | |
| Анализ электроконтактных способов восстановления деталей и механизмов | 88 |
| <i>Орлик Г.В., Орлик А.Г., Коростелкин А.С.</i> | |
| Влияние параметров режимов аргонодуговой сварки на межкристаллитную коррозию стали 08X18H10T | 91 |

| | |
|--|-----|
| <i>Козлова М.С., Труханов К.Ю.</i> Выбор сварочных материалов для автоматической сварки под флюсом дренажной напорной емкости..... | 96 |
| <i>Керимов С.С., Филиппов И.В.</i> Система управления синхронными приводами для учебной установки сварки (наплавки) | 98 |
| СЕКЦИЯ 3. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ | 101 |
| <i>Андреев В.В., Ахмелкин Д.М., Столяров А.А.</i> Модификация МДП-структур электронным облучением и сильнополевой по Фаулеру-Нордгейму инъекцией электронов в диэлектрик | 102 |
| <i>Шмаков А.Н., Андреев В.В.</i> Определение типа проводимости высокоомного и низкоомного полупроводникового кремния | 106 |
| <i>Мазин А.В., Аунг Пьей Зон</i> Определение холодного коэффициента термоэлектрического материала теллурид висмута..... | 110 |
| <i>Кузнецов В.В., Андреев В.В., Максимов И.В.</i> Применение метода импульса линии передач для сравнительной оценки уровня защищенности ИМС от воздействия статического электричества..... | 113 |
| <i>Парамонов В.В., Караханян В.А.</i> Разработка конструкции кристаллов светоизлучающих диодов с локальной областью свечения на основе наноструктуры AlInGaP/GaAs и сравнение ее параметров с кристаллом на основе AlGaAs/GaAs | 117 |
| <i>Шагаев В.В., Тун Тун Лин</i> Стабилизация частоты ферритмагнитного резонанса в галлий - замещённых плёнках железиттриевого граната относительно изменения химического состава и температуры | 120 |
| <i>Твердова С.М., Йе Еинт Ко Ко</i> Теоретический расчет электропроводности спеченных двухфазных керметов..... | 124 |
| <i>Чжо Зай, Прасицкий В.В.</i> Функционирование термоэлектрода натриевой лампы высокого давления в условиях дугового разряда | 127 |

СЕКЦИЯ 4.

ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ 130

Шевелев Д.В., Сафонов А.И.

Абсорбционная бромистолитиевая холодильная установка
на базе газового микротурбинного двигателя..... 131

Киселёв С.В., Сидоров А.А.

Влияние рабочей решетки на неоднородность потока
за охлаждаемыми сопловыми лопатками 134

Жинов А.А., Иванов С.А.

Влияние эрозионного износа лопаток на характеристики
ступеней паровых турбин..... 141

Малинкина М.А., Карышев А.К.

Использование регулируемого соплового аппарата силовой
турбины приводных ГТУ - важный фактор повышения
эффективности газотранспортных систем..... 145

Жинов А.А., Круглова Г.А.

Исследование влияния расположения пароразгрузочных
отверстий дисков турбины на осевое усилие 150

Шевелев Д.В., Заикин А.А.

Исследование термодинамической эффективности идеального
цикла ГТУ с изотермическим расширением 153

Голиков А.С.

Научно-учебная экспериментальная установка
для исследования аэроупругих явлений 157

Сидоров П.М., Жинов А.А.

Определение оптимальной степени регенерации
ГТУ мини-электростанции 159

Ильичев В.Ю., Хахалев И.С.

Особенности работы паротурбинной установки
на переменных режимах 162

Богов В.А., Гридчин Н.В.

Особенности расчёта и проектирования
высоконапорных газовых турбин 165

Завальный Ф.Г., Гридчин Н.В.

Пассивные системы виброгашения 168

Юрик Е.А., Таганов Д.С.

Перспективные технологии производства
и ремонта элементов турбины 173

| | |
|---|------------|
| <i>Сидоров П.М., Шевелев Д.В.</i> Проблемы и перспективы высоконапорных центробежных компрессоров..... | 177 |
| <i>Сафронова Я.А., Сидоров А.А.</i> Проектирование проточной части низкого давления (ЧНД) турбины с отопительным отбором пара | 181 |
| <i>Юрик Е.А., Мусин Р.И.</i> Процесс обката ротором статора турбоустановки и причины его возникновения | 187 |
| <i>Каретин А.А., Гридчин Н.В.</i> Расчет и проектирование низконапорного парокompрессора для механической рекомпрессии пара | 190 |
| СЕКЦИЯ 5. КЛАСИЧЕСКИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ; АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ | 193 |
| <i>Брынза А.А., Корлякова М.О.</i> Анализ связи структуры свёрточной нейронной сети с точностью классификации в задачах распознавания | 194 |
| <i>Мельников Д.В., Чжо Ту Аунг</i> Математическое моделирование нелинейных систем регулирования энергетической турбины | 199 |
| <i>Тин Эй Чжо, Тун Тун Чжо, Макаренков А.М.</i> Оптимизация параметров регулятора для стохастической модели электрогидравлического следящего привода с несколькими случайными параметрами | 203 |
| <i>Лохмачев Н.В., Корлякова М.О., Трушков Д.С., Савина О.И.</i> Подход к моделированию виртуальной камеры и формированию снимка виртуальной сцены в Matlab | 209 |
| <i>Абдурахманов А.Ш., Корлякова М.О.</i> Подход к построению системы трекинга произвольных объектов во времени..... | 212 |
| <i>Корлякова Е.Ю., Корлякова М.О., Вишнякова А.Н.</i> Построение виртуальной сцены в среде Matlab..... | 217 |
| <i>Тун Тун Чжо, Тин Эй Чжо, Мьо Паинг Сам, Макаренков А.М.</i> Принцип активной компенсации влияния случайности параметров систем управления..... | 221 |
| СОДЕРЖАНИЕ | 227 |

**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ПРИБОРО - И МАШИНОСТРОЕНИИ
И РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ВУЗЕ**

**Материалы
Всероссийской научно-технической конференции**

Том 1

Научное издание

Все работы публикуются в авторской редакции. Авторы несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений

Подписано в печать 20.11.2017.

Формат 60x90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Печ. л. 14,5. Усл. п. л. 13,49. Тираж 50 экз. Заказ № 156

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Оригинал-макет подготовлен и отпечатан в Редакционно-издательском отделе
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57-31-87