

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

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

**Материалы
Региональной научно-технической конференции**

Том 1



УДК 378:001.891
ББК 74.58:72
НЗ4

Руководитель конференции:

С.А. Кусачева (председатель совета по НИР студентов и аспирантов)

Руководители направлений:

А.И. Пономарев (ф-т КМК), *Ю.С. Белов* (ф-т ФНК), *М.Ю. Адкин* (ф-т ЭИУК),
А.Г. Вяткин (ф-т МТК), *О.А. Артеменко* (ф-т СЭК)

Руководители секций:

Е.Н. Мальшев, Г.В. Орлик, В.В. Андреев, А.А. Жинов, Ю.П. Корнюшин,
Н.Е. Шубин, А.И. Пономарев, А.К. Рамазанов, А.А. Анкудинов, Б.М. Логинов,
В.Г. Косушкин, А.В. Мазин, А.А. Шубин, А.К. Горбунов, А.В. Максимов,
В.Н. Пащенко, М.В. Астахов, Е.Н. Сломинская, О.Л. Перерва, Г.И. Ловецкий,
А.Ю. Красноглазов, В.М. Алакин

НЗ4 **Научно-технологические инновации в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе:** материалы региональной научно-технической конференции, 19–21 апреля 2016 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – 276 с.

В сборнике материалов Региональной 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, 2016
© Калужский филиал МГТУ
им. Н. Э. Баумана
© Издательство МГТУ
им. Н. Э. Баумана, 2016

СЕКЦИЯ 1.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

С.А. Бысов, Р.М. Юхимец

АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ РАСШИРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

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

В связи с небольшим жизненным циклом изделий в машиностроении, который составляет лишь несколько месяцев, остро встает проблема быстрой и эффективной перестройки производства на выпуск новых изделий[1]. То широкоуниверсальное и высокоавтоматизированное оборудование, что применяется на сегодняшний день в гибких производствах, стоит достаточно дорого, а его возможности используются не в полной мере. Отсюда очевидна необходимость поиска путей повышения эффективности использования, имеющегося на предприятиях производственного оборудования.

На сегодняшний день нет исчерпывающего определения такого понятия как «технологические возможности станка» [1]. Назначение, указываемое в паспорте оборудования, не отражает в полной мере того, какие работы могут быть выполнены посредством компоновки станка и его исполнительных механизмов. Хотя верная оценка технологических возможностей каждого отдельно взятого станка из всего станочного парка позволит использовать потенциал предприятия по максимуму.

Для наиболее точного определения технологических возможностей оборудования необходимо комплексное изучение его характеристик.

Технико-экономические показатели металлорежущих станков, которые в настоящее время используются для оценки эффективности оборудования (особенно при создании новых станков), отличаются большим разнообразием, и весомость каждого из них связана с назначением и областью использования станка. Многообразие этих показателей сводится к наиболее обобщающим: производительности, точности, гибкости (переналаживаемости), надежности станочного оборудования. Однако, ни один из этих показателей в отдельности, ни их совокупность не могут в полной мере отразить технологические возможности того или иного станка.

Анализе литературных источников показал, что существует несколько путей расширения технологических возможностей станков:

- Использование приспособлений и инструментальной оснастки, позволяющей выполнять операции нехарактерные для данного типа оборудования.
- Применение прогрессивного инструмента
- Осуществление на металлообрабатывающем оборудовании работ, не связанных со снятием металла.

Приспособления, как дополнительные устройства к металлорежущему оборудованию, позволяют не только сориентировать и закрепить обрабатываемую заготовку на столе станка, но и дают возможность обрабатывать поверхности, которые на станках данного типа без применения приспособлений обрабатывать невозможно. Существует множество примеров иллюстрирующих применение приспособлений для осуществления на металлорежущих станках операций, не относящихся к их прямому назначению. Например, на токарных станках могут осуществляться операции ленточного шлифования, суперфиниширования [2]. Так же с помощью приспособлений на токарных станках возможно осуществление обработки сложных поверхностей. Используя метод концентрации операций, можно добиться существенного повышения технологических возможностей станков автоматов. С этой целью автоматы оснащают дополнительными устройствами, позволяющими в автоматическом цикле токарной обработки выполнять операции сверления отверстий, оси которых не совпадают с осью вращения деталей.

Анализ различных компоновок современных токарных станков с ЧПУ позволил выявить решения, расширяющие их технологические возможности. Одним из таких решений является добавление к классической компоновке токарного станка револьверной головки со встроенным приводом вращающегося инструмента. Это делает возможным помимо токарной обработки производить фрезерование пазов, канавок, сверление радиальных и осевых отверстий.

Немаловажным фактором, влияющим на эффективность использования технологических возможностей станков, является применяемый для данного оборудования инструмент. Обработке подвергаются такие материалы, как коррозионностойкие и высоколегированные стали, чугуны с шарообразным графитом, комбинированные слоистые материалы из легких металлов, а также сплавы на базе Ni и Ti. Обеспечение обработки этих материалов требует соответствующей технологической подготовки. Классическим инструментом для растачивания отверстий на токарных станках являются расточные державочные резцы. Более прогрессивными однолезвийными расточными инструментами являются расточные сборные головки, оснащенные сменными многогранными твердосплавными пластинами, а также расточные головки и блоки, позволяющие значительно повысить производительность обработки отверстий [2].

С точки зрения производительности крайне эффективно применение комбинированного инструмента, позволяющего за один проход получать несколько поверхностей.

На сегодняшний день помимо всего вышеуказанного существует масса примеров расширения технологических возможностей станков путем применения их для выполнения операций, не связанных со снятием метал-

ла. Сюда можно отнести использование токарных станков с ЧПУ для навивания пружин. [3]

Новое применение металлообрабатывающее оборудование получило для выполнения операций, связанных с обработкой поверхностно-пластическим деформированием (ППД)[4]. Самарским государственным университетом разработано устройство, позволяющее выглаживать на сверлильных станках отверстия (сквозные, глухие и фасонные с небольшим радиусом кривизны и длиной до 60 мм и более) диаметром 6 мм и более [5].

Преимущество методов ППД связано с их возможностью совмещать в одном процессе эффекты отделочной и упрочняющей обработки, что позволяет заменять операции, например, тонкого точения, шлифования или полирования на финишную обработку упрочнением. Отсутствие необходимости применения СОТС при ППД оказывает благотворное влияние с экономической и экологической точек зрения. Данная технология получила широкое применение в массовом производстве ОАО «АВТОВАЗ» и не имеет аналогов в мире.

Новым в машиностроении является совмещение сборочных работ с процессами изготовления сопрягающихся деталей на металлорежущем оборудовании, а также выполнение на нем операций по совместной обработке деталей сборочной единицы [3]. Примером может послужить использование токарно-револьверных автоматов для выполнения несложных операций сборки, например, запрессовки, завальцовки и т.д. Подача сопрягаемых деталей в рабочую зону автомата осуществляется с помощью различных магазинных устройств[6].

Станки, выпускаемые компанией Wirth&Gruffat, позволяют произвести сборку продольно-прессового соединения непосредственно на металлорежущем станке [3].

На комбинированных станках выполняют совместное изготовление и сборку деталей. Это часто упрощает ориентацию и подачу деталей, так как ориентированное положение деталей при изготовлении сохраняется и при их сборке. Цикл изготовления собираемых деталей должен быть непродолжительным, чтобы не снижалась производительность автоматического сборочного оборудования. Операции сборки выполняют на многооперационных штамповочных прессах-автоматах, токарно-револьверных автоматах и автоматических линиях [7].

Существуют примеры использования сверлильных станков для развальцевания концов втулки [8]. Технология включает в себя обработку внутренней поверхности для непосредственной установки втулки, саму установку втулки и последующее развальцевание ее концов с помощью, установленной на сверлильном станке вальцовки с фигурными роликами.

В результате анализа литературных источников, была выявлена низкая эффективность использования оборудования, применяемого на предприятиях. Зачастую технологические возможности станков, с помощью

которых осуществляется производство изделий, гораздо шире тех, что заявлены. Была выявлена проблема в области теоретического обоснования вопросов, связанных с технологическими возможностями оборудования. Так же были рассмотрены возможные пути расширения технологических возможностей отдельно взятого оборудования, приведены примеры мероприятий, позволяющих повысить эффективность использования технологического оборудования.

Список литературы

[1] Базров Б.М., Демин А.Б. Определение технологических возможностей станка. *Вестник машиностроения*, 2007, №3, с. 47-50.

[2] Пачевский В.М. *Расширение технологических возможностей станков и станочных комплексов*. Воронеж, 2009, 190с.

[3] Малышев Е.Н., Малышев А.Н. Повышение эффективности использования обрабатывающего оборудования путем расширенной реализации его технологических возможностей. *Инженерный вестник*, 2012, №8, с. 1-7.

[4] Лукьянов А.А. Практика внедрения технологии обработки поверхностно-пластическим деформированием путем модернизации оборудования. *Технические науки-от теории к практике*, 2013, №28, с. 7-12.

[5] Швецов А. Н., Скуратов Д. Л., Абульханов С. Р. Устройство для алмазноговыглаживания отверстий с нагружениемвыглаживателя центробежной силой. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2011, №3, с. 118-122

[6] Гаврилов А.Н. *Приборостроение и измерительная техника*. Москва, Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960, 464с.

[7] Ковальчук Е.Р., Соломенцев Ю.М., ред. *Основы автоматизации машиностроительного производства*. Москва, Высшая школа, 1999, 313 с.

[8] Новиков М.П. *Основы технологии сборки машин*. Москва, Машиностроение, 1980, 586 с.

Бысов Сергей Александрович - канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии машиностроения" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

Юхимец Роман Михайлович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: LeoBonart10@yandex.ru

Д.И. Бычков, А.Г. Вяткин

АНАЛИЗ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЗАКРЕПЛЕНИИ ЗАГОТОВОК В ПРИСПОСОБЛЕНИЯХ

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

Среди всей номенклатуры обрабатываемых деталей наиболее важными и сложными объектами производства являются корпусные детали. У корпусных деталей наиболее высокие требования предъявляются к точности формы основных отверстий и взаимному пространственному положению их осей. Для достижения таких требований, помимо решения сложных технологических задач, необходимо учитывать влияние упругих деформаций корпусных деталей и пространственного положения их поверхностей, возникающих уже на начальных стадиях механической обработки деталей при закреплении на металлорежущих станках [1].

Основными задачами приспособлений являются:

- Надежная установка и закрепление заготовки;
- Повышение производительности;
- Обеспечение заданной точности.

Погрешность установки ε , как одна из составляющих общей погрешности выполняемого размера, суммируется из погрешностей базирования $\varepsilon_б$, закрепления $\varepsilon_з$ и погрешности положения заготовки, вызываемой неточностью приспособления $\varepsilon_{пр}$. По своему физическому смыслу величина ε выражает погрешность положения заготовки [2].

Рассмотрим погрешность закрепления более детально. Сила закрепления должна надежно прижимать заготовку к опорам приспособления. При неправильной схеме закрепления, когда это условие не обеспечивается, часто происходит поворот или смещение заготовки на значительную величину от исходного положения. Такое смещение вызывается неправильной схемой установки.

Смещение измерительной базы заготовки происходит в результате деформации звеньев цепи, через которую передается сила закрепления (заготовка–установочные элементы–корпус приспособления). Из всего баланса перемещений в этой цепи наибольшую величину имеют перемещения в стыке заготовка–установочные элементы. Контактные деформации в постоянных сопряжениях приспособления, деформации сжатия заготовки и деталей приспособления малы.

Зависимость контактных деформаций для стыков заготовка – опоры приспособления выражается нелинейным законом [2]:

$$y = CQ^n,$$

где Q – сила, приходящаяся на опору ($n < 1$) (Н); C – коэффициент, характеризующий вид контакта, материал, шероховатость поверхности и верхний слой заготовки.

$$C = f(HB, R_z, F),$$

где HB – твердость материала заготовки по Бринеллю; R_z – параметр шероховатости поверхности заготовки (мкм); F – площадь контакта опоры с заготовкой (см²)

Для типовых случаев C и n находят экспериментально. Аналитическое решение контактной задачи затруднительно, так как на поверхностях заготовки имеются микро- и макронеровности, при соприкосновении которых с установочными элементами возникают неправильные и случайно расположенные места контакта. Наличие на этих поверхностях литевой корки или обезуглероженного слоя (у поковок), механические свойства которых отличны от глубинных слоев металла, создает особые условия возникновения контактных деформаций. Величина их обычно меньше глубины поверхностного слоя [2].

При обработке партии заготовок сила Q колеблется от Q_{max} до Q_{min} , коэффициент C – от C_{max} до C_{min} . На рис. 1 показан график с двумя предельными кривыми y .

$$y = y_{max} - y_{min} = C_{max}Q_{max}^n - C_{min}Q_{min}^n$$

Величину погрешности закрепления уменьшают, стабилизируя силу закрепления (применение пневматических и гидравлических зажимов вместо ручных), повышая жесткость стыка опоры приспособления (базовая поверхность заготовки), улучшая качество базовых поверхностей, а также увеличивая жесткость приспособления в направлении передачи силы закрепления.

В справочнике [3] приведены значения коэффициента Столько для стали и чугуна. Следовательно, необходимо провести исследования для других материалов.

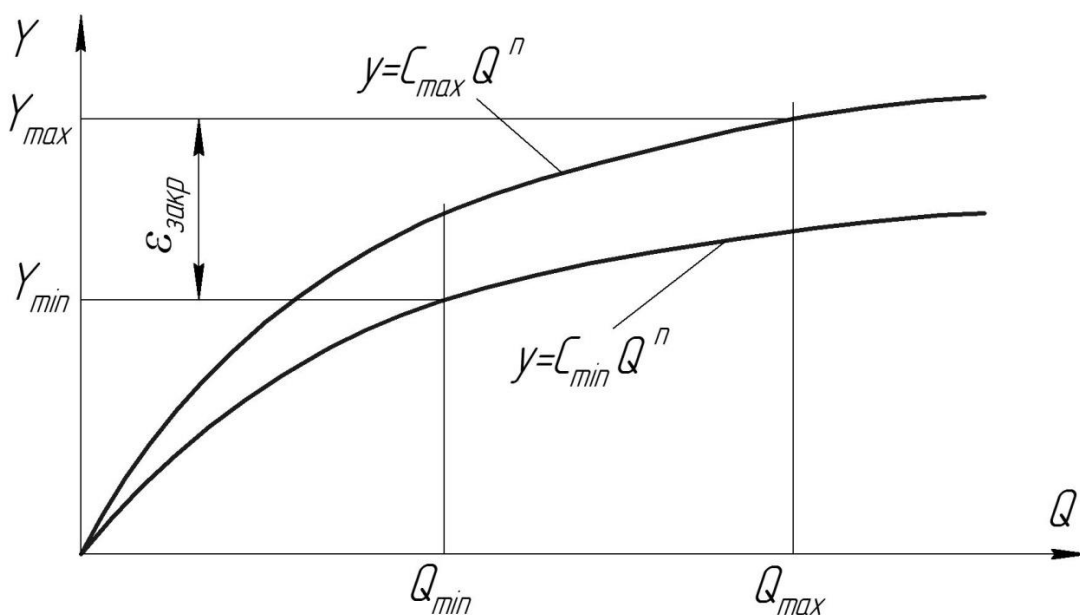


Рис. 1 График для определения погрешностей закрепления

В статье [4] проведен анализ работ, посвященных изучению контактных деформаций при закреплении заготовок в приспособлениях с установкой на различные типы опор. Рассмотрены расчетные модели определения смещений заготовки под действием сил закрепления. Оказалось, что эмпирические зависимости, приведенные различными исследователями справедливы только в рамках тех условий, которые были реализованы при проведении эксперимента. Для других же условий они могут давать существенные отклонения и применять их целесообразно только для приближенной оценки значений u [4].

Список литературы

[1] Полтавец О.Ф., Зимин В.В., Диланян К.Р. Пути повышения точности обработки корпусных деталей на многоцелевых станках. Обзор. С-3. Технология и автоматизация производства. М.: ЦНИИТЭИавтосельхозмаш. 1990. 90 с.

[2] Корсаков В.С./ Основы конструирования приспособлений М.: Машиностроение, 1983. 277с.

[3] Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. С74 Т1/Под ред. А М Дальского. А Г Косиловой. Р К Мешерякова. Л Г. Сулова 5 с изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение-1,2001. 912 с., ил.

[4] Пашкевич М. Ф., Пашкевич В. М., Миронова М. Н. Исследование смещений заготовки под действием сил закрепления при базировании по плоскости // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2010. №2 (41). С.009-018.

Бычков Дмитрий Игоревич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: Swanky.Dmitry@yandex.ru

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

М.А. Верховинец, И.А. Филиппова

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ОТЛИВКИ И ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ НА КАЧЕСТВО ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

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

Рост кристаллов заключается в присоединении к зародышам все новых атомов из жидкой фазы. Центры кристаллизации самопроизвольно возникают при переохлаждении металла. Очень маленькие зародыши неустойчивы, возникнув, они растворяются. Чем больше степень переохлаждения, тем устойчивее зародыши, тем меньше их критический размер. Далее зародыши увеличиваются в размере, одновременно появляются новые зародыши.

С целью регулирования размеров зерен часто применяют искусственное введение в расплав веществ, создающих центры кристаллизации (модифицирование). В технических металлах в качестве центров кристаллизации часто выступают инородные включения (например, шлаковые включения, частички футеровки печи, оксиды металлов).

В большинстве случаев кристаллизация металлов происходит с большой скоростью (кристаллизация при заливке металла в изложницу, кристаллизация расплава при литье в металлические формы). При ускоренном охлаждении металла кристаллы растут неравномерно. Рост зародышей по одной из осей (в направлении наибольшего градиента температур) значительно опережает рост по другим осям, происходит так называемая дендритная кристаллизация.

В процессе заливки и кристаллизации отливка и форма испытывают тепловое, силовое и химическое взаимодействия, влияющие на размерную точность, качество поверхности, макро- и микроструктуру, механические и эксплуатационные свойства получаемого литого изделия. Результаты такого взаимодействия влияют на состояние поверхностей отливки и слоя металла, непосредственно примыкающего к ним. Состояние поверхностей отливки характеризуется шероховатостью, наличием или отсутствием на них различных пригаров — химического, механического или термического.

Шероховатость поверхности отливок зависит в основном, без учета пригара, от размеров зерен формовочного материала.

Пригар на отливках является следствием различных явлений. Под действием заливаемого в форму расплава происходит размягчение, плавление формовочных материалов с низкой огнеупорностью. При этом взаимодействие их в некоторых небольших объемах формы с расплавленным металлом способствует образованию термического пригара. Механический пригар образуется на отливках, особенно крупных, при проникновении за-

литого жидкого металла в поры формовочной смеси под действием статического напора. Химический пригар возникает в результате взаимодействия расплавленного металла с газами, находящимися в форме, и формовочными материалами. При этом если в форме или в зазорах между частицами формовочной смеси находится кислород и в составе расплава есть железо, то последнее окисляется. В свою очередь закись железа FeO взаимодействует с двуокисью кремния SiO_2 по реакции $FeO + SiO_2 \rightarrow FeSiO_3$.

Расплавленный $FeSiO_3$ (силикат железа) смачивает частицы формовочной смеси и создает после охлаждения отливки корку пригара на ее поверхности. Химический пригар может быть уменьшен введением в смесь противопригарных добавок, окрашиванием форм и стержней.

Тепловое взаимодействие отливки и формы можно условно разбить на периоды, длительность которых зависит от состава и теплофизических свойств сплава и формовочной смеси, температуры заливки и массы отливки. В процессе заполнения формы могут возникнуть два основных дефекта (см. рис. 1): недолив, т.е. неполное образование отливки из-за незаполнения полости формы расплавленным металлом, спай– скругленное углубление на поверхности отливки, образовавшееся из-за неполного слияния встречных потоков металла, остывающих по ходу течения.

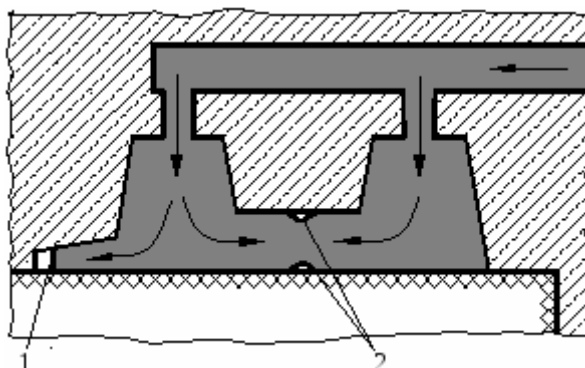


Рис. 1. Дефекты отливки в виде недолива 1 и спая 2

Для предотвращения этих дефектов используют технологические и конструктивные мероприятия. К технологическим мероприятиям относятся: повышение температуры заливки, увеличение скорости заполнения формы расплавом, уменьшение потерь теплоты при заполнении формы расплавом путем ее предварительного нагрева или изготовления из мало-теплопроводных материалов. К конструктивным мероприятиям относится выбор минимально допустимой толщины стенки в зависимости от состава сплава, габаритных размеров и сложности отливки.

Силовое взаимодействие отливки и формы зависит от свойств формовочной смеси и конфигурации отливки. Сильно уплотненная смесь или смесь, имеющая высокую прочность в результате введения специальных добавок, оказывает существенно большее сопротивление усадке отливки. При

наличии на отливках поперечных ребер или при коробчатой их форме, как у крупных станочных отливок, затрудняется их усадка, создается в форме большое число зон сжатия формовочной смеси. Если отливки имеют внутренние стержни, то они также оказывают тормозящее действие на усадку.

Следствием силового взаимодействия расплава (или отливки) и формы является образование в отливке внутренних напряжений и в некоторых случаях — трещин. Процесс силового взаимодействия отливки и формы представляет собой целый комплекс достаточно сложных явлений. Тем не менее, можно выделить из этого комплекса и рассмотреть отдельно ряд факторов.

В процессе заливки воздействие текущего металла на форму может привести к разрушению ее отдельных частей, что вызовет искажение конфигурации и размеров отливки. Жидкий металл создает значительную выталкивающую силу, которая может заставить недостаточно закрепленный стержень сместиться или всплыть, а иногда и разрушиться. Выталкивающая сила может приподнять верхнюю полуформу, что приведет к разливу металла по плоскости разъема формы. Для предотвращения этих дефектов формовку надо проводить с хорошим уплотнением формовочной смеси, а все элементы, образующие форму, должны быть надежно закреплены.

С момента начала затвердевания расплава развивается усадка, приводящая к уменьшению объема и размеров отливки, которая начинает сжимать охватываемые ею элементы литейной формы (см. рис. 2).

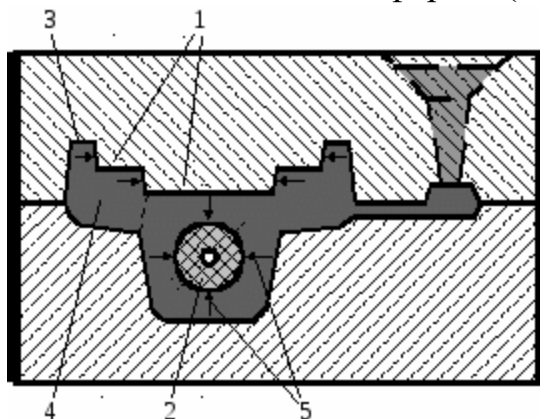


Рис. 2. Схема возникновения усадочных напряжений в отливке корпуса: 1 – выступающие части формы; 2 – стержень; 3 – опорная ножка корпуса; 4 – утолщение опорной части корпуса; 5 – сжимающие усадочные напряжения

Выступающие части формы и стержни препятствуют свободной усадке отливки, вызывая в ней усадочные напряжения. Но препятствовать усадке могут не только элементы литейной формы, но и те части отливки, которые затвердели раньше соседних. Например, более тонкая опорная ножка 3 охладится и затвердеет быстрее сопряженного с ней утолщения 4 и может начать препятствовать его свободной усадке в направлении, пер-

пендикулярном плоскости чертежа, в котором нет препятствия усадке со стороны формы. В результате в этих сопряженных частях отливки возникнут взаимные усадочные напряжения, из-за неравномерного распределения температур между отдельными частями или по толщине отливки возникнут термические напряжения. Наконец, могут появиться еще и фазовые напряжения, обусловленные неравномерностью выделения по объему отливки различных фаз и структурных образований в процессе затвердевания. Например, при изготовлении отливки из серого чугуна на ее наружной поверхности может формироваться цементитная структура, а в центральной части – структура с выделением графита. Это увеличит объем центральной части, что приведет к возникновению растягивающих напряжений в наружных слоях и сжимающих напряжений в сердцевине.

Уменьшить напряжения в отливках можно в тех случаях, когда усадка приближается к свободной. Это возможно, если формовочные и стержневые смеси имеют невысокую прочность, способность к релаксации. Хорошей податливостью обладают стержни из холоднотвердеющих смесей. Увеличение податливости смесей обеспечивается также введением в формовочную и стержневую смесь серебристого графита до 12%.

Усадка может приводить к образованию усадочных раковин, усадочной пористости, короблению и образованию трещин. Коробление – это искажение форм и размеров отливки под влиянием литейных напряжений (см. рис. 3). Вероятность коробления возрастает при увеличении протяженности частей отливки, уменьшении их толщины и усложнении конфигурации, приводящим к неравномерному охлаждению объема отливки. Для предотвращения коробления нужно выравнивать охлаждение с помощью холодильников, а при изготовлении сложных отливок использовать сплавы с повышенной пластичностью или предусматривать ребра жесткости, укрепляющие тонкостенные элементы литых конструкций.

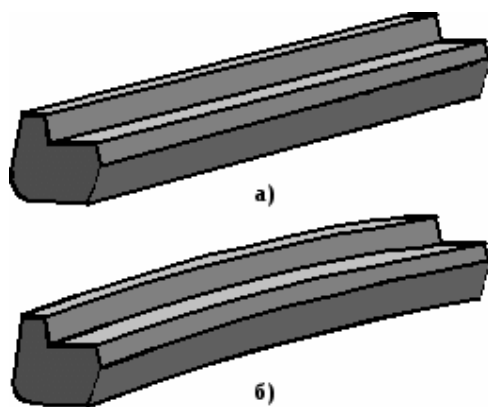


Рис. 3. Возможные формы опорной части отлитого корпуса:
а– отливка без коробления; б– выгнутая вверх вследствие коробления

В процессе затвердевания расплавленного металла, залитого в форму, будут выделяться растворенные в нем газы. Аналогично рассмотренному выше образованию усадочных дефектов, для сплавов, имеющих узкий температурный интервал кристаллизации, это может приводить к образованию газовых раковин, а для сплавов, имеющих широкий температурный интервал кристаллизации, это может приводить к образованию газовой пористости. Для уменьшения вероятности образования газовых раковин и пористости плавку металла следует вести под слоем флюса или в среде защитных газов, а перед заливкой расплавленный металл целесообразно дегазировать вакуумированием или продувкой инертными газами. Кроме того, следует увеличивать газопроницаемость форм и стержней, а также подсушивать форму, снижая влажность формовочной смеси.

Список литературы:

[1]. Экономические основы технологического развития/ И.Н. Васильева, М.: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 1995

[2]. Технологии металлов и конструкционные материалы/ под ред. Б.А. Кузьмина, М.: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 2000

[3]. Технология конструкционных материалов. Учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. М. Дальский, И. А. Арутюнова, Т. М. Барсукова и др.; Под общ. ред. А. М. Дальского, М.: Машиностроение, 1985.

[4]. Разработка технологии изготовления отливки/ В.М. Григорьев, М.: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 2000

[5]. Технология литейного производства/ Н. Д. Титов, Ю. А. Степанов М.: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 2000

Верховинец М.А. - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: verkhovinetsm@mail.ru

Филиппова Инна Аркадьевна - канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии обработки материалов" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: katan-ogmet-04@yandex.ru

И.А. Варичкин, Н.В. Зенкин

КЛАССИФИКАЦИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

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

Массовый характер использования смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в машиностроительных и металлообрабатывающих отраслях промышленности, постоянный рост торговли оборудованием для обработки металлов обуславливают необходимость разработки систем классификации и выбора СОЖ с целью определения их взаимозаменяемости. Рекомендации по взаимозаменяемости должны основываться на физико-химических и технологических свойствах и установленных для них областях рационального применения.

Смазочно-охлаждающие технологические жидкости являются обязательным элементом большинства технологических процессов обработки материалов резанием и давлением. Точение, фрезерование, сверление, шлифование и другие процессы обработки резанием сталей, чугунов, цветных металлов и сплавов, неметаллических конструкционных материалов, штамповка и прокатка металлов характеризуются крупными статическими и динамическими нагрузками, высокими температурами, воздействием обрабатываемого материала на режущий инструмент, штамповочное и прокатное оборудование. В этих условиях основное назначение СОЖ — уменьшить температуру, силовые параметры обработки и износ режущего инструмента, штампов и валков, обеспечить удовлетворительное качество обработанной поверхности. Помимо этого СОЖ должны отвечать гигиеническим, экологическим и другим требованиям, обладать комплексом антикоррозионных, моющих, антимикробных и других эксплуатационных свойств. Применение СОЖ при обработке металлов резанием и давлением позволяет увеличить производительность оборудования, повысить точность обработанных поверхностей и снизить их шероховатость, уменьшить брак, улучшить условия труда и в ряде случаев сократить число технологических операций[1, с.116].

В период 70–80 гг. производство СОЖ и технологических смазок (ТС) для металлообработки сформировалось как самостоятельная подотрасль нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.

С целью определения взаимозаменяемости отечественных и зарубежных СОТС предлагается следующая физико-химическая классификация смазочно-охлаждающих технологических средств для обработки металлов[2, с.71]:



Рис. 1. Классификация Смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ)

Основные классификационные обозначения дополняются индексацией, указывающей на отсутствие или присутствие присадок (усиливающих смазочные свойства СОТС), уровень легирования присадками, тип и класс присадок.

Индексация типов присадок, усиливающих смазочные свойства СОТС, следующая[2, с.72]:

О - отсутствие присадок;

П- присутствие присадок:

ПМ - малорастворимой

ПМ - малорастворимой, активной по отношению к меди,

ПВ - водорастворимой,

ПМВ - маслорастворимой,

ПН - маслорастворимой.

Степень легирования присадками, усиливающими смазочные свойства СОТС, по степени содержания присадок (масс.доля, %) определяется следующими индексами[2, с.73]:

1 - <5 (невысокое содержание);

2 – 5-10 (умеренное);

3 – 10-30 (высокое); 4 - >30 (очень высокое).

Классы присадок по химической природе имеют следующую индексацию[2, с.73]:

а – животные или растительные жиры, органические кислоты и сложные эфиры;

б- галоидсодержащие;

в – серосодержащие;

г – фосфорсодержащие;

д- азотсодержащие;

- е – содержащие другие активные элементы;
- ж – комплексные металлоорганические соединения;
- з- растворимые полимеры;
- и – органические наполнители;
- к – неорганические наполнители;
- л – другие химические соединения.

Данная классификация достаточно универсальна и применима для всех видов СОТС независимо от их назначения и агрегатного состояния. Ее можно использовать как для характеристики существующих товарных СОТС, так и для анализа патентной литературы при создании новых смазочных материалов для обработки металлов (резание, прокатка, штамповка, волочение).

Классификация предполагает существование только промышленных СОТС для обработки металлов. Однако ни один товарный ассортимент какой-либо фирмы или страны не содержит все возможные виды СОТС.

Система классификационной индексации обеспечивает информационную совместимость разрабатываемых смазочно-охлаждающих технологических средств. Она применима при решении вопросов материально-технического снабжения, внешней торговли и статистики, специализации и кооперирования производства, создания новых СОТС и их стандартизации [3, с. 53].

Список литературы

[1] Бердический Е.Г. *Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов*. Справочник. Москва, Машиностроение, 2004.

[2] Энтелис С.Г., Берлинер Э.М. *Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием*. Справочник. Москва, Машиностроение 1986.

[3] Худобин Л.В., Бабичев А.П., Булыжев Е.М. *Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием*. Справочник. Москва, Машиностроение, 2006.

Варичкин Иван Алексеевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: ivan.varichkin@rambler.ru

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

УДК 621.7

А.С. Свитка, И.Д. Соколова

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СТАНКОСТРОЕНИЯ В РОССИИ

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

Станкостроение относится к числу базовых отраслей машиностроения, от технического состояния которого во многом зависит уровень развития всей российской экономики. Наличие указанной отрасли, соответствующее качественное и количественное ее состояние способны обеспечить стране технологическую независимость и экономическую безопасность.

На сегодняшний день станок представляет собой комплекс механики, электроники (системы ЧПУ и контроллеры) и, разумеется, ПО (программное обеспечение). Эти элементы неотделимы друг от друга.

Крупнейшим направлением деятельности в станкостроении сегодня является производство металлообрабатывающего, деревообрабатывающего и кузнечно-прессового оборудования. Каждое из них ориентировано на собственных потребителей: так, производители деревообрабатывающего оборудования – на предприятия деревообрабатывающей и мебельной промышленности, производители кузнечно-прессового оборудования – на предприятия автомобильной промышленности, энергетического машиностроения.

Однако наиболее значимой частью отрасли является производство металлообрабатывающего оборудования, которое используется практически во всех отраслях промышленности. Именно оно является наиболее точным ориентиром состояния дел в отрасли. В целом, оставшиеся в России предприятия могут производить значительную часть той номенклатуры товаров, которая выпускалась в советские годы. Но по ряду причин спрос на продукцию станкостроения в последние годы резко сократился. В результате для поддержания производственных мощностей станкостроительные заводы вынуждены переключаться на выпуск непрофильной продукции, на которую имеется платежеспособный спрос. Завод «САСТА» (ранее Сасовский завод автоматических линий) производит дорожную технику по итальянским и немецким лицензиям, петербургский завод «ТБС» стал выпускать новые станки для обработки колес локомотивов.

Можно выделить несколько причин снижения спроса на продукцию станкостроения. С одной стороны, в настоящее время существует значительная избыточность парка оборудования в отраслях машиностроения по отношению к существующим в нем объемам производства. За последние годы при снижении объемов выпуска машиностроительной продукции бо-

лее чем на 60% парк оборудования в отраслях машиностроения сохранился практически на уровне начала 90-х годов. С другой стороны, машиностроительные предприятия – основные потребители станков – в большинстве испытывают серьезные финансовые трудности и просто не имеют средств, необходимых для приобретения нового оборудования [1]. По оценкам специалистов, ремонт и модернизация старого оборудования обеспечивают станкостроительным предприятиям сегодня основной доход (в среднем 80%).[2]

Эксперты утверждают, что емкость российского отремонтированного и модернизированного оборудования, к которому предъявляют интерес предприятия малого и среднего бизнеса, сопоставима с внутренним рынком новых изделий. Восстановление оборудования в зависимости от пожеланий заказчика может происходить с сохранением конструкции станка и его технологических возможностей, тогда это означает его ретрофинансирование. Модернизация оборудования предполагает совершенствование его приводов и измерительных систем, электрооборудования, ЧПУ. Современные системы ЧПУ имеют больший объем памяти, новые виды интерполяции, новые устройства ввода-вывода, поддержку новых языков, лучшую систему диагностики и т. д. Стоимость модернизированного станка на треть дешевле цены нового оборудования, в то время как проработать он сможет еще 10 – 15 лет.

Сейчас лидерами по производству металлообрабатывающего оборудования являются: Япония – 7,723 млрд. долл., Германия – 7,481 млрд. долл. и США – 4,349 млрд. долл. Россия в этом рейтинге занимает лишь 22-е место – 110,5 млн. долл. [2]

Но часть российской продукции по качеству не уступает иностранному оборудованию. Токарно-сверлильно-фрезерно-расточной станок с ЧПУ модели 2000 VHT-03 Pipe обрабатывает самые мощные в мире нефтегазовые трубы и отводы диаметром 1420/1422 мм с толщиной стенки до 40 мм, способные выдержать давление до 25 атм. В Стерлитамаке производят хонинговальные станки нового поколения на модульной основе с электромеханическими приводами необходимых движений, с числовым программным и адаптивным управлением. S500U Graphite для обработки композиционных материалов с тремя, четырьмя и пятью координатами может выпускаться заводом Стерлитамака. Созданы новые уникальные модели станков: многоцелевой станок 500V-5000 предназначен для комплексной обработки корпусных деталей повышенной сложности с размером по координате X до 5000 мм. Завод тяжелых станков в Коломне продолжает производить сложнейшие тяжелые машины. Российские станкостроители поставляют станки токарной группы и кузнечно-прессовое оборудование на экспорт – в Китай, Казахстан, Германию, Турцию, Украину.[3]

Импортозамещение в станкостроении в настоящее время приобретает особую актуальность. Для этого требуется полная реструктуризация отрасли, обеспечение комплекса мер по государственной поддержке отечественных производителей и научно-исследовательских институтов, стимулирование инвестиций в создание совместных предприятий и локализацию на территории России производства современной высокотехнологичной продукции. Как пример удачных инвестиций – компания SkodaMachineTool организовала совместное предприятие на базе Ульяновского завода тяжелых и универсальных станков. Московский завод «Красный пролетарий» предложил военно-промышленному комплексу и медицинской промышленности ряд новых нанотехнологий.

В стране создано акционерное общество «Станкопром», интегрирующее сведения о закупаемом оборудовании и нацеливающее отечественных станкостроителей на самые важные заказы. [3]

Наличие интегратора в виде банковской системы у группы «Стан», объединяющей станкозаводы Стерлитамака, Рязани, Иванова, Коломны и Саратова, поможет стать группе первым мощным кластером в станкостроении. В Санкт-Петербурге при наличии станкостроительных производств, предприятий, производящих комплектующие изделия, предприятий оборонного комплекса, высококвалифицированных кадров привлечение банковских ресурсов также может способствовать организации сильного станкостроительного кластера. [4]

Кроме производства основных деталей и узлов, входящих в состав станка, необходимо провести ряд перспективных НИОКР (научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок) и освоить выпуск всей компонентной базы российского производства: систем ЧПУ, электроприводов, различных датчиков, электрошпинделей, прецизионных подшипников.

Для проектирования станков следующего поколения необходимо создание единого распределенного инженерного центра, объединяющего работу конструкторов из разных городов страны в единой сети.

Вывод. Таким образом, вопрос сохранения и развития станкоинструментальной промышленности России является одним из важнейших факторов обеспечения модернизации промышленности. Пока ситуация находится под контролем: сегодня парк технологического оборудования российской промышленности на 90% сформирован из отечественного оборудования и его модернизацию неизбежно придется проводить на базе российского станкостроения. Но для качественного рывка вперед требуется производство новой техники в нужных объемах. Для этого необходимо привлечение инвестиций (главный инвестор - государство), проведение перспективных НИОКР, объединение инженерной мысли в единой сети, создание мощных станкостроительных кластеров.

ЛИТЕРАТУРА

[1] [Электронный ресурс] Современные тенденции и перспективы развития станкостроения России <http://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tendentsii-i-perspektivy-razvitiya-stankostroeniya-rossii> (дата обращения 17.03.2016 г.)

[2] [Электронный ресурс] Некоторые перспективы российских станкостроителей http://metal4u.ru/articles/by_id/167(дата обращения 29.03.2016 г.)

[3] [Электронный ресурс] Станкостроение о промышленной политике http://www.stan-group.com/press_centр/smi/stankostroenie-o-promyshlennoy-politike/(дата обращения 29.03.2016 г.)

[4] [Электронный ресурс] «Металлообработка-2015»: перспективы отечественного станкостроения http://www.tpp-inform.ru/analytic_journal/5786.html (дата обращения 29.03.2016 г.)

Соколова Ирина Дмитриевна- канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sokolovairinadm@rambler.ru

Свитка Анастасия Сергеевна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: svitka1993@yandex.ru

Б.Н. Агеев

ОБРАБОТКА МЕТОДОМ ТОЧЕНИЯ НА ВЕРТИКАЛЬНОМ ОБРАБАТЫВАЮЩЕМ ЦЕНТРЕ

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

Основными задачами общепринятой на сегодняшний день классификации металлорежущих станков являлись системный охват поля потенциальной деятельности станкостроителей, направленной на освоение как можно более широкого типажа станков, а также возможность их удобного и понятного обозначения исходя из реализуемых на них видов обработки [1]. По мере повышения технического уровня станков, появления новых технологий в металлообработке, совмещения нескольких видов обработки на одном станке, внедрения новых устройств автоматизации станков, в том числе УЧПУ, технологические возможности оборудования оказались сегодня гораздо шире, чем это отражено в его наименовании в соответствии со сложившейся классификацией.

Эксперимент заключается в обработке заготовки диаметром 25,2 мм из материала 12Х18Н10Т методом точения на вертикальном обрабатывающем центре MF 450 mini Mill. Станок имеет следующие основные характеристики:

- Полностью закрытое рабочее пространство
- Кольцевой механизм подачи СОЖ с двумя соплами
- Модернизированный консолидированный коллектор для воздуха/смазки (CALM)
- Ударопрочное защитное стекло
- Встроенный фильтр СОЖ
- Насос СОЖ

Наладка станка заключается в закреплении токарного резца в станочных тисках. Выверка нуля инструмента по оси X производится по касанию, по оси Y принимается равной высоте резца. Заготовка закрепляется в цанговую оправку.

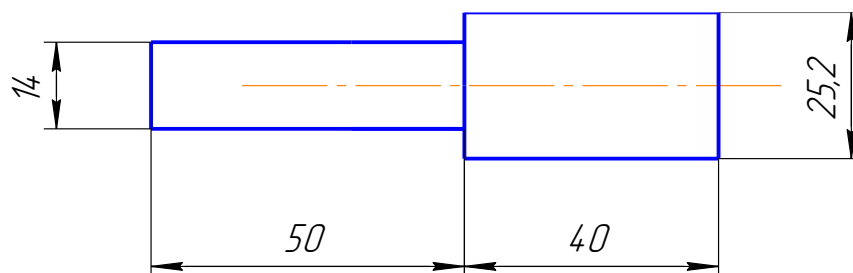


Рис 1. Заготовка

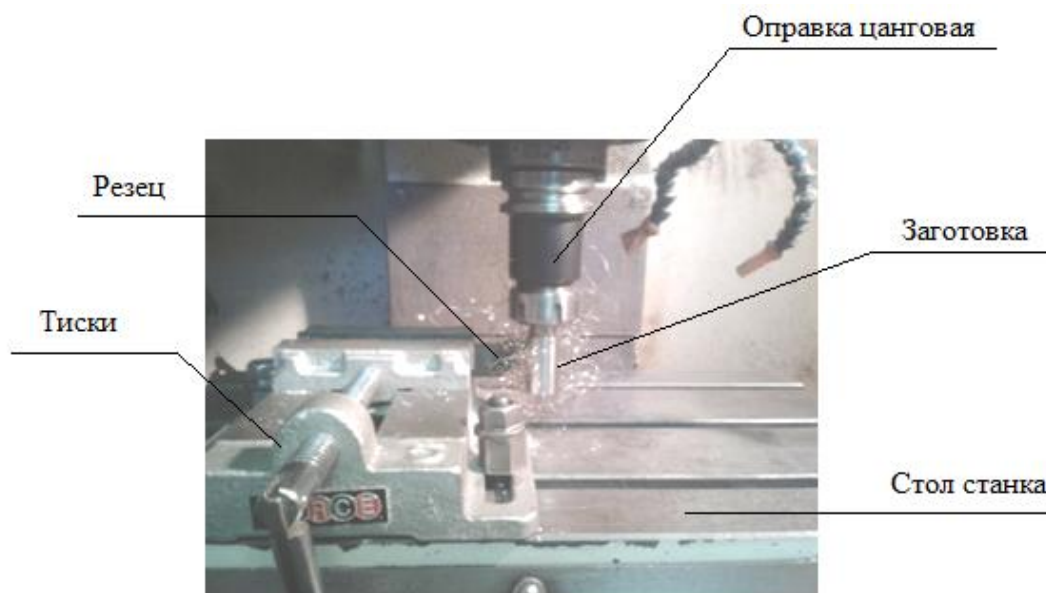


Рис 2. Наладка станка

При обработке используются следующие режимы резания [2].

$t=0,25$ мм;

$S_0=0,09$ мм/об;

$V = 76$ м/мин;

$n = 980$ мин⁻¹;

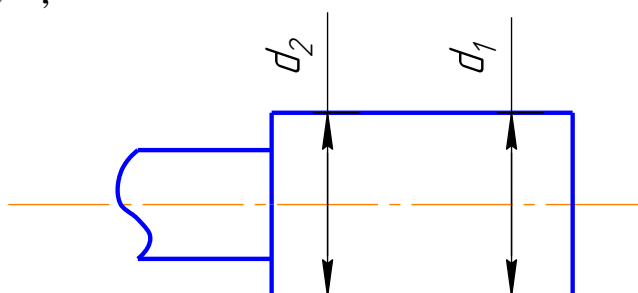


Рис 3. Деталь

Таблица 1. Измерения выполнены с помощью инструментального микроскопа ИМЦ 150x50 Б

№	1	2	3	d_{cp}
d	24,634	24,653	24,645	24,64
1	мм	мм	мм	4 мм
d	24,451	24,4604	24,456	24,45
2	мм	мм	мм	5 мм

В ходе обработки заготовки методом точения на вертикальном обрабатывающем центре MF 450 mini Mill была получена деталь с разницей в диаметрах $d_1 > d_2$. Конусообразность обусловлена нежесткостью заготовки.

Разработка новых методик обработки является актуальной задачей, так как современное машиностроительное производство характеризуется

неоправданно огромным разнообразием технологических процессов, оборудования, оснастки; большим объемом ежегодного обновления физически изношенных технологических средств; невысокой гибкостью производства; ограниченностью средств на приобретение и содержание большого парка оборудования для обеспечения каждого вида выполняемых работ, особенно у малых предприятий. При этом следует основываться не только на традиционных подходах, учитывающих специализацию оборудования, но и на рациональном использовании технологических возможностей уже имеющегося оборудования для концентрации на нем операций производственного цикла в максимальном объеме.

Список литературы:

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

[2]. Гузеев В.И., Батуев В.А., Сурков И.В. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым управлением: справочник. – М.: Машиностроение, 2007. – 366 с.

Агеев Борис Николаевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: ageevboris58@gmail.com

Ю.А. Савина

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

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

В машиностроении под поверхностью детали понимают наружный слой детали, который по своему строению и другим физическим свойствам отличается от внутренней части. Совокупность свойств, приобретаемых поверхностью детали в результате ее обработки, характеризуется обобщенным понятием «качество поверхности» [3, 135 с].

Качество поверхности характеризуется следующими основными параметрами:

- геометрией поверхности: микрогеометрией; степенью остроты впадин и выступов микронеровностей; волнистостью;
- структурой поверхностного слоя: кристаллическим строением; наличием макро-, микродефектов; наличием структурных превращений в поверхностном слое (закалка, отпуск, дисперсионное твердение);
- степенью деформации металла в поверхностном слое: деформацией внутри отдельных зерен; деформацией совокупности зерен (по слоям);
- наклепом поверхностного слоя: глубиной и степенью наклепа; наличием в поверхностном слое чрезмерно наклепанного металла с частично разрушенной кристаллической решеткой;
- остаточными напряжениями: знаком напряжений; величинами и распределением их по глубине; соотношением между остаточными напряжениями 1, 2, и 3-го родов;
- прочими параметрами (оптическими, магнитными, электрическими, адгезионными) [4, 203].

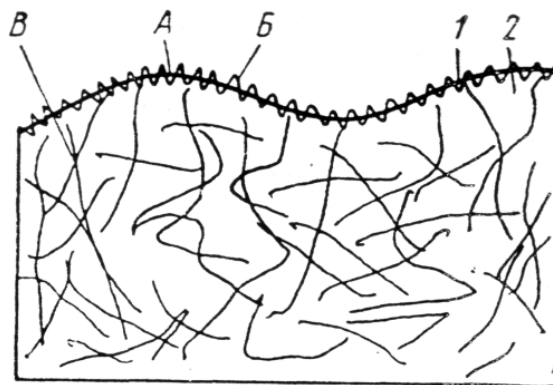


Рис. 1. Схема разреза металлического образца: 1 – внешняя поверхность; 2 – внутренняя поверхность; А – волнистость; Б – шероховатость (микро-

скопический и ультрамикроскопический профили поверхности);

В – микротрещины и субмикротрещины

Обработанную поверхность деталей можно условно разбить на внешнюю и внутреннюю, рис. 1 [3, 36 с]. Внешняя поверхность формируется макрогеометрическими параметрами; эта часть поверхности открыта для прямого исследования. Внутренняя поверхность недоступна для прямых исследований, так как находится внутри детали. Внутренняя поверхность имеет множество дислокаций, вакансий, микротрещин, т.е. дефекты слоя. Между внешней и внутренней фазовыми поверхностями металла не существует никакой физической границы – одна непосредственно переходит в другую.

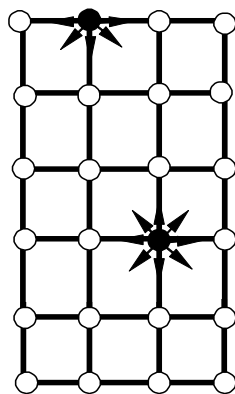


Рис. 2. Атомы в объеме и на границе

Внутренние частицы твердого тела окружены «соседями» со всех сторон, в то время как частицы, находящиеся во внешнем слое, имеют «соседей» лишь с одной стороны (рис. 2) [2]. Большая часть потенциальной энергии сконцентрирована в поверхностном слое твердого тела. Для перехода внутренних частиц на внешнюю поверхность, т.е. для образования новой поверхности, потребуется затратить определенную работу. Работа, необходимая для образования единицы новой поверхности, называется поверхностной энергией.

В поверхностном слое сосредоточен большой запас потенциальной энергии, чем во внутренних слоях. Отношение избыточной энергии к единице поверхности, называют удельной поверхностной энергией или просто поверхностной энергией [3, 77 с].

Сгущение энергии на поверхности объясняется тем, что действующие на молекулу внутри твердого тела молекулярные силы со стороны «соседей» взаимно компенсируются и дают равнодействующую, равную нулю. В поверхностном слое такой компенсации нет и на поверхностные молекулы действуют силы, направленные внутрь. Эти силы компенсируются сжатием поверхностного слоя (в итоге он оказывается упруго сжатым), что вызывает сгущение энергии.

При выполнении полного комплекса технологических операций в поверхностных слоях происходят сложные процессы взаимодействия имеющих и вновь созданных зон наклепов, напряжений и т.д. Таким образом проявляется связь поверхностной энергии и физико-механических свойств, сформированных в поверхностных слоях на предыдущих операциях, с физико-механическими свойствами, формирующимися на последующих операциях [1, 4 с]. Другими словами, пооперационное взаимодействие состояний поверхностного слоя есть не что иное, как проявление технологической наследственности при механической обработке деталей машин.

Рассматривая процессы, происходящие в поверхностных слоях, необходимо выявить параметры, изменяя которые можно получить деталь с нужными свойствами [1, 8 с]. Существующие физико-механические характеристики необходимо дополнить новыми показателями. Они должны быть связаны с энергетическими свойствами поверхностного слоя деталей. В первую очередь, следует использовать такие показатели, на значения которых может повлиять технолог.

Литература:

[1]. Мусохранов М.В. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя направляющих элементов машиностроения, автореферат. - Москва, 2006.

[2]. Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Сорокин С.П. Энергетические показатели качества деталей машин и методы их измерения. <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39121> (дата обращения 17.03.2016)

[3]. Сорокин В.М., Курников А.С. Основы триботехники и упрочнения поверхностей деталей машин: курс лекций – Н. Новгород: ВГАВТ, 2006. – 296с.

[4]. Ящерицын П.И., Зайцев А.Г., Барботько А.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. - Минск: Наука и техника, 1976. — 328 с.: ил.

Савина Юлия Александровна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ulia1158@yandex.ru

Ф.И. Антонюк, А.Б. Мкртчян

ОЦЕНКА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ХОЛОДНОЙ ОСАДКЕ

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

Осадка – операция, при которой происходит увеличение площади поперечного сечения заготовки, чаще всего цилиндрического, за счет уменьшения всей ее высоты [1].

При продольной осадке цилиндрической заготовки, наличие сил трения на его торцевых поверхностях приводят к тому, что цилиндрическая поверхность приобретает бочкообразную форму, вследствие неравномерности величины деформации. Трение играет решающую роль в образовании бочкообразности, а степень деформации и относительная высота заготовок, в той или иной мере, влияют на величину бочкообразности. Указанное явление наиболее широко исследовано дляковки в условиях горячей деформации, поскольку горячая осадка протекает в условиях максимального контактного трения на торцах заготовки. Для исправления бочкообразности боковой поверхности, при горячей осадке, применяют дополнительную операцию-обкатку вдоль оси заготовки, тем самым устраняя возникшую бочкообразность. Приковке, осадка может быть самостоятельной операцией так и отдельным переходом при обеспечении требуемой величины укова, для проработки качественной структуры поковки.

Уков – проработка структуры сплава с большой деформацией, для улучшения структуры поковки.

При холодной объемной штамповке, исходными материалами для изготовления заготовок являются калиброванные прутки. Штучные заготовки требуемой длины получают либо распиливанием, либо безотходной резкой прутков рубкой.

При практически безотходном разделении прутков в штампах возникают затруднения при отрезке относительно коротких заготовок $h \leq 1,5d$, которые имеют значительные искажения формы и торцов отрезанных заготовок. При разделении отрезке коротких заготовок на лентопильных станках и подобного рода станки.

Выбор способа разделения прутков и изготовления и изготовления штучных заготовок основывается на экономических показателях. Поэтому, чаще всего, оказывается экономически наиболее выгодным заготовки изготавливать отрезкой прутков, диаметр которых меньше чем требуемый, с последующей осадкой до нужного размера. Часто, этот метод считается самым эффективным [2].

Величина относительной бочкообразности рассчитывается, как разность между объемом осаживаемого тела и объемом $V_{ц}$, ограниченным двумя контактными поверхностями [1].

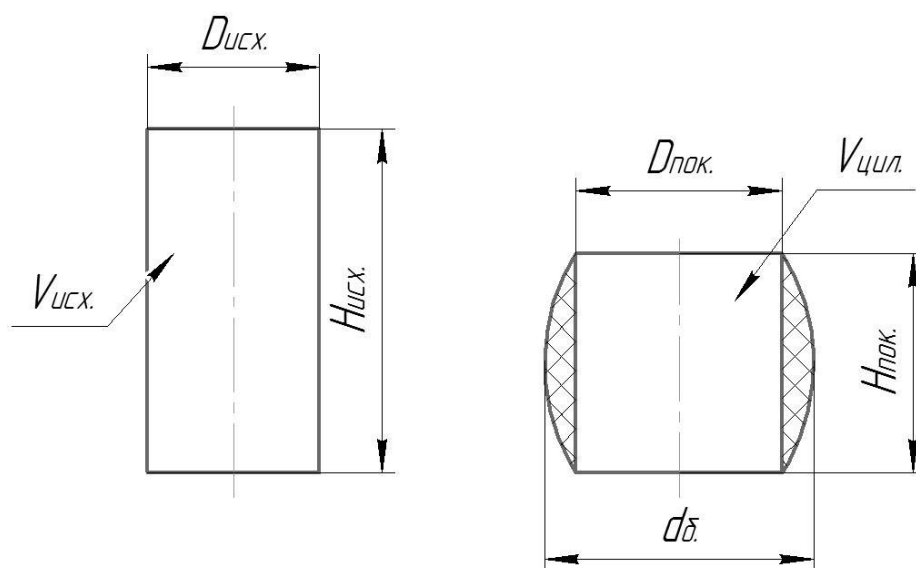


Рис. 1. Заготовки до и после осадки

$$V_{\text{бочки}} = V_{\text{исх.}} - V_{\text{цил.}} = \frac{\pi D_{\text{исх.}}^2}{4} \times H_{\text{исх.}} - \frac{\pi D_{\text{пок.}}^2}{4} \times H_{\text{пок.}}, \quad (1).$$

Для описания различных объемов, характеризующих бочкообразование, применяют показатель относительного объема бочкообразования.

$$\theta = \frac{V_{\text{исх.}} - V_{\text{цил.}}}{V_{\text{исх.}}} = \frac{V_{\text{боч.}}}{V_{\text{исх.}}}, \quad (2).$$

Данный показатель является относительным и выражает объемную характеристику формоизменения. Размерный показатель не так важен при горячей осадке, т.к. бочкообразность устраняется обкаткой, однако при холодной осадке обкатка невозможна. Наряду с указанными проблемами специфика технологии ХОШ проявляется в том, что оценку формоизменения осажённых заготовок оценивают не объемными показателями а размерами: высотой и максимальным диаметром осажённой заготовки- $d_{\text{б}}$. Точность указанного размера зависит от специфики последующей операции. Например, при выполнении операций холодного обратного выдавливания поволоки типа стакан, односторонний зазор между исходной заготовкой и матрицей не должен превышать 0,2...0,5 мм, при диаметре до 84мм. Подобные требования предъявляют к исходным заготовкам, при штамповке в закрытых штампах. При прямом выдавливании предъявляются менее жесткие требования, зазор до 1,5...2мм. В описанных случаях объемный показатель бочкообразности не дает полной картины о размерах заготовки. В современном производстве существует потребность в размерном выражении величины бочкообразности, через диаметр осажённой заготовки. Данная идея была предложена Воронцовым А.Л.. Автор исследовал не только влияние различных условий трения на величину формоизменения,

но и произвел попытку описать боковую поверхность осажённых заготовок единой кривой.

Наибольший вклад в изучение описанного явления принадлежит Я.М.Охрименко, который показал, что с увеличением степени деформации бочкообразность сначала увеличивается, достигая максимума, а затем уменьшается. При этом чем больше начальное отношение d/h тем меньшая бочкообразность получается при осадке, и при меньшей степени деформации достигается ее максимум. Повышение коэффициента контактного трения во всех случаях увеличивает бочкообразность и изменяет степень деформации, при которой наблюдается максимальная бочкообразность[3].

Кроме степени деформации, на величину бочкообразования влияют коэффициент трения на торцах заготовки, относительная высота заготовки, а также скорость деформации.

В ходе исследований проведенных на кафедре М1-КФ в КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана был проведен эксперимент, в ходе которого была установлена зависимость величины бочкообразности от скорости деформации, однако эксперимент был проведен для низких заготовок, и необходимо установить зависимость величины бочкообразности от скорости деформации при других степенях деформации.

Попытки теоретического определения формоизменения боковой поверхности при холодной осадке предпринимались неоднократно, но ни в одном теоретическом исследовании не получено окончательных формул, описывающих форму боковой поверхности. Необходимо восполнить данный пробел в теории обработки металлов давлением.

Список использованной литературы:

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

[2]. Lawson R. Fifth international Conference on Cold Forging Brighton. UK. Oct. 1995p. 400.

[3]. Охрименко Я.М. *Технология кузнечно-штамповочного производства*. учеб, для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1976. - 560 с.

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

Мкртчян Арман Бениаминович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: armanmkrtyan95@mail.ru

И.В. Шаронов, И.А. Филиппова

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ВТОРИЧНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ. ВНЕПЕЧНАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

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

Сталь – важнейший конструкционный материал для машиностроения, транспорта и т. д. Сталеплавильное производство – это получение стали из чугуна и стального лома в сталеплавильных агрегатах металлургических заводов. Сталеплавильное производство является вторым звеном в общем производственном цикле черной металлургии.

Контроль качества стали предполагает проведение ряда операций и приемов, обеспечивающих заданный уровень качества металла в процессе его производства, а также оценку соответствия фактических потребительских характеристик и товарного вида готовой продукции требованиям стандартов. К наиболее распространенным дефектам относятся химическая и структурная неоднородность, повышенное содержание вредных примесей и неметаллических включений, дефекты макро- и микроструктуры, внутренние дефекты, дефекты формы и поверхности изделий и т. д.

В тех случаях, когда технологические операции, обеспечивающие получение металла требуемого качества, непосредственно в самом агрегате приводят к потере его производительности, их выполняют во вспомогательной емкости (ковше или др.), т. е. переводят в разряд внепечной, или вторичной, металлургии. Основную цель вторичной металлургии можно сформулировать как осуществление ряда технологических операций в специальных агрегатах быстрее и эффективнее по сравнению с решением аналогичных задач в обычных сталеплавильных печах. В настоящее время методами внепечной металлургии обрабатывают сотни миллионов тонн стали массового назначения. Установки для внепечной обработки имеются практически на всех заводах качественной металлургии. Обработке подвергают металл, выплавленный в мартеновских печах, дуговых печах и конвертерах. О масштабах применения методов вторичной металлургии и причинах этого можно судить, отталкиваясь от следующих конкретных проблем:

Внепечная обработка и разливка. Практика показала, что эффективная работа установок непрерывной разливки обеспечивается лишь в тех случаях, когда мы имеем дело с чистой (прежде всего по содержанию серы) сталью стандартно-высокого качества по составу и температуре от плавки к плавке. Внепечная обработка стали обеспечивает эти условия.

Внепечная обработка и работа конвертеров. Переход в конвертерном производстве на использование более дешевого низкокремнистого и маломарганцовистого чугуна (малошлаковая или безшлаковая технология

конвертерной плавки) эффективен лишь в том случае, когда выпускаемый из конвертера металл дополнительно рафинируется вне агрегата. Это рафинирование обеспечивает внепечная обработка.

Внепечная обработка и ферросплавы. При наличии внепечной обработки можно использовать более дешевые и менее дефицитные ферросплавы, в частности высокоуглеродистые ферросплавы при производстве низкоуглеродистых марок стали.

Внепечная обработка и прямое легирование. При организации методов внепечной обработки появляется возможность во многих случаях использовать способы прямого легирования или обходиться вообще без расхода ферросплавов (путем использования природно-легированных руд, шлаков ферросплавного производства и отходов других производств, таких, например, как абразивное и др.).

Внепечная обработка и работа дуговых печей. При наличии внепечной обработки возрастает эффективность использования нового мощного электротехнического оборудования (прежде всего трансформаторов), обеспечиваются условия для достижения высокой производительности труда, что особенно важно при высоком уровне заработной платы. Кроме того, появляется возможность иметь более компактно спланированные цехи, облегчаются условия для улавливания вредных пылегазовых выделений и выбросов и др.

Внепечная обработка и новые марки стали. Разработка и совершенствование методов внепечной обработки способствуют разработке и организации производства новых марок стали с особо низким ($< 0,01$ %) содержанием углерода, низким ($< 0,002$ %) содержанием серы и весьма низким содержанием газов (IF-стали, некоторые новые марки нержавеющей стали и др.).

Внепечная обработка и эффективность использования металла. В данном случае имеется в виду связь между качеством выплавляемого металла и надежностью получаемых из него изделий.

Внепечная обработка и качество используемой металлошихты. Возможности получения стали той или иной степени чистоты существенно различаются для условий конвертерного и электросталеплавильного производств. Конвертерное производство имеет то преимущество, что шихта состоит в основном из жидкого чугуна, не содержащего обычно примесей цветных металлов (по крайней мере, заметного их количества). Однако чугун содержит некоторое количество таких примесей, как сера и фосфор. Электросталеплавильное производство связано с использованием в качестве металлошихты в основном металлолома. Отдельные виды металлолома содержат заметную долю примесей цветных металлов. Получают распространение технологии предварительной обработки металлолома с целью извлечения этих примесей. В данных случаях создаются комплексные технологии внепечной обработки металлолома и жидкой стали.

Внепечная обработка — основные технологические приемы. Современные сталеплавильные технологии с использованием методов внепечной обработки основываются на использовании следующих технологических приемов:

- а) обработка металла вакуумом;
- б) продувка металла инертными газами;
- в) одновременная обработка вакуумом и инертными газами (см. рис. 1);
- г) одновременная обработка вакуумом и продувка кислородом;
- д) одновременная продувка инертными газами и кислородом;
- е) обработка твердыми шлаковыми смесями;
- ж) обработка жидкими шлаками;
- з) одновременная обработка жидкими синтетическими шлаками и инертными газами;
- и) комплексная обработка металла вакуумом, кислородом, инертными газами и шлаковыми смесями;
- к) вдувание вглубь металла порошкообразных реагентов;
- л) введение вглубь металла реагентов в виде композитных блоков, проволоки и т. п.

В настоящее время нет такого способа обработки жидкой стали в ковше, который позволил бы одновременно значительно снизить в металле содержание неметаллических включений, серы и газов. Поэтому в зависимости от поставленной задачи применяется тот или иной способ внепечной обработки металлов. Обработка металлов в ковше синтетическим шлаком приводит к снижению в стали серы, неметаллических включений и кислорода. Сущность метода заключается в том, что металл выпускают из печи в ковш, частично заполненный жидким шлаком (4 - 5 % от массы металла), который предварительно выплавляют в специальном агрегате.

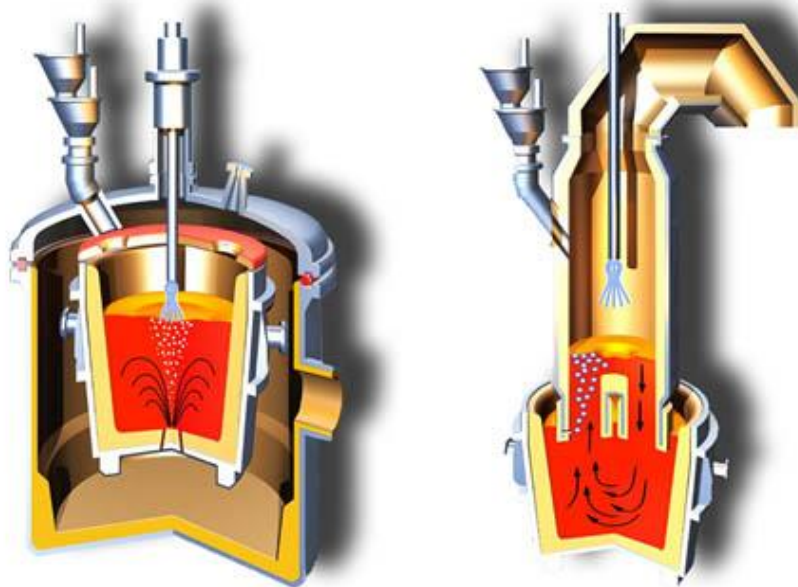


Рис. 1. Вакуумирование стали в ковше (дегазация)

Жидкий шлак и металл интенсивно перемешиваются. Сера, кислород и неметаллические включения переходят из металла в шлак. При обработке металла синтетическим шлаком важную роль играет его состав и физико-химические свойства. Шлак должен иметь низкую температуру плавления и вязкость, а также обладать высокой основностью и низкой окисленностью. Повышение качества стали, обработанной синтетическим шлаком, компенсируют затраты, связанные с выплавкой такого шлака. Продувка металла в ковше порошкообразными материалами является одним из современных способов повышения качества стали и производительности сталеплавильных агрегатов. Жидкий металл в потоке инертного газа (аргона) через фурму вводят измельченные десульфураторы и раскислители. В результате такой обработки можно получить металл с содержанием серы и кислорода менее 0,005 % каждого. Обработка жидкой стали аргоном в ковше является наиболее простым способом повышения качества металла. Аргон вдувают в жидкую сталь через пористые и огнеупорные пробки, которые устанавливают в днище ковша. Аргон не растворяется в жидкой стали, поэтому при продувке металла аргоном в объеме жидкой стали образуется большое количество пузырей, которые интенсивно перемешивают металл и выносят на его поверхность неметаллические включения. Кроме того, водород и азот, растворенные в стали, переходят в пузыри аргона и вместе с ним покидают жидкий металл, т. е. происходит дегазация стали. Внепечная обработка жидкой стали вакуумом в промышленных масштабах стала применяться сначала 50-х годов. Наиболее простым способом является вакуумирование стали в ковше. В этом случае ковш с жидким металлом помещают в герметичную камеру, из которой откачивают воздух. При снижении давления в камере металл закипает вследствие бурного выделения из металлов газов. После дегазации металла камеру разгерметизируют, а ковш с вакуумированным расплавом отправляют на разливку.

Реальные технологические процессы внепечной обработки являются комплексными, сочетающимися в различных комбинациях отмеченные выше технологические воздействия на металл. Степень очистки сплава, тем не менее, должна согласовываться с технологией обработки и условиями эксплуатации деталей машин. Что, например, даст удаление всей серы из стали за границу ее растворимости (10⁻⁴ % при 700 К). Для рядовых сталей это позволит подавить красноломкость без тех 0,5—0,8% Мп, которые вводятся с чугуном. Однако лучше связать серу в нерастворимые сульфиды, чтобы сохранить обрабатываемость резанием. В шарикоподшипниковой стали до предела полезной очистки уже доходили и нашли, что серу разумно снижать, сохраняя пропорцию с кислородом, иначе остроугольные оксиды, лишенные сульфидной оболочки, ускоряют контактную усталость. В нержавеющей сталях, убрав сульфиды, можно подавить питтинг (что и достигали обработкой поверхности в расплаве кальция), однако это

вряд ли замедлит, например, коррозионное растрескивание, а потому полезно лишь для некоторых областей применения.

Современный окружающий мир нельзя представить без таких металлов и сплавов, как чугун, сталь, сплавы цветных, драгоценных и др. металлов. Будущее человечества тесно связано с использованием новых сплавов и металлов на металлической основе. Железо – фундамент современной цивилизации, основа основ технического прогресса. И чем выше поднимается человечество по ступеням развития, тем больше его нужда в качественных сплавах, обладающих новыми свойствами и характеристиками, основа которых закладывается в металлургических процессах.

Список литературы:

[1] Основы металлургического производства (черная металлургия). М: «Металлургия», 1988.

[2] Энциклопедия «Радость познания», Т.1 Наука и вселенная. М: «МИР», 1983.

[3] Жадан, В. Т. Технология металлов и других конструкционных материалов: учебник для вузов / В. Т. Жадан, Б. Г. Гринберг, В. Я. Николаев; под ред. П. И. Полухина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Высшая школа», 2006.

Шаронов Иван Владимирович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: izzzivzzzf@gmail.com

Филиппова Инна Аркадьевна - канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии обработки материалов" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kатран-ogmet-04@yandex.ru

В.В. Ромашов, Д.М. Сахапов, И.А. Филиппова

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ

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

Электролиз криолитоглиноземных расплавов является основным способом получения алюминия, хотя некоторое количество алюминиевых сплавов получается электротермическим способом. Промышленный электролиз криолитоглиноземных расплавов имеет ряд существенных недостатков: высокий удельный расход электроэнергии, низкий удельный съем металла и срок службы электролизеров, большие трудовые и капитальные затраты, выделение вредных веществ в атмосферу и ряд других. В связи с этим разрабатываются альтернативные способы получения алюминия.

Электротермическое получение алюминиево-кремниевых сплавов.

Получить чистый алюминий непосредственным восстановлением его оксида невозможно [5]. В нашей стране впервые в мире разработан и осуществлен в промышленном масштабе с достаточно высокими технико-экономическими показателями способ получения силикоалюминия (алюминиево-кремниевых сплавов).

В качестве исходного сырья, кроме каолинов ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), могут быть использованы кианиты ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$), дистенсиллиманиты ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) и низкожелезистые бокситы.

Сплав после электроплавки поступает на очистку от неметаллических примесей. Для этого подают флюс, состоящий из смеси криолита и хлорида натрия, который смачивает эти примеси и "собирает" их. Рафинированный силикоалюминий имеет средний состав (%): Al – 61; Si – 36; Fe – 1,7; Ti – 0,6; Zr – 0,5; Ca – 0,7. Этот сплав не годится для производства силумина и требует очистки от железа. Наиболее распространен способ очистки марганцем, который образует с железом тугоплавкие интерметаллиды.

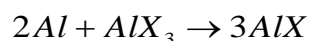
Полученный сплав разбавляют техническим электролитическим алюминием или вторичным алюминием до состава, отвечающего различным сортам силуминов, и разливают в слитки.

Преимущества такого способа получения силумина перед сплавлением электролитического алюминия с кристаллическим кремнием состоят в следующем: большая мощность единичного агрегата – современные печи имеют мощность 22,5 МВЧА, что примерно в 30 раз выше мощности электролизера на 160 кА, а, следовательно, уменьшение грузопотоков, снижение капитальных затрат и затрат труда; применение сырья с низким кремниевым модулем, запасы которого в природе достаточно велики.

Теоретически из алюминиево-кремниевого сплава можно выделить различными приемами чистый алюминий. Однако из-за сложности аппара-

турного и технологического оформления в промышленности эти способы в настоящее время не реализуются.

Субгалогенидный процесс. Известно, что если нагреть смесь галогенида и загрязненного алюминия, то при понижении температуры выделяется чистый алюминий. Это открытие вызвало интерес к системам алюминий – галогенид алюминия. Было определено, что металлический алюминий реагирует с AlX_3 (где X – галоген) при высокой температуре, образуя субгалогенид алюминия:

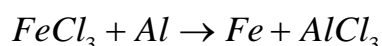


Поскольку субгалогенид алюминия является газообразным продуктом, равновесие смещается влево при понижении температуры. Например, $AlCl_3(g)$ можно получить из Al и $AlCl_3$ в реакционной зоне при относительно высоких температурах, а затем перенести в парообразном состоянии в более холодную зону, где он диспропорционирует на чистый алюминий и хлорид алюминия. Константа равновесия для системы Al – $AlCl_3$ выше, чем для системы Al – AlF_3 , и поэтому хлоридная система может быть использована для промышленных процессов. Температура образования субхлорида около $1300^\circ C$ при атмосферном давлении. Этот процесс особенно привлекателен для выделения алюминия из сплавов, так как галогенид алюминия взаимодействует с алюминием и практически не взаимодействует с большинством других металлов. Трудности возникают только с некоторыми летучими галогенидами, такими как $FeCl_3$, $MnCl_2$, и некоторыми другими. Они могут образовывать смеси с $AlCl_3$ и загрязнять получаемый алюминий.

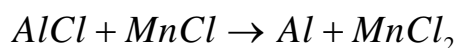
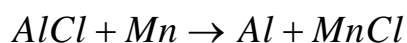
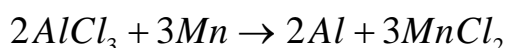
Субхлоридный метод представляет наибольший интерес для промышленного рафинирования алюминиевых сплавов.

Тот-процесс. Схема получения алюминия по способу Тота представляет собой следующий процесс. Алюминийсодержащее сырье после соответствующей подготовки хлорируют в кипящем слое в присутствии кокса и $SiCl_4$. Последний используется для подавления реакции хлорирования SiO_2 . В результате хлорирования в печах кипящего слоя (КС) получается парогазовая смесь (ПГС), в состав которой входят $AlCl_3$, $FeCl_3$, $TiCl_4$ и $SiCl_4$. В первом конденсаторе из ПГС выделяется около 75 % $FeCl_3$ в твердом состоянии и направляется в реактор-окислитель, где взаимодействует с кислородом воздуха, в результате чего образуются Fe_2O_3 и Cl_2 . Хлор возвращается на хлорирование. Во втором конденсаторе выделяется оставшийся $FeCl_3$ и происходит конденсация $AlCl_3$. Хлориды титана и кремния конденсируются в третьем конденсаторе. Разделение этих хлоридов осуществляется в ректификационной колонне.

Хлориды алюминия и железа, выгруженные из второго конденсатора, нагреваются, перекачиваются в контактный очиститель, где контактируют в противотоке с подвижным слоем твердых частиц алюминия. При этом идет реакция:



Очищенный хлорид алюминия поступает на металлотермическое восстановление. Технически доступными восстановителями, имеющими большее сродство к хлору, чем алюминий, являются натрий, магний и марганец. Однако первые два элемента дороги и их производство весьма энергоемко. Поэтому, по мнению разработчиков процесса, определенные преимущества имеет использование марганца, который можно регенерировать из хлорида карботермическим методом со значительно меньшими энергозатратами. При восстановлении хлорида алюминия марганцем протекают реакции:



Хлорид алюминия возвращается в реактор для получения алюминия, а хлорид марганца взаимодействует с кислородом с образованием твердых оксидов марганца и хлора. Оксид марганца восстанавливается до металла карботермическим методом в шахтных печах, куда загружают кокс и известняк. Марганец в печь добавляется для восполнения потерь его в ходе процесса.

К недостаткам данного процесса, как и других металлотермических методов, относятся загрязнение получаемого продукта металлом-восстановителем, необходимость организации производства по регенерации восстановителя и увлечение капитальных затрат.

Исследовательские работы по получению алюминия путем восстановления марганцем в лабораторном и укрупненном масштабах были выполнены в 1966 – 1973 гг. В последующем в литературе не было сообщений о промышленном развитии данного направления, что, видимо, обусловлено значительными трудностями по технической реализации этого сложного многоэтапного процесса.

Электролиз хлоридных расплавов. В январе 1973 г. фирма "Alcoa" заявила о разработке нового способа получения алюминия. Фирма работала над процессом 15 лет и затратила 23 млн. долларов. Данный способ предусматривает получение хлорида алюминия и последующий его электролиз. В 1976 г. появились сообщения о переходе фирмы "Alcoa" к промышленному внедрению хлоридной технологии получения алюминия. В г. Палестина (Техас, США) работал завод с проектной мощностью 30 тыс. т выпуска алюминия в год этим способом.

Принципиальная технологическая схема представлена на рис. 1.

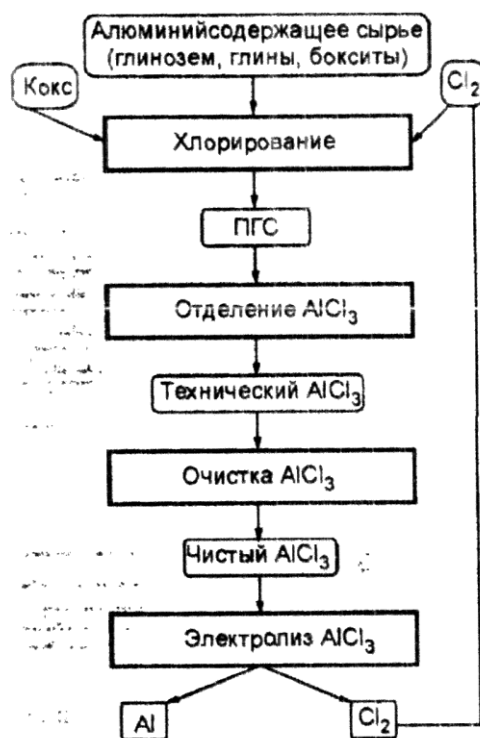


Рис. 1. Технологическая схема получения алюминия из хлорида

Хлорид алюминия имеет высокое сродство к воде и тенденцию к образованию оксидов и гидрооксихлоридов. В связи с этим получение его в чистом виде является трудной задачей. Присутствие влаги вызывает коррозию, а присутствие кислородсодержащих соединений приводит к выделению осадков и окислению анодов. Фирмой "Alcoa" предложено хлорирование очищенного глинозема, что частично решает названные проблемы. Тем не менее, необходимо соблюдать повышенные требования к чистоте углерода при хлорировании в отношении водорода или влаги.

В последнее время появились сообщения, что фирме «Toth Aluminium Corporation» удалось получить в крупнопромышленном масштабе хлорид алюминия, содержащий не менее 99,97% основного компонента.

Полученный хлорид алюминия в гранулированном или парообразном состоянии поступает на электролиз. При электролизе используются графитовые нерасходуемые электроды. Это преимущество (по сравнению с электролизом криолитоглиноземных расплавов) вместе с относительно низкой температурой процесса (около 700°C) дает возможность полной герметизации электролизеров.

Электролитическое разложение хлорида алюминия теоретически требуют более высокого напряжения, чем электролиз криолитоглиноземных расплавов, так как напряжение разложения хлорида алюминия намного больше. Таким образом, к недостаткам процесса можно было бы отнести необходимость подвода в электролизер большого количества тепла и значи-

тельные потери напряжения. Однако высокие омические и тепловые потери значительно снижаются при использовании системы биполярных электродов.

Основные прогнозируемые и подтвержденные при промышленном внедрении в США преимущества способа производства алюминия электролизом его хлорида по сравнению с электролизом криолитоглиноземных расплавов, заключаются в возможности использования низкокачественного алюминийсодержащего сырья, снижении примерно на 30 % удельного расхода электроэнергии при электролизе, исключении расхода высококачественных углеродсодержащих электродных материалов, применении менее дефицитных и агрессивных хлоридов вместо фторидов, повышении производительности труда, снижении капитальных вложений, приведенных затрат, стоимости конечной продукции и вредных выбросов в окружающую среду.

В последнее время преимущества хлоридного способа получения алюминия становятся более ощутимыми в связи с удорожанием электроэнергии, исходных материалов для существующего промышленного способа производства алюминия, повышением требований к охране окружающей среды и отсутствием до сих пор положительных результатов по получению чистого глинозема из низкокачественного небокситового сырья.

Таким образом, наиболее перспективным из альтернативных способов получения алюминия является электролиз хлорида алюминия в электролизерах с биполярными электродами.

Список литературы

[1] Розен Б. М., Розен Я. Б. Металл особой ценности. – М.: Металлургия, 1975. – 128 с.

[2] Колодин Э. А., Свердлин В. А., Свобода Р. В. Производство обожженных анодов алюминиевых электролизеров. – М.: Металлургия, 1980, – 84 с.

[3] Янхо Э. А., Воробьев Д. Н. Производство анодной массы. – М.: Металлургия, 1975. – 128 с.

[4] Веткжов М. М., Цышлаков А. М., Школьников С. Н. Электрометаллургия алюминия и магния. – М.: Металлургия, 1987. – 320 с.

[5] Щенков В.В., Литвак С.Н. Разработка новых технологических процессов получения алюминия // Цв. металлургия: Бюл. НТИ / Цветметинформация. – 1974. – № 9. – С. 38 – 41.

[6] Сандлер Р. А., Рапир А. Х Электрометаллургия алюминия и магния. – Л.: ЛГИ, 1983. – 94 с.

Ромашов Владислав Викторович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fedulovalove@mail.ru

Сахапов Данис Максютрович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: saharov.danis2014@yandex.ru

Филиппова Инна Аркадьевна - канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии обработки материалов" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: katran-ogmet-04@yandex.ru

Д.А. Тарасенков, И.А. Филиппова

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

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

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом или ВЧШГ благодаря уникальному комплексу высоких механических, технологических и эксплуатационных свойств находит все большее применение в технике как перспективный конструкционный материал, а также как заменитель серого и ковкого чугунов, стальных отливок и поковок. Как известно, в чугунах форма зерна графита оказывает определяющее влияние на прочностные характеристики материала. В высокопрочном чугуне ВЧШГ графитные включения имеют шаровидную форму.

В 1943 году на Съезде Американской Ассоциации Литейщиков (AFS) J.W. Bolton фантазировал на тему управления формой графита в сером чугуне. Несколько недель спустя американец Keith Dwight Millis в исследовательской лаборатории "International Nickel Company" (INCO) сделал следующее открытие: при добавлении магния в расплав чугуна в ковше, в отливке получается не пластинчатый графит, а графит практически идеальной шаровидной формы.

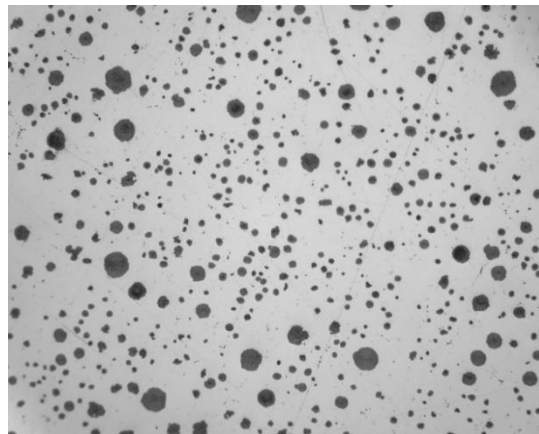


Рис. 1. Микроструктура высокопрочного чугуна с шаровидной структурой на ферритной основе (ВЧШГ), $\times 100$.

Исходя из вышесказанного, можно фактически считать годом рождения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ) 1943 год. Наши источники [1] называют днем рождения высокопрочного 7 мая 1948 года, когда состоялся съезд американских литейщиков в Филадельфии и фирмой "International Nickel Company" было сделано публичное заявление о получении высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

Однако авторы [2] официальным днем рождения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом склонны считать все-таки более позднюю дату, а именно 25 октября 1949 года, когда Кейтом Д. Миллисом был получен патент на высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ) за номером 2485760 (Cast ferrous alloy).

В тех же годах (1948-1949) в Киеве и Москве начинает активно развиваться это направление: создаются научные школы по разработке технологий получения ВЧШГ и изучению свойств высокопрочных чугунов...

Необходимо отметить, что российский стандарт на высокопрочный чугун, ГОСТ 7293-85, несмотря на название "Чугун с шаровидным графитом для отливок" распространяет свое действие как на высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ), так и на высокопрочный чугун с вермикулярным графитом (ВЧВГ).

Получение высокопрочного чугуна. Так как рост производства отливок из ВЧШГ обусловлен исключительно благоприятным сочетанием физико-механических, эксплуатационных и механических свойств этого материала, а также экономическими соображениями, объем производства и потребления отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом непрерывно увеличивается. Чугун с шаровидным графитом получают из серых, в результате модифицирования магнием или церием (добавляется 0,03...0,07% от массы отливки). По сравнению с серыми чугунами, механические свойства повышаются, это вызвано отсутствием неравномерности в распределении напряжений из-за шаровидной формы графита.

Получение в структуре чугуна шаровидной формы графита основано на отдельной или совместной обработке жидкого чугуна магнием, РЗМ, кальцием и другими присадками, содержащими в том или ином количестве указанные (сфероидизирующие графит) вещества, присадки.

Модификаторы на основе магния, в свою очередь, разделяют на металлический магний и магнийсодержащие лигатуры. Металлический магний имеет плотность в 4 раза меньшую, чем расплавленный чугун, поэтому при простом введении его в металл он всплывает и сгорает ослепительно ярким пламенем. При принудительном погружении его в расплав чугуна при температуре 1400 °С магний испаряется и давление его паров может достигать 0,7 МПа. Пары магния, выходя из расплава, вызывают интенсивное перемешивание и выбросы металла. Над поверхностью расплава пары магния сгорают. Обычно в металле остается не более 1/10 количества введенного в него магния.

Для улучшения усвоения магния расплавом используются магнийсодержащие лигатуры, магний—кремний—железо, магний—никель, магний—медь, магний—никель—медь и др. Особенно широкое распространение получили в свое время тяжелые лигатуры содержащие около 85 % никеля. Плотность такой лигатуры выше, чем жидкого чугуна, что в сочетании с относительно низким содержанием магния предопределяет ее хорошее

усвоение и незначительный пироэффект. По теории и практике применения высокопрочного чугуна при изготовлении отливок опубликовано большое количество работ, как нашими, так и зарубежными учеными. Несмотря на обилие трудов на эту тему, до сих пор дискуссионными остаются такие важные вопросы, как оптимальный состав модификатора, условия и технологии модифицирования, механизм образования графита, режимы термообработки и другие.

Способы введения в расплав сфероидизирующих модификаторов.

Из всего многообразия способов ввода в расплав сфероидизирующих модификаторов к настоящему времени получили применение лишь несколько способов, удовлетворяющих условиям техники безопасности и обеспечивающих достаточно высокий коэффициент усвоения модификатора. Способ ввода модификатора выбирают с учетом масштабов производства и стоимости применяемого оборудования (См. рис. 2).

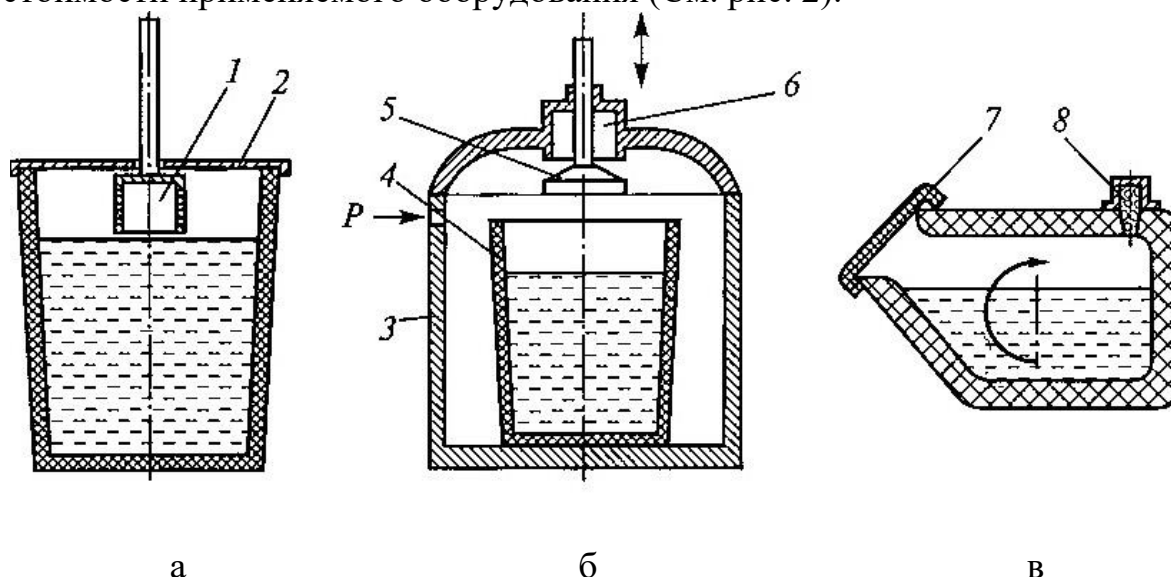


Рис. 2. Способы ввода в расплав сфероидизирующих модификаторов: а — под колокольчиком; б — в автоклаве; в — в герметизированном ковше-конвертере; 1 — колокольчик; 2 — крышка; 3 — корпус автоклава; 4 — ковш с металлом; 5 — мешалка; 6 — полость для модификатора; 7 — крышка ковша; 8 — модификатор

Для целей лабораторных и исследовательских работ, а также при небольших объемах производства предпочтителен способ ввода модификатора под колокольчиком в ковше с металлической крышкой (рис.2, а). При использовании в качестве модификатора металлического магния наилучшие результаты дает применение автоклава (рис.2, б). Широкое распространение получили также герметизированные Ковши, принцип действия которых показан на рис. 2, в. В боковую полость ковша закладывают навеску модификатора 8. После заливки металла ковш закрывают крышкой и поворачивают в вертикальное положение.

Расход модификатора зависит от его состава, способа ввода в металл, содержания в металле серы, температуры металла и других факторов и составляет от 0,15 % для металлического магнезия, вводимого в автоклаве, до 2,5 % для лигатур при добавлении их в ковш. Необходимое и достаточное количество вводимого модификатора уточняется только опытным путем.

Высокопрочные чугуны содержат: углерода – 3,2...3,8 %, кремния – 1,9...2,6 %, марганца – 0,6...0,8 %, фосфора – до 0,12 %, серы – до 0,3 %.

Эти чугуны обладают высокой жидкотекучестью, линейная усадка – около 1%. Литейные напряжения в отливках несколько выше, чем для серого чугуна. Из-за высокого модуля упругости достаточно высокая обрабатываемость резанием. Обладают удовлетворительной свариваемостью.

Из высокопрочного чугуна изготавливают тонкостенные отливки (поршневые кольца), шаботы ковочных молотов, станины и рамы прессов и прокатных станов, изложницы, резцедержатели, планшайбы.

Отливки коленчатых валов массой до 2..3 т, взамен кованных валов из стали, обладают более высокой циклической вязкостью, малочувствительны к внешним концентраторам напряжения, обладают лучшими антифрикционными свойствами и значительно дешевле.

Обозначаются индексом ВЧ (высокопрочный чугун) и числом, которое показывает значение предела прочности, умноженное на 10-1 ВЧ 100.

Стандартные марки ВЧ в зависимости от различных видов термообработки могут иметь предел прочности на разрыв от 400 до 800 МПа.

Из других технологических свойств следует прежде всего отметить более высокую герметичность высокопрочных чугунов из-за отсутствия графитной пористости, и эти чугуны можно использовать для отливки деталей, работающих при давлениях 40 МПа (400кгс/см²) и выше. Обрабатываемость высокопрочного чугуна, определяемая, например, по стойкости резца, зависит от твердости НВ металлической матрицы. Чистота поверхности деталей из высокопрочного чугуна выше, чем деталей из серого чугуна, вследствие обособленности включений графита. Благодаря высоким показателям и хорошему сочетанию прочностных, эксплуатационных, физических и технологических свойств высокопрочный чугун находит очень широкое применение во всех отраслях промышленности. Как показывает зарубежный и отечественный опыт, изделия из высокопрочного чугуна во многих случаях заменяют стальное литье, стальные поковки, изделия из ковкого и серого чугуна. Преимуществом высокопрочного чугуна перед сталью является меньшая плотность, а значит, и меньшая масса, которая еще более снижается в связи с тем, что из этого чугуна можно отливать более тонкостенные детали благодаря его более высокой жидкотекучести. Важным преимуществом в этом отношении является также более низкая температура плавления (примерно на 300 °С), что облегчает и удешевляет процесс плавки. Кроме того, значительно упрощается и удешевляется изготовление литейных форм, так как не требуются дорогие формовочные материалы, специальная

керамика для литниковых систем и т.п. К большим преимуществам высокопрочного чугуна относятся также меньшая склонность к образованию горячих трещин и большая циклическая вязкость. В сравнении с ковким чугуном преимуществами высокопрочного чугуна являются лучшие литейные и более высокие механические свойства, возможность во многих случаях обходиться без термической обработки, а также возможность применения для изготовления деталей любых сечений, массы и размеров. Высокие значения механических свойств высокопрочного чугуна дают также возможность заменять им серый чугун, при этом достигаются уменьшение толщины стенок и снижение массы отливок. Например, при переходе на высокопрочный чугун значительно уменьшается толщина водопроводных труб, уменьшается масса тюбингов метрополитенов и подземных шахт, при этом металлоемкость конструкций снижается в 1,5—2 раза.

Список литературы:

[1] Бубликов В.Б. Высокопрочному чугуну - 60. - // М.: Литейное производство, 2008, №11. – с. 2-8.

[2] Ductile Iron Data // Ductile Iron Society. Promoting the production and application of ductile iron castings. [Электронный ресурс], 2010 - Режим доступа: <http://www.ductile.org>, свободный. - Загл. с экрана.

[3] Keith D. Millis: the father of ductile iron Online Library

[4] Корниенко Э.Н., Панов А.Г., Хальфин Д.Ф. Перспективы производства отливок из ЧШГ аустенитно-бейнитного класса // М: Литейщик России, 2006 № 2. [Перейти к статье]

[5] ГОСТ 7293-85. Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки. - Spheroidal graphite iron for casting. Grades. (Высокопрочный чугун. Высокопрочные чугуны)

[6] US2485760. Cast ferrous alloy. K.D. MILLIS AT AL.

[7] Высококачественные чугуны для отливок / В.С.Шумихин, В.П.Кутузов, А.И.Храмченков и др.; Под ред. Н.Н.Александрова - М.: Машиностроение, 1982. - 222 с., ил.

[8] Любченко А.П. Высокопрочные чугуны. М: Металлургия, 1982. - 120 с. /УДК 669.131.7 Аннотация

[9] Получение и свойства чугуна с шаровидным графитом. Под редакцией Гиршовича Н.Г. - М.,Л.: Ленинградское отделение Машгиза, 1962, - 351 с. Аннотация

Тарасенков Денис Александрович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tarasenkov.denis22@gmail.com

Филиппова Инна Аркадьевна - канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии обработки материалов" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: katran-ogmet-04@yandex.ru

УДК 621.794.61: 629.78+621.791.059

В.К. Шаталов, С.П. Сорокин, А.О. Штокал, Е.В. Рыков,
Т.А. Говорун, Т.В. Рожкова

ПОВЫШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТВЕРДОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАПЛАВОЧНЫХ ПРУТКОВ, ОБРАБОТАННЫХ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ

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

Качество поверхностного слоя детали оказывает непосредственное влияние на такие свойства детали как прочность, износостойкость, коррозионная стойкость. Высокая активность титана обуславливает его склонность к задирам, малым нагрузкам схватывания и, как следствие, низким антифрикционным свойствам. Это делает невозможным применение титана и его сплавов в узлах трения машиностроительных конструкций без поверхностно упрочняющей обработки [1]. Низкие антифрикционные свойства титановых сплавов трудно устранить подбором контактирующего материала, смазочного материала или оптимизацией конструкции.

Перспективными методами повышения антифрикционных свойств и износостойкости деталей из титановых сплавов при контактных нагрузках являются методы химико-термической обработки, направленные на физико-химическое модифицирование поверхностного слоя, и анодирование. При термическом оксидировании образуется слой окислов титана, для которого характерна высокая механическая прочность и износостойкость. Анодирование позволяет получать оксидные пленки, в состав которых входят отдельные антифрикционные составляющие [2].

Эффективным технологическим направлением повышения ресурса продукции, изготовленной из титановых сплавов, находящейся в морской или другой агрессивной среде, работающей в условиях истирания, является наплавление в среде защитных газов на поверхности деталей слоя металла высокой твердости.

Распространенным способом насыщения титановых сплавов кислородом является нанесение устойчивых оксидных покрытий на поверхность наплавочных прутков [3]. В качестве материала наплавочных прутков широко применяют сплав ПТ-7М, обогащенный кислородом в результате термического оксидирования.

Примеси, содержащиеся в титане, состоят частично из элементов внедрения, частично из элементов, преимущественно металлов, образующих с титаном твердые растворы замещения. Элементы внедрения – кислород, азот, углерод и водород оказывают наиболее сильное влияние на механические свойства титана. Кислород и азот обладают наибольшей растворимо-

стью в α -титане и поэтому могут в наибольшей степени повысить твердость и предел прочности. При взаимодействии титана с парами воды на поверхности металла образуется оксид и водород, который частично образуя молекулы, уходит в атмосферу, а остальная его часть уходит в титан.

Термическое оксидирование осуществляется при нагреве в воздушной среде в пределах 950°C и выдержке в течение $3\div 4$ часов. При этом поверхность проволоки покрывается окалиной. Образовавшаяся окалина подлежит удалению для предотвращения попадания в расплавленный металл. Несмотря на кажущуюся простоту, метод термического оксидирования имеет ряд существенных недостатков. Прежде всего, метод энергоемок, длителен и трудоемок, включает более 10 технологических операций. Очищенную от окалины проволоку подвергают вакуумному отжигу для удаления водорода.

Поскольку последующий непременно отжиг является дополнительной операцией, то такая технология повышает стоимость наплавочной проволоки.

В силу указанных недостатков термического оксидирования, а также возрастающих требований к качеству наплавленного слоя, разрабатываются новые технологические процессы, основанные на последних достижениях науки и техники. Выбранный нами метод – микродуговое оксидирование (МДО), обладает относительной простотой процесса, возможностью гибкого управления энергетическими и временными характеристиками, оптимизацией их параметров. Отличительной особенностью микродугового оксидирования является участие в процессе формирования покрытия поверхностных микрозарядов, оказывающих весьма существенное и специфическое воздействие на формирующееся покрытие, в результате которого состав и структура получаемых оксидных слоев существенно отличаются, а свойства значительно повышаются по сравнению с обычными анодными пленками[4].

В таблице 1 приведены применяемые электролиты и режимы МДО наплавочной проволоки.

Таблица 1. Электролиты и режимы МДО наплавочной проволоки

Состав электролита	Концентрация, г/л	pH	Уф, В	Время выдержки, мин.	Температура, $^{\circ}\text{C}$
Тринатрий-фосфат $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ГОСТ 201-76	14	10,8	300	15	19
Алюминат натрия NaAlO_2	15	11,8	300	14	19

Толщина оксидного покрытия на титановых сплавах, в основном, определяется плотностью тока и временем протекания процесса, составляла 10 мкм (рис.1).

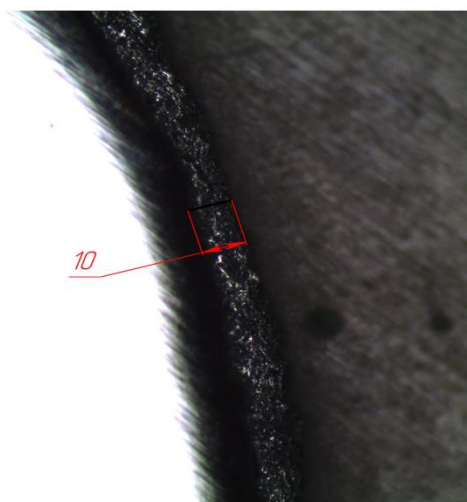


Рис. 1. Микрошлиф МДО-покрытия наплавочного прутка при увеличении 100х

Наплавленный аргонодуговым способом металл образован неплавящимся электродом с присадочной проволокой, обработанной МДО. По структуре, качеству и твердости поверхностный слой соответствует предъявляемым техническим требованиям. Упрочненный в результате наплавки слой имеет высокую твердость (рис. 2).

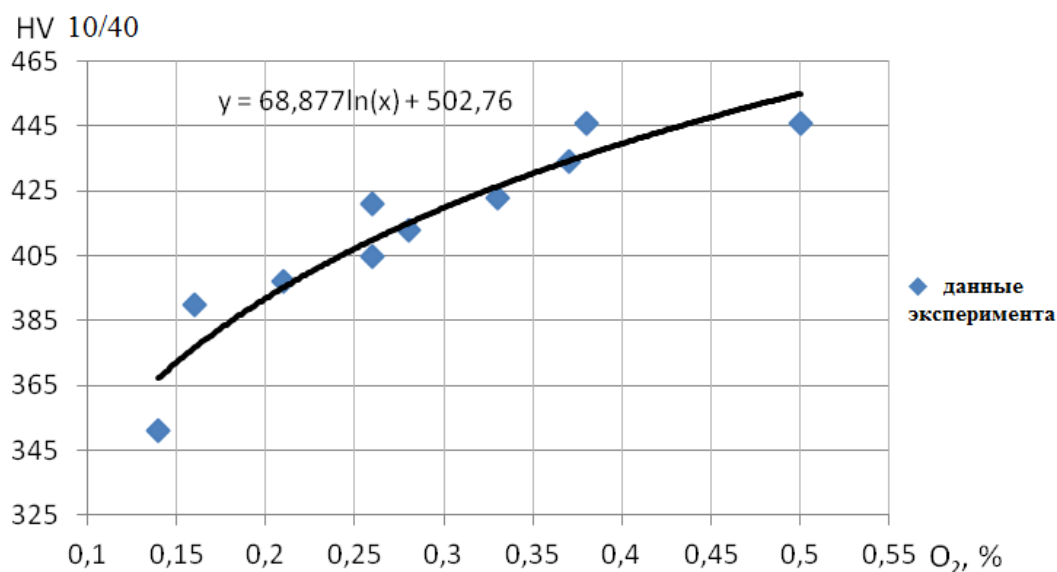


Рис. 2. Зависимость твердости наплавки от содержания кислорода

Твердость наплавленного слоя окисированными прутками, измеренная методом Виккерса, составляет 380–450 HV и зависит от материала электрода, состава электролита, режима МДО. Общий наплавленный слой состоит из верхнего высокопрочного слоя и нижнего переходного диффузионного слоя с переменной концентрацией легирующих примесей и кислорода, с сильно измененной исходной структурой, постепенно переходящей в структуру основного металла. Сформированный верхний слой по

глубине больше нижнего. В связи с наличием диффузионного слоя в структуре упрочненного металла возможно многослойное упрочнение, в том числе с образованием разнолегированных слоев.

В ходе работы установлено, что формирование в процессе микродугового оксидирования оксидного слоя на поверхности наплавочных прутков дает возможность при наплавке такими прутками существенно повысить твердость титановых сплавов. Разработанные технологии производства изделий из высокопрочных титановых сплавов со специальной микроструктурой и свойствами поверхностного слоя, полученных при помощи метода микродугового оксидирования, позволяют в дальнейшем использовать их в экстремальных условиях эксплуатации.

Литература:

[1] Горынин И.В., Ушков С.С., Хатунцев А.Н., Лошакова Н.И. *Титановые сплавы для морской техники*. СПб.: Политехника, 2007, 387 с.

[2] Гордиенко П.С., Гнеденков С.В. *Микродуговое оксидирование титана и его сплавов*. Владивосток: Дальнаука, 1997, 179 с.

[3] Ушков С.С., Шаталов В.К., Фатиев И.С., Михайлов В.И., Козлов И.В., Щербинин В.Ф., Грошев А.Л. *Способ оксидирования титанового сплава для антифрикционной наплавки*. Пат. №2367728 Российская Федерация, 2009.

[4] Штокал А.О., Рыков Е.В., Добросовестнов К.Б. Повышение износостойкости, жесткости, точности и электросопротивления узлов космических аппаратов при помощи микродугового оксидирования. *Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXVIII Академических чтений по космонавтике*. МАИ, ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». Москва, 2014, с. 169–176.

Шаталов Валерий Константинович - 1-р техн. наук, зав. каф. "Технологии обработки материалов" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vkshatalov@yandex.ru

Сорокин Сергей Павлович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sorokin994@mail.ru

Штокал Александр Олегович - канд. техн. наук, инженер-конструктор I кат., Филиал ФГУП "НПО им. С.А. Лавочкина" г. Калуга. E-mail: cuauthemoc1@yandex.ru

Рыков Евгений Валентинович - начальник отдела 120130, главный конструктор по направлению составной части ОКР МВЗ, Филиал ФГУП "НПО им. С.А. Лавочкина" г. Калуга. E-mail: rik@laspace.ru

Говорун Татьяна Александровна - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Glancet@yandex.ru

Рожкова Татьяна Владимировна - начальник метрографической лаборатории ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», г. Химки. E-mail: rojkova_t@list.ru

Т.В. Попова, А.Г. Вяткин

ПРИМЕНЕНИЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД ПРИ ХОЛОДНОЙ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ

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

Использование смазок – часто применяемый метод уменьшения трения при обработке давлением. Этот метод эффективен благодаря тому, что из-за смазки между инструментом и заготовкой образуется промежуточный слой, который полностью или частично их разделяет. В случае полного разделения поверхностей трение, появляющееся между инструментом и заготовкой, называется жидкостным, а если за счет высоких давлений смазка не полностью изолирует трущиеся поверхности, то трение, возникающее между поверхностями – полужидкостное [1].

Если смазка выбрана правильно, то сдвиг (деформация) формируется близко к пристенным слоям, застойные зоны не образуются. Благодаря этому получаемая поверхность обладает высоким качеством, имеет однородную структуру и равномерные механические свойства. Таким образом, смазочно-охлаждающая жидкость улучшает качество получаемого изделия при обработке давлением посредством изменения характера деформирования. Выбирать смазку необходимо, учитывая размеры конфигурацию и материал обрабатываемого изделия.

Рабочие части инструмента при холодном выдавливании могут нагреваться до 200-400°C, а при холодной высадке и до 200-400°C, что может привести к разрушению для некоторых типов смазок. Кроме того, из-за разности коэффициентов теплового расширения корпуса и запрессованной в него твердосплавной вставки, при работе может уменьшиться натяг инструмента, из-за чего уменьшается его стойкость. Также из-за повышенных температур может произойти отпуск стальных пуансонов.

При обработке холодной высадкой и холодным выдавливанием применяются различные сорта смазок или усиленное охлаждение, чтобы избежать повышения температуры и разрушения смазок. Благодаря обильному охлаждению температура рабочих частей инструмента понижается, поскольку создаются благоприятные условия для пластической деформации и отвода теплоты [2].

Тем не менее, применение излишнего количества смазки может привести к неполному заполнению матрицы. Если производится обработка высококобальтовых сплавов, или они присутствуют в рабочем инструменте, то необходимо исключить использование смазок, в состав которых входит сера в свободном состоянии, потому что сера взаимодействует с кобальтом.

Наиболее часто при холодной объемной штамповке применяется фосфатирование с последующим омыливанием.

Применение фосфатирования связано с определенными недостатками, а именно со сложностью и токсичностью процесса фосфатирования; с загрязнением рабочих полостей штампа остатками смазочного материала; с невозможностью фосфатирования заготовок из легированных сталей и сплавов; а также с необходимостью использования больших площадей под оборудование для фосфатирования.

Попытки заменить фосфатные покрытия жидкими маслами успеха не принесли. Это связано с тем, что маловязкие смазки без антифрикционных наполнителей не создают надежной разделительной пленки между контактирующими металлическими поверхностями, что приводит к росту давления, ухудшению качества поверхности, резкому снижению стойкости инструмента. Введение в состав смазки твердых антифрикционных наполнителей, таких как мел, графит, сульфид цинка, дисульфид молибдена, или высоковязких компонентов (воск, стеарин, вазелин) снижает технологичность процесса. Твердые наполнители, скапливаясь в штампе, изменяют форму штампа, а также засоряют систему подачи смазки.

Вопрос замены антифрикционных фосфатных покрытий жидкими технологическими смазками без твердых наполнителей может быть решен при введении в жидкую основу противозадирных, антифрикционных и противоизносных присадок, значительно не меняющих ее физико-химических свойств. Основная функция таких присадок – повышать вязкость и поверхностную активность смазок. Это позволит смазочно-охлаждающим жидкостям удерживаться на поверхности заготовки и инструмента, что обеспечит разделение контактирующих поверхностей. Основной, хорошо совмещаемой с присадками, служат минеральные масла, обладающие необходимой вязкостью, а антифрикционными присадками – жиры животного или растительного происхождения, синтетические сложные эфиры, высокомолекулярные жирные кислоты и т.п. Антифрикционные присадки способствуют образованию пленок, разделяющих контактирующие металлические поверхности. Существуют также противозадирные и противоизносные присадки, содержащие серу и фтор. Сера и фтор необходимы для образования на контактных поверхностях сульфидов и хлоридов железа [3].

Системы подачи смазок, которые применяются в холодновысадочных автоматах, часто не предназначены для жидких технологических смазок. А если предназначены, то система подачи не гарантирует разделения технологической смазки от смазки для узлов трения автоматов. В результате этого происходит разбавление технологической смазки минеральными маслами, из-за чего дорогостоящая технологическая смазка быстро приходит в негодность (ухудшаются ее свойства) и появляется необходимость ее замены.

Разделить системы смазок для агрегата и технологического процесса довольно сложно, и конструкция большинства автоматов в большинстве случаев не предусматривает такого разделения. Поэтому при выборе смазки для холодновысадочных автоматов необходимо так подбирать смазку,

чтобы она подходила и для смазывания узлов трения автоматов, и для технологических целей. Это потребует таких изменений конструкции и характеристиках системы подачи смазки автомата, как увеличение объема заливаемой технологической жидкости, повышение производительности и т.д.

Коэффициент трения, при холодной объемной штамповке в зависимости от применяемой смазки, показан в таблице 1[4].

Таблица 1

Условия деформирования (вид смазки или ее отсутствие)	Коэффициенты трения в зависимости от вида материала			
	Сталь 08ВГ	Алюминий	Дуралюмин Д16М	Сталь 1Х18Н9Т
Без смазки	0,2-0,25	0,25	0,22	0,3-0,35
Минеральное масло	0,15	0,15	0,16	0,25
Смазка с наполнителями (мел, графит)	0,08-0,1	0,1	0,08-0,1	0,15
Окисленный петролатум	-	-	-	0,10

Данные, представленные в таблице 1, имеют ознакомительный характер и получены в результате исследований, исключающих воздействие других факторов, влияющих на коэффициент контактного трения, таких как температура в зоне деформации, степень деформации, контактная нагрузка.

Список литературы

- [1] Загиров Н.Н., Рудницкий В.А. *Теория обработки металлов давлением. Конспект лекций*. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – 56 с.
- [2] Сторожев М.В., Попов Е.А. *Теория обработки металлов давлением*. – М.:Машиностроение, 1977. – 423с.
- [3] Унксов. Е.П. *Теория пластических деформаций металлов*. – М.: Машиностроение, 1983. – 598с.
- [4] Мастеров В.А., Берковский В.С. *Теория пластической деформации и обработка металлов давлением*. – М.: Металлургия, 1989. – 400с.

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

Попова Татьяна Витальевна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tanechka54321@mail.ru

Н.О. Исаев, И.А. Филиппова

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТОЧНЫХ ЗАГОТОВОК ЛИТЬЕМ ПО ГАЗИФИЦИРОВАННЫМ МОДЕЛЯМ

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

В России до 78% отливок металлических деталей для машиностроения производят в разовых песчаных формах. Для их получения теперь все шире используют разовые модели из пенопласта. Машиностроители мало знают о современной технологии получения металлических отливок высокой точности и сложности – литье по моделям из пенопласта, называемой литьем по газифицируемым моделям (литье ЛГМ).

Англоязычное название ЛГМ — Lost Foam Casting Process дословно означает процесс литья при потере пены, подразумевая использование пенопластовой модели (см. рис. 2). Между тем, за 50 лет со времени своего возникновения годовой объем производства отливок в мире этим способом превысил 1,5 млн. тонн.



Рис. 1. Компоненты дорожно-строительной техники, отлитые методом ЛГМ

Возрастающий поток патентной информации свидетельствует о серьезном интересе к этой технологии всех ведущих машиностроительных компаний. Технологические потоки и пространственное размещение моделей в объеме контейнерной формы удобно предварительно имитировать на ЭВМ, а при изготовлении модельной оснастки все чаще применяют 3D-графику для программирования станков с ЧПУ. Созданы, проектируются и внедряются в производство десятки видов конвейерных цехов, оснащенных

ных манипуляторами и линиями непрерывного действия. Они хорошо зарекомендовали себя в автотракторном моторостроении, при литье трубоарматуры и деталей насосов, корпусов электродвигателей, деталей коммунального машиностроения и др. Однако чаще создаются небольшие производственные цеха, состоящие из модельного, формовочного, плавильного и очистного участков, оснащенных несложным оборудованием, одинаковым для черных и цветных сплавов. Большинство крупнейших автопроизводителей Европы, Азии и Америки ежегодно используют в производимых автомобилях несколько сотен тысяч тонн точных отливок, полученных описанным способом. General Motors, Ford Motors, BMW, Fiat, VW, Renault и ряд других фирм полностью перешли в 1980-90 годах на изготовление этим способом отливок блоков цилиндров, головок блока, впускных и выпускных коллекторов, коленвалов для наиболее массовых типов двигателей. В момент возникновения в 1958-1970 гг. для ЛГМ было характерно производство единичных не крупных отливок массой до 10 кг, но уже в эти годы велись работы по внедрению технологии в серийное производство [2]. В нашей стране исследования ЛГМ были начаты в 1963 г. инженером А. Чудновским в Научно-исследовательском институте специальных способов литья (г. Одесса), и в том же году ему было выдано авторское свидетельство на отечественный вариант ЛГМ. Промышленное применение данная технология получила уже в 1965 г. на Горьковском автомобильном заводе, где была получена первая партия отливок (227 наименований, общая масса около 100 т). В первом полугодии 1966 г. на этом же заводе было произведено 600 отливок массой от 18 до 3500 кг (общая масса более 420 т). В середине 1960-х гг. активизируются работы по исследованию технологии ЛГМ в различных научно-исследовательских институтах и в вузах. В Москве в НИИТАвто-проме организуется новый научно-технический центр по ЛГМ, который в 1990-е гг. становится основным разработчиком технологии и оборудования в России [4].



Рис. 2. Пенополистироловые модельные блоки

К решению актуальной проблемы упрочнения форм под заливку разработчики шли разными путями. Делались попытки использования магнитных форм, где наполнителем служил металлический ферромагнитный песок или дробь размером 0,3-0,5 мм. После уплотнения формы вибрацией она помещалась в постоянное магнитное поле, обеспечивающее магнитную связь между частицами наполнителя для упрочнения, предотвращения ее разрушения при заливке металла. Магнитная формовка применялась в США, Японии и в странах Западной Европы для производства серийных отливок из различных сплавов, но использование дорогостоящего металлического песка (дробь) сводило на нет экономические преимущества ЛГМ, относительно традиционных способов литья, и от нее решено было отказаться. Оптимальным вариантом стал предложенный способ получения отливок по газифицируемым моделям в формах из песка с применением вакуума. Для формовки используется специальный контейнер (см. рис. 3), оборудованный системой вакуумирования. Газифицируемая модель формуется в кварцевом песке, который уплотняется вибрацией. Сверху на форму накладывается полиэтиленовая пленка, после чего форма вакуумируется и заливается металлом. Вакуум предохраняет форму от разрушения во время ее заливки расплавом [3].



Рис. 2. Пенополистироловые модели в контейнере

По данным зарубежных специалистов, количество цехов, работающих по технологии ЛГМ, в ближайшие несколько лет будет ежегодно удваиваться. Расширению объемов производства отливок ЛГМ в различных

странах способствует дальнейшее совершенствование технологии и оборудования. Так, фирмы «Castek» (Англия) и «Teksid» (Италия) разработали технологический процесс под фирменным названием Policast, который включает в себя технологию изготовления моделей, сборку модельных блоков, их окраску и формовку, заливку формы металлом.

Формовка, заливка формы металлом, охлаждение отливки в форме и ее выбивка производятся на горизонтально замкнутом конвейере. На позициях заливки и охлаждения формы вакуумируются. Цикл изготовления одной формы составляет 7 мин. Применение ЛГМ позволило в 3 раза повысить точность отливок и на 40 % сократить трудоемкость финишных операций. Фирмы освоили производство отливок из высокопрочного чугуна и легированной стали.

Широкое внедрение ЛГМ в крупносерийном производстве стало возможным благодаря созданию высокопроизводительного автоматизированного оборудования и систем управления технологическим процессом на основе применения микропроцессорной техники и ЭВМ. В 1980-е гг. ЛГМ окончательно утвердилось в серийном и массовом производстве отливок ответственного назначения, потеснив традиционные способы литья, и в первую очередь в песчано-глинистые формы по извлекаемым моделям.

Представители многих зарубежных фирм этот факт объясняют следующими преимуществами ЛГМ:

- уменьшаются затраты на оборудование и материалы;
- исключаются из производственного процесса стержневое, формовочное и смесеприготовительное оборудование;
- применяется в качестве материала формы сухого кварцевого песка и упрочнение формы вакуумом;
- снижение требований к квалификации рабочего персонала;
- возможность комплексной автоматизации всего технологического процесса;
- сокращение числа технологических операций и оборудования для финишной обработки отливок;
- использование недорогой и сравнительно простой оснастки;
- значительное улучшение условий труда.

Кроме того, данный промышленный метод отличается компактностью производства и является более экологичным по сравнению с традиционными методами литья. Производственный потенциал технологии литья ЛГМ далеко не исчерпан. Она также позволяет получать ранее нетехнологичные литые крупнопористые, ячеистые и каркасные отливки, лить не только металлы и сплавы, но и получать композиты и армированные конструкции, которые обладают улучшенными характеристиками. При этом в модель предварительно вставляют различные детали или материалы, которые формируют композит или армированную конструкцию, а наложение

газового давления на жидкий металл увеличивает стабильность пропитки таких изделий со вставками на длину до 1 м [1].

Технологию ЛГМ относят к высокотехнологичным производствам, которые дают выход к устойчивому развитию из технологического отставания, когда в отечественной экономике нарастает сырьевая составляющая, доминирует продукция с низкой добавленной стоимостью и снижается конкурентоспособность производства. Если в 80-е годы в структуре отечественной промышленности и товарного экспорта вес машиностроения составлял порядка 30...40%, а черной металлургии был в два-три раза меньше, то сегодня наоборот.

Именно развитие литейного производства – это шаг к восстановлению и росту отечественного машиностроения, превращения страны из продавца полуфабрикатов в экспортера технологической продукции с большой добавленной стоимостью. Снижение зависимости национальной промышленности от импорта идей, технологий и товаров, реализация собственной программы инновационного развития позволит нам стать равноправным участником глобальных инновационных процессов.

При этом возрастает значение литья по газифицируемым моделям — одной из последних современных и перспективных технологий, позволяющих значительно снизить себестоимость готовой продукции предприятий машиностроительного профиля.

Список литературы:

[1] Шуляк В.С. Литье по газифицируемым моделям. — СПб.: НПО «Профессионал», 2007. — 408 с.

[2] Рыбаков С. А. Инновационные возможности литья по газифицируемым моделям, состояние и перспективы этого метода в России // Литейщик России. №4, 2009, 45 с.

[3] Литье по выжигаемым моделям: Учебное пособие для студентов специальности 110400 литейное производство черных и цветных металлов // Сост. В.М. Григорьев. — Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2002, 58 с.

[4] Иванов В. И. и др. Технологические особенности процесса литья по газифицируемым моделям // Производство отливок по пенополистироловым моделям. М.: НИИМАШ, 1966.

Исаев Никита Олегович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: carasbond@gmail.com

Филиппова Инна Аркадьевна - канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии обработки материалов" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: katan-ogmet-04@yandex.ru

О.С. Федорова, В.В. Калмыков

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ В РЕЗУЛЬТАТЕ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

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

Основой разработки и оптимизации машиностроительных и приборостроительных технологических процессов является эксперимент[1]. Значительное увеличение эффективности экспериментальных исследований и технологических разработок достигается использованием современных математических методов планирования эксперимента и вычислительной техники[2].

Совершенные технологические процессы позволяют достигнуть наилучшего качества изделия с минимальными организационными и экономическими затратами за кратчайшее время. Качество изделий в машино- и приборостроении является важнейшим фактором конкурентоспособности производства.

Алмазное выглаживание заключается в пластической деформации обрабатываемой поверхности скользящим по ней инструментом — выглаживателем. Инструмент раздвигает металл, образуя канавку на поверхности. После каждого оборота обрабатываемой детали канавка перемещается в осевом направлении на расстояние, равное подаче S , происходит многократное перекрытие ее при последующих оборотах обрабатываемой детали, так как ширина канавки больше подачи. В результате пластического деформирования обрабатываемой поверхности сглаживаются исходные неровности и образуется новый микрорельеф поверхности со значительно меньшей высотой неровностей профиля. Параметрами выглаживания влияющими на шероховатость являются: сила выглаживания, подача и радиус рабочей части инструмента[3].

Одним из важных показателей точности деталей, после алмазного выглаживания, является шероховатость, которая в свою очередь влияет на эксплуатационные свойства детали.

В качестве объекта исследования был взят пруток марки ЛС-59. Обработку осуществляли на токарном станке модели ИЖ 250 ИТП. Силу выглаживания варьировали на двух уровнях: $P=50\text{Н}$ и $P=100\text{Н}$; подача варьировалась $S=0.125\text{ мм/об}$ и $S=0.075\text{ мм/об}$. Все опыты в эксперименте повторяли 3 раза.

На первом этапе исследования выполнен дисперсионный анализ результатов полного факторного эксперимента. Для каждой строки матрицы с учетом повторных опытов определили среднее значение отклика, дисперсию для каждого опыта и сумму выборочных дисперсий. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

№	P	S	Параллельные опыты, Ra мкм			\bar{Y}_i	S_i^1	с/ш
			1	2	3			
1	100	0,125	1,27	1,3	1,23	1,267	0,001233	2,047
2	50	0,125	0,91	0,88	0,83	0,883	0,000633	-1,195
3	100	0,075	1,19	1,20	1,17	1,187	0,000239	1,485
4	50	0,075	0,78	0,78	0,8	0,787	0,000133	-2,086

С помощью G-критерия была проведена проверка гипотезы об однородности ряда дисперсий формуле (1).

$$G^p = \frac{S_{i\max}^2}{\sum S_i^2} = \frac{0.000133}{0.002232} = 0.5524 \quad (1)$$

Полученное значение меньше табличного $G^p_{0.95;2;4}=0,7679$, что подтверждает гипотезу. Так как дисперсии однородны можно усреднить и определить дисперсию воспроизводимости, которая характеризует погрешность эксперимента в целом.

$$S_y^2 = \frac{\sum S_i}{N} = \frac{0.002232}{4} = 0.00055 \quad (2)$$

Далее были найдены коэффициенты уравнения регрессии:

$$b_0 = \frac{1.267+0.883+1.187+0.787}{4} = 1.031 \quad (3)$$

$$b_1 = \frac{1.267-0.883+1.187-0.787}{4} = 0.196 \quad (4)$$

$$b_2 = \frac{1.267+0.883-1.187-0.787}{4} = 0.044 \quad (5)$$

$$b_{1,2} = \frac{1.267-0.883-1.187+0.787}{4} = -0.004 \quad (6)$$

Проверка гипотезы о статистической значимости регрессионного анализа имеет следующий вид:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{N \cdot n} = \frac{0.00055}{12} = 0.00004583 \quad (7)$$

$$S_{b_i} = \sqrt{S_{b_i}^2} = 0.0067 \quad (8)$$

$$\Delta_{b_i} = t_{p,f} \cdot S_{b_i} = 2.3 \cdot 0.0067 = 0.0156 \quad (9)$$

где $t_{p,f}$ табличное значение коэффициента Стьюдента при доверительной вероятности $p=0.95$ и числе степеней свободы $f = N \cdot (n - 1)$. Табличное значение $t_{0.95;8} = 2.3$. Так как величина коэффициента $b_{1,2}$ меньше доверительного интервала, то им пренебрегаем в виду малой статистической значимости.

Окончательно уравнение регрессионного анализа имеет вид:

$$Y (R_a^b) = 1.031 + 0.196X_1 (P) + 0.044X_2 (S) \quad (10)$$

На основе полученной модели в виде уравнения (10) можно сделать следующие выводы:

- Наибольшее влияние на шероховатость выглаженной поверхности оказывает сила алмазного выглаживания, степень воздействия которого в несколько раз сильнее влияния подачи.
- С увеличением силы выглаживания и подачи шероховатость выглаженной поверхности увеличивается.

В настоящее время для статистического контроля и оценки качества изделий широко применяются методы Тагути, основанные на многофакторных экспериментах. В основе концепции Тагути лежит поиск таких технологических режимов, при которых отклик – оцениваемый параметр качества – меньше всего изменяется под воздействием неконтролируемых факторов, так называемых шумов. Такую устойчивость и способность демпфировать шумы называют робастностью. В соответствии с методами Тагути, при обработке многофакторного эксперимента наряду с обычными отклонениями отклика в каждом опыте измеряется так же показатель, определяемый отношением сигнал/шум и представляющий собой меру разброса отклика для контролируемых факторов при варьировании неконтролируемых [4].

Тагути определил три типа отношений сигнал/шум, определяемых тем обстоятельством, какое заданное значение отклика является наилучшим: как можно меньшее, как можно большее или некоторое конечное [5].

В настоящей задаче отклик – шероховатость выглаженной поверхности, выполняется условие «как можно меньше».

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

$$c/m = -10 \cdot \lg \left[1/n \sum_{i=1}^n 1/y_i^2 \right] \quad (11)$$

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

Результаты расчетов по формуле (11) представлены в таблице 1.

Сравнивая опытные данные для одинаковых уровней факторов S_i при различных R можно сделать вывод, что наибольшая робастность, т.е. устойчивость оцениваемого параметра R_a , обеспечивается когда сила соответствует верхнему уровню.

Список литературы

[1] Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. Москва, Машиностроение, 1980, 304 с.

[2] Сидняев Н.И., Вилисова Н.Т. Введение в теорию планирования эксперимента. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 463 с.

[3] Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Москва, Машиностроение, 1987, 328 с.

[4] Ланской Е.Н., Антонюк Ф.И. Анализ точности холодного выдавливания полых поковок статистическими методами. Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением, 2001, №5, с. 14–20.

[5] Тагути Г. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути. Москва, Сейфи, 2002, 384 с.

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

Калмыков Вадим Владимирович - старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: oksana.fedorova.92@gmail.com

А.Ю. Андросов, В.Е. Хайченко

ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И БЫСТРОГО ПРОЦЕССА ПРОТОТИПИЗАЦИИ МОДЕЛЕЙ В ЛИТЕЙНОЙ ИНДУСТРИИ

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

Одним из начальных и основополагающих этапов изготовления отливки в производственном процессе литейного производства является формирование ее прототипа: модельного комплекта при литье в песчано-глинистые формы или при литье по выплавляемым моделям. Реализация данной операции происходит путем механической обработки податливого материала заготовки, определяемого серийностью отливки или же путем заливки легкоплавкого материала (парафина, стеарина) в пресс-форму с последующей операцией составления модельного блока.

Широко используемые методы прототипирования формы будущей отливки технологичны в производстве, обеспечивают высокий качество точности изготовления (4 – 7 классы в соответствии с ГОСТ 26645–85), имеют доступность применяемых материалов: сталь, дерево (модельный комплект), парафин, стеарин для приготовления форм модели последующей тонкостенной оболочки. Отрицательной стороной технологического процесса является стадийность технологических операций, влияющей на затрату труда, временных и технологических ресурсов, а также относительно современных требований технического прогресса средних показателей чистоты поверхности.

Модернизацию в области повышения качества воспроизводства поверхности прототипа отливки и унификацию производственного процесса обеспечил процесс внедрения IT-технологий в производственную сферу деятельности. Результатом данного внедрения для литейного производства стало создание технологии быстрого прототипирования путем применения компьютерного моделирования геометрии будущей отливки.

Начальным этапом проектирования прототипа является визуализация форм и размеров трехмерного объекта путем его моделирования, применив современное инженерно-конструкторское компьютерное обеспечение: в частности, обозначенными программами являются: «КОМПАС-3D», «AutoCAD», «SolidWorks» (рисунки 1).



Рис. 1. Визуализированный продукт прототипа формы проектируемой отливки путем компьютерного моделирования

Программировать выбранные математические поверхности необходимо исходя не только из соображений ее пространственного содержания, но и учитывая усадку заливаемого материала при его кристаллизации, а также возможность заполнения формы (жидкотекучесть), делая разрабатываемую модель объемно больше заданных габаритов. Визуализировать весь технологический процесс, учитывая все его тонкости также позволяют применяемые ИТ-технологии: лаборатории современных литейных предприятий оснащаются интегрированным программным комплексом «ProCAST» для моделирования процессов литья. Данный комплекс с помощью встроенного программного обеспечения производит расчет задаваемой технологии по всем этапам: от заливки и кристаллизации с образованием усадочных дефектов и напряжений, до выбивки, обрезки литников и последующей термообработки для полного контролирования остаточных напряжений в готовом изделии. Данную прогрессивную технологию уже в полной мере применяют многие отечественные организации, такие как ФГУП «ММПП Салют». Это крупнейшее российское предприятие, которое производит и ремонтирует газотурбинные двигатели для самолетов семейств Су и МиГ.

Произведя окончательные и проверочные расчеты форм макета, возникает потребность в следующем этапе технологического процесса – воспроизведения прототипа в физический объект. Особенность предполагаемой операции заключается в изготовлении опытных и функциональных образцов путем послойного наложения применяемого материала в точном соответствии с геометрией алгоритмически выстроенной модели согласно ее математическому коду, подаваемого на оборудование в форматированном виде. Программное обеспечение позволяет также синтезировать 3D модели, полученные по результатам компьютерной томографии, обеспечивая тем самым высокую точность сборки. В настоящее время существует несколько видов технологий реализации быстрого прототипирования разработанной модели.

Стереолитография («SLA» - «Stereo Lithography Apparatus») (рисунок 2).



Рис. 2. Производственная схема принципа работы «SLA» технологии

Основопологающим явлением данного процесса является отверждение жидкого фоточувствительного полимера под действием экспонирования

ультрафиолетового излучения («UV»). Технология позволяет варьировать физико-химические, механические свойства во время процесса материализации изделия изменяя концентрацию и химический состав применяемого материала. В основном используется для производства проб-моделей с целью механического испытания конструкции.

Изготовление модели производится на специальной платформе, способной перемещаться в направлении оси построения. Выработка ультрафиолетового излучения производится гелиево-кадмиевым или аргонным неподвижным излучателем и позиционируется на поверхности полимера при помощи подвижного зеркала. Образование объемных пикселей происходит в результате поглощения и рассеивания лазерного пучка непосредственно вблизи поверхности фотополимера. После этого новообразованную поверхность погружают в ванну на величину отвердевшего слоя, калибруя его форму специальным скребком – ракелем. Максимальный объем реализуемых моделей достигает 500 мм^3 , а точность позиционирования лазера составляет $\pm 0.25 \text{ мм}$.

Прототипирование расплавленной полимерной нитью («FDM» - «Fused Deposition Modeling») (рисунок 3).

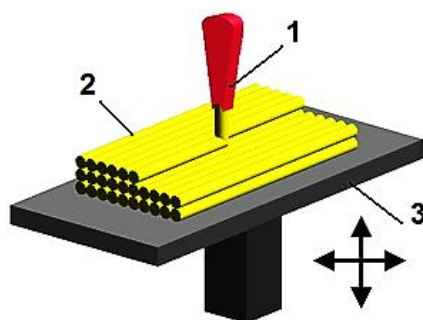


Рис. 3. Процесс физического формирования прототипа на «FDM» установке: 1 - сопло; 2 - полимерная нить; 3 - управляемая подвижная платформа

«FDM» технология представляет собой послойное наложение расплавленной полимерной нити, физически реализуя запрограммированную форму объекта: математизированная функциональная модель транспортируется в формате «STL» в специальное программное обеспечение «Insight», которое оптимально ориентирует ее относительно рабочей зоны установки и разбивает на горизонтальные слои, затем формируется анализ надобности применения поддерживающих опор для построения навесных форм модели. Сгенерированные данные передаются на блок управления установкой, запуская тем самым изготовительный процесс. В ходе выполнения операции термопластичный моделирующий материал (2), диаметром 1.78 мм, выдавливается тонкими слоями с высокой степенью точности через сопло экструзионной головки (1) с контролируемой температурой, нагреваясь в ней до полужидкого состояния, на подвижную рабочую

управляемую платформу (3). Процесс характеризуется постепенностью повторения наложения и солидифицирования трубчатых слоев до соединения друг с другом, выстраивая нужные изгибы форм. Отличительная черта «FDM» технологии – ненужность послеизготовительной механической обработки с возможностью быстрого задействования сформированной модели в дальнейшее применение.

Результатом физической материализации в ходе одной из приведенных технологических схем является создание точной копии смоделированного образца будущей отливки, выполненного из современных композитно-полимерных материалов: «ABS» или «PLA» пластиков или «PC» поликарбоната. «PLA» (полилактид) – биоразлагаемый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Сырьем для производства полилактида являются глюкозосодержащие элементы, такие как кукуруза или тростник. «ABS» (АБС-крилонитрилбутадиенстирол) – ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. «TECANAT (PC)» - аморфный прозрачный монолитный поликарбонат на основе бисфенола «А», синтезируемого конденсацией фенола и ацетона. В производственном процессе данные моделирующие материалы применяются как в чистом виде, так и химически модифицированными, и синтезированными: пластики «ABS Plus», «ABS-M30» и «ABS-M30i», пластик из смеси «PC» и «ABS», полифенилсульфон «PPSF» («PPSU»).

Основополагающими качествами, обеспечивающими приоритет в применении данных материалов в литейной индустрии являются отличительная точность изготовления готовой продукции, не требующей тонкой механической обработки, прочность, термостабильность и недеформируемость структуры, а также отсутствие усадки и наличие способности впитывать влагу.

Механические характеристики преимущественно используемых материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1
«Характеристики применяемых композитно-полимерных пластиков»

Наименование	«PLA» пластик	«ABS» пластик
Плотность материала	1,25 г/см ³	1,05 г/см ³
Прочность при растяжении	10-60 МПа	26-47 МПа
Предел прочности на разрыв	40 МПа	30 МПа
Ударная прочность	100 кДж/м ²	130 кДж/м ²
Разрушающее напряжение при изгибе	88-119 МПа	52-95 МПа
Температура плавления	165-195 °С	220°С
Усадка	-	0,3-0,8 %

Стоимость применяемых веществ от поставщиков материала в России варьируется в следующих пределах: «PLA» пластик: 800 – 1000 рублей за килограмм, а «ABS» пластик оценивается в 120 – 140 рублей за килограмм, что в промышленных масштабах является сравнительно нормальной ценой.

Окончательным этапом функционального задействования реализованного прототипа отливки является сконкретизированное его применение в литейном производстве, а именно в качестве модельного комплекта для литья в песчано-глинистые формы (стойкость моделей ABS позволяет выполнить 50-150 съёмов), а также использование в качестве замещения моделей из восковой массы в литье по выплавляемым моделям (рисунок 4).

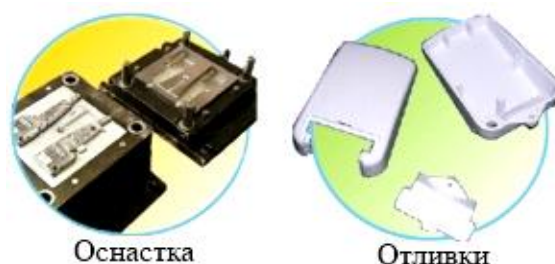


Рис. 4 Функциональное употребление прототипа в качестве литейной формы

В первом случае модель оставляет слепок формовочной смеси в обеих полуформах, после сушки которых и заливки стали образуются готовые отливки. Во втором же случае к ABS-прототипу отливки конструктивно присоединяются стандартные приспособления: стояк, прибыли, выпоры из модельной массы. Полученная сборка многократно покрывается суспензией из этил-силиката и слоями керамики. После приведенной операции модель вместе с литниковой системой и огнеупорной оболочкой подвергается сушке и одновременно выжиганию пластика в печи, оставляя, небольшое количество легко удаляемой (посредством промывки или с помощью сжатого воздуха) золы. В произведенную полу оболочку заливается расплав, после кристаллизации которого оболочка разрушается и изымаются готовые отливки (рисунок 4).

Подводя итоги, целесообразно провести методосравнительный анализ применяемой технологии, так как безусловно она включает в себя ряд преимуществ. Во-первых, применяя данную технологию в серийном производстве нет необходимости в затрате труда на изготовление индивидуального варианта оснастки, это действие производится масштабно в полной идентичности, снижая временные и энергетические затраты труда. Во-вторых, прочность, легкообрабатываемость и термостабильность «ABS» пластиков унифицируют требования к транспортировке моделей, а также продлевает срок их службы. В-третьих, податливость и точность применяемого материала дает возможность в создании законченных, не требую-

щих дополнительной механической обработки тонкостенных отливок толщиной 0.3 мм с высокой точностью и качеством полученной поверхности Rz 0.1. И, в-четвертых, применяемые «PLA» и «ABS» пластики не являются дефицитным и дорогим сырьем для их индустриализации. Очевидное преимущество компьютерной прототипизации перед традиционными способами воссоздания литейных моделей дает ей перспективные возможности и основательное право промышленного использования уже в ближайшем будущем.

Список литературы

[1]. *Бабкин О.Э.* 3D макетирование: технологии, оборудование, материалы: Монография. – СПб.: Изд-во СПбГУКиТ, 2013. – 97с. ISBN 978-5-94760-130-5.

[2]. *Валетов В.А., Кузьмин Ю.П., Орлова А.А., Третьяков С.Д.* Технология приборостроения: Учебное пособие. – СПб: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2008. – 336 с.

[3]. *Colin Gouldsen, Paul Blake* Investment Casting Using FDM/ABS Rapid Prototype Patterns: scientific documents. — USA, 2000. — 35 p.

Андросов Алексей Юрьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: armogen99@gmail.com

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

СЕКЦИЯ 2.

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Г.К. Ненарокомов, Н.Н. Максимов

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СВАРКЕ КАРКАСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

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

Алюминий и его сплавы находят все более широкое применение при производстве сварных конструкций. В частности, алюминиевые сплавы могут быть рекомендованы для каркасных конструкций, к которым предъявляются требования максимального снижения веса. Например, различных ферм, стрел для подъемных кранов, сборно-разборных мостов и т.д. Также в настоящее время наблюдается тенденция к увеличению доли сварных деталей из алюминиевых сплавов в каркасе кузова автомобилей. Применение таких сплавов позволяет уменьшить вес каркасной конструкции в 1,5-2,5 раза по сравнению со стальной.

Однако, при изготовлении сварных конструкций из алюминиевых сплавов встречаются трудности, связанные, в частности, со значительными деформациями. Причинами этих деформаций являются: повышенный коэффициент объемного теплового расширения, повышенная усадка при затвердевании и пониженный модуль упругости алюминия по сравнению со сталью. Перемещения при сварке каркасных конструкций из алюминиевых сплавов достигают весьма значительных величин.[1]

Решение проблемы значительного коробления кроется в управлении термомодеформационными процессами при сварке, размером зоны термического влияния и градиентами температурных полей в месте сварки. Это можно обеспечить применением дополнительных технических средств и решений.

В настоящее время, можно выделить два основных направления исследований, осуществляемых для решения задачи снижения сварочных деформаций при сварке каркасных конструкций из алюминиевых сплавов. Одно направление связано с обеспечением более равномерного нагрева зоны сварки, а также снижением градиента температурного поля.

Например, в работе [2] было экспериментально установлено, что внедрение дополнительного источника тепла при дуговой сварке в инертных газах алюминиевых сплавов способствует снижению остаточных напряжений и деформаций. Это достигается за счет уменьшения температурного градиента по поперечному сечению детали. Дополнительный источник тепла расположен в плоскости, проходящей через стык свариваемых деталей и перпендикулярной подогреваемой поверхности. Такое расположение обеспечивает симметричность температурного поля подогрева

температурному полю сварки. Для сохранения данной симметричности необходимо перемещать дополнительный источник синхронно со сварочным источником тепла. С целью подбора оптимальной температуры подогрева была произведена экспериментальная сварка двух прямоугольных поверхностей 1 с размером сечения 70×70 мм из сплава АМгб аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом 2 с подогревом дополнительным источником тепла 3. (рис1). Она показала, что для данного сплава оптимальная температура подогрева равна 350° и равна температуре потери материалом упругих свойств. При этом сварочные напряжения и деформации уменьшились на 70%.

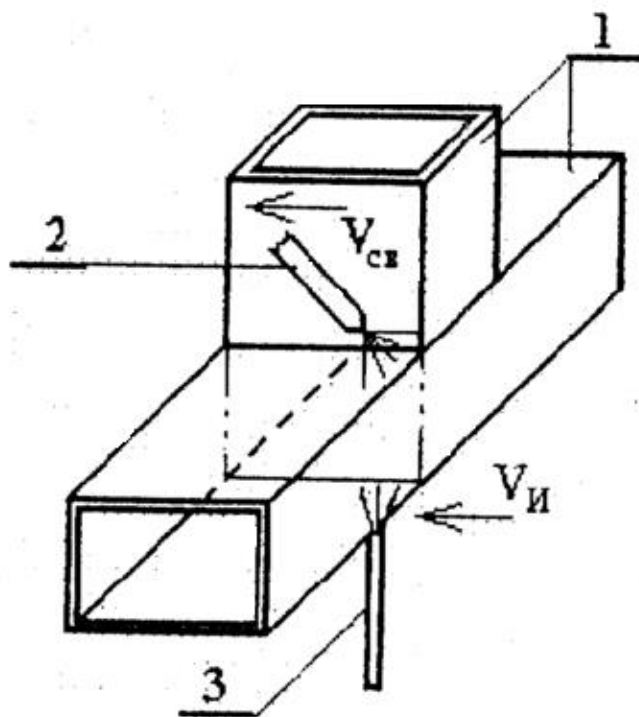


Рис 1.Схема сварки прямоугольных профилей с подогревом

Другое направление, напротив, связано с уменьшением тепловложения в металл, размеров зоны термического влияния и ширины шва.

Например, авторы работы [3] установили, что применение принудительного охлаждения при аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов позволяет уменьшить ширину шва на 18%, а размер зоны термического влияния на 23% по сравнению с традиционным способом аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов. При этом способе осуществляется принудительное охлаждение кристаллизующегося металла, закристаллизовавшегося металла шва и основного металла в зоне термического влияния, для чего установлены дополнительные сопла с обратной стороны шва. Интенсивное охлаждение указанных областей повышает жесткость термического цикла сварки и увеличивает пространственную концентрацию вводимой в свариваемый металл тепловой энергии, что способствует уменьшению размеров

зоны термического влияния и ширины шва. Помимо вышеуказанных преимуществ применение данного технического решения повышает прочность соединения, а микроструктура в околошовной зоне является более благоприятной. Данный способ наиболее эффективен при сварке тонколистовых конструкций.

В заключение следует отметить, что в данный момент не существует универсального метода снижения остаточных деформаций при сварке алюминиевых каркасных конструкций. И решение о применении дополнительных технических средств необходимо принимать исходя из состава сплава, толщины материала, а также после проведения математического моделирования процесса.

Список литературы

[1] Климов А.С. Разработка технологии аргонодуговой сварки конструкций с пониженным уровнем остаточных напряжений и деформаций из профильных алюминиевых труб. Дис. канд. техн. наук - Тольятти, 2007 - 212 с.

[2] Казаков Ю.В., Климов А.С., Нижегородцева О. И. Способ сварки плавлением. Пат №2193954 Российская федерация, 2008, 5с.

[3] Власов С.Н., Лапин И.Е., Савинов А.В., Лысак В.И., Потапов А.Н., Атаманюк В.И. Способ сварки в защитных газах с принудительным охлаждением шва и зоны термического влияния. Пат №2232668 Российская федерация, 2008, 7с.

Максимов Николай Николаевич - канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии сварки" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstu-kaluga.ru

Ненарокомов Георгий Константинович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ego9911@yandex.ru

А.Ю. Сапожников, Г.В. Орлик

ВЛИЯНИЕ ЗАТОЧКИ ВОЛЬФРАМОВОГО ЭЛЕКТРОДА НА СТАБИЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ

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

Одними из основных факторов, влияющих на качество при сварке неплавящимся электродом является форма сварного шва и ее неизменность в процессе сварки. То, какой будет форма сварного шва, напрямую определяет механические свойства изделия. В особенности это важно при сварке труб с трубными досками, где геометрия шва должна быть сформирована определенным образом: с достаточной глубиной проплавления и ограниченным наплывом на внутреннюю стенку трубки.

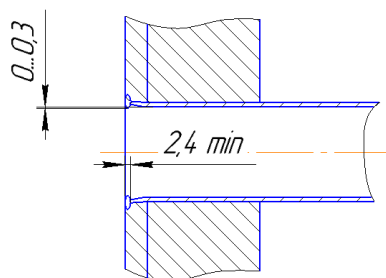


Рис. 1 Требования к геометрии сварного шва при сварке труб с трубной доской.

Форма сварного шва зависит от ряда следующих факторов: сила тока, падение напряжения на дуге, длина дуги, полярность и род тока, скорость сварки, состав защитного газа. Однако, помимо вышеперечисленных существует ряд факторов, значительно влияющих на форму сварного шва. К ним относятся форма заточки электрода и ее изменение в процессе сварки. [1]

Данные характеристики влияют на форму: глубину и ширину шва при сварке. Размеры зоны проплавления уменьшаются с увеличением угла заточки и притупления соответственно с изменением давления и мощности дуги, а при малых углах заточки заметно снижается глубина проплавления. При различной величине угла заточки электрода γ изменяется ширина сварочной ванны, величина зоны термического влияния, устойчивость процесса сварки. [2].

На рисунке 2 представлены основные параметры электрода, которые необходимо учитывать при заточке.

Максимальная глубина проплавления возможна при заточке электрода на угол в 30 градусов (рис. 3). Точками показаны значения медиан глубины проплавления для каждого угла заточки. Прямоугольниками показано значение выборок, а горизонтальными засечками показан размах глубины проплавления. Для угла заточки в 30 градусов наблюдается наименьший размах глубины проплавления, что говорит о стабильности процесса сварки. [3]

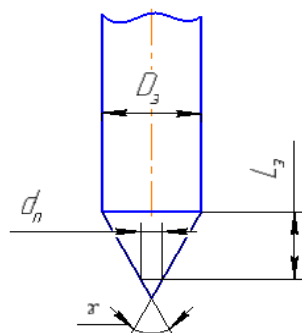


Рис. 2. Основные параметры электрода, где D_3 - диаметр электрода, d_n - диаметр притупления, L_3 - длина конического участка электрода, γ - угол заточки электрода.

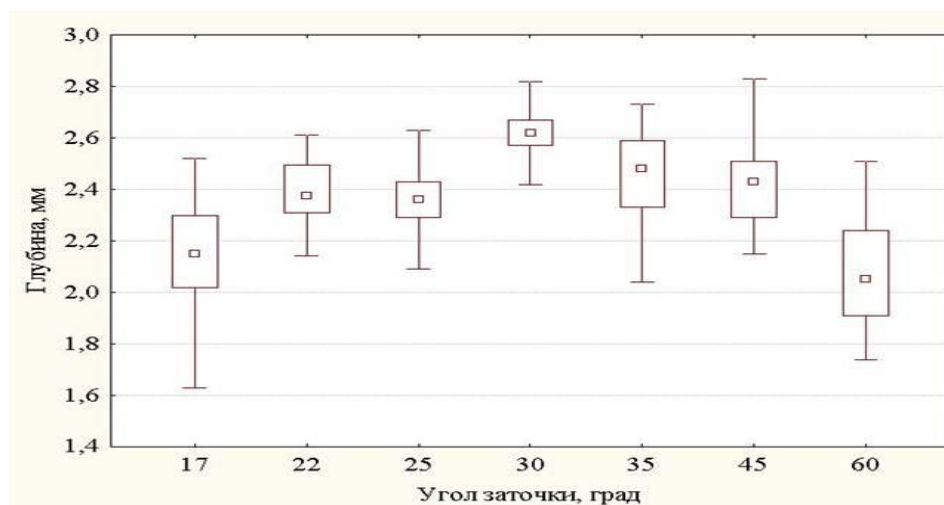


Рис. 3 Диаграмма изменения глубины проплавления при различных углах заточки электрода диаметром 3 мм на токе 120 А.

В качестве критерия стабильности использовали дисперсию глубины проплавления. Она характеризует степень компактности расположения «облака наблюдений» около своего центра тяжести (среднего значения). Оценка дисперсии определяется формулой:

$$S_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

где X_i - измеряемая величина (глубина проплавления);

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

оценка математического ожидания измеряемой величины (глубины проплавления).

Таблица 1

Расчет дисперсии глубины проплавления для разных углов заточки электрода диаметром 3 мм на токе 120 А.

№	20°	30°	45°
1	2.39	2.61	2.41
2	2.23	2.68	2.38
3	2.45	2.57	2.42
4	2.42	2.63	2.39
5	2.36	2.59	2.40
6	2.31	2.65	2.29
7	2.35	2.69	2.43
8	2.21	2.71	2.26
\bar{X}	2.34	2.64	2.37
S_x^2	0.0073	0.0025	0.0039

График зависимости дисперсии глубины проплавления от угла заточки электрода показан на рисунке 4. Видно, что наибольшая стабильность глубины проплавления на электродах ВЛ-10 диаметром 3 мм при сварочном токе 120 А обеспечивается на углах заточки 30 градусов. Результаты исследования влияния угла заточки электрода на стабильность формы проплавления при токах 180 и 240 А показали схожие результаты. Максимальная стабильность обеспечивается при углах заточки 30 градусов, при этом на других углах заточки с ростом сварочного тока дисперсия глубины проплавления увеличивается. [1]

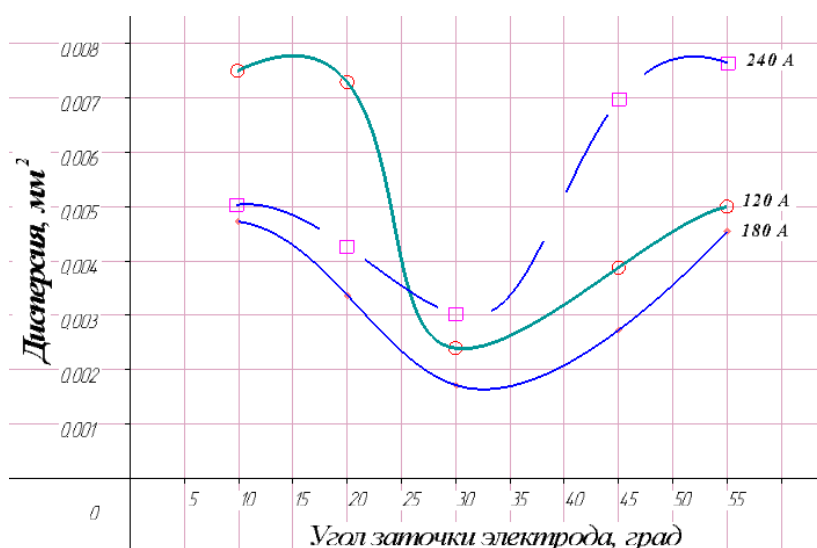


Рис. 4 График зависимости дисперсии глубины проплавления от угла заточки электрода

Результат подсчета статистических данных говорит о том, что процесс сварки наиболее стабилен, а глубина проплавления является наибольшей при заточке вольфрамового электрода на угол в 30°. Это позволяет сваривать изделия с требуемой точностью. Стабильность глубины проплавления дает явное преимущество при сварке труб с трубными досками, регулировать силой тока глубину проплавления с меньшей вероятностью получить дефектный шов или чрезмерный наплыв на внутреннюю стенку.

Список литературы

[1] Бабкин, А.С. Расчет и оптимизация параметров режима дуговой сварки металлов / А.С. Бабкин. – Липецк: ЛГТУ, 2003. – 218 с.

[2] Коновалов А.В., Стрельников И.В. Разработка технологии PSW-сварки боковин из нержавеющей стали // Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», 23 – 25 сентября 2010. М., 2010. С. 111

[3] Технология сварки плавлением. Часть 1: учебное пособие / Е.А.Трущенко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 145с

Сапожников Андрей Юрьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sapozhnikov.andrei2016@yandex.ru

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

А.С. Коростелкин, И.М. Миронов, К.Ю. Труханов

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАГРЕВА

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

В ходе эксплуатации трубопроводов могут возникать неисправности: течь, коррозия и другие. Для устранения этих неполадок проводится выборочный ремонт. Одним из видов ремонта является исправление сваркой несквозных коррозионных дефектов. Ремонт сваркой допускается при регламентируемой температуре предварительного подогрева, которая определяется в зависимости от толщины стенки. Одним из способов подогрева является подогрев с помощью газогорелочных устройств.

На рисунке 1 приведен пример размещения газовых горелок при автоматизированном ремонте сваркой (наплавкой) [1].

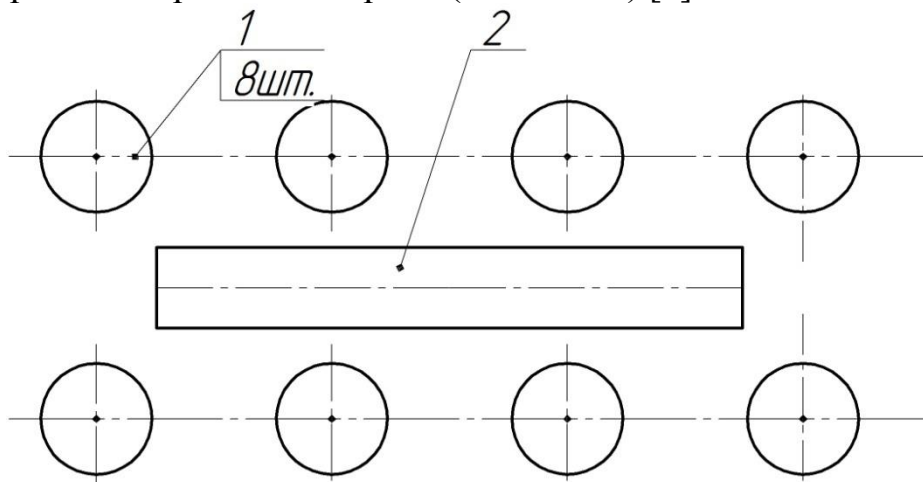


Рис. 1. Схема расположения подогревающих горелок:
1 – газовые горелки; 2 – зона дефекта

Одним из достоинств нагрева металла газовым пламенем является возможность гибко регулировать очертание и размеры пламени. Такое регулирование дает возможность распределять тепло по нужным участкам поверхности металла.

Для описания температурных полей от действия газовой горелки можно использовать следующие модели [2]:

1. Мгновенный нормально-круговой источник тепла описывает процесс распространения тепла, введенного в металл при кратковременном нагреве пламенем:

$$T(r, t_0) = \frac{Q / \delta}{c\gamma(4\pi\alpha t_0)} \cdot e^{-\frac{r^2}{4\alpha t_0}}, \quad (1)$$

где Q - количество теплоты, Дж; δ - толщина изделия, м;

$c\gamma$ - удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C);

α - коэффициент линейного расширения, 1/°C; T - температура, °C.

Расчет процессов распространения тепла мгновенного источника весьма просты в сравнении с расчетами процессов распространения тепла длительно действующих источников.

2. Быстродействующий нормально-полосовой источник тепла (рисунок 2), перемещается по нагреваемой плоскости прямолинейно с большой скоростью. Принятие этой схемы значительно упрощает расчет. Ошибка от принятия источника быстродвижущимся тем больше, чем меньше скорость перемещения источника и чем дальше расположены рассматриваемые точки от пути его перемещения. Построение температурного поля для быстродвижущегося нормально-полосового источника тепла производится при помощи формулы:

$$T(y, t_0) = \frac{q}{V\delta\sqrt{4\lambda c\gamma t_0}} e^{-\frac{y^2}{4\lambda t_0}}, \quad (2)$$

где q - эффективная мощность пламени, кал/сек;

V - скорость источника, м/с; δ - толщина изделия, м;

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м·°C;

$c\gamma$ - удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C);

t_0 - время, с; y - координата, м; T - температура, °C.

3. Неподвижный источник тепла. Этой схеме соответствует неподвижное относительно нагреваемой поверхности пламя, а также пламя, движущееся возвратно-поступательно и притом настолько быстро, что чередованиями в приложении потока тепла можно пренебрегать. При расчетах нагрева неподвижным поверхностным теплообменным источником тепла необходимо учитывать уменьшение начальной эффективной мощности источника, обусловленное повышением температуры нагреваемой поверхности.

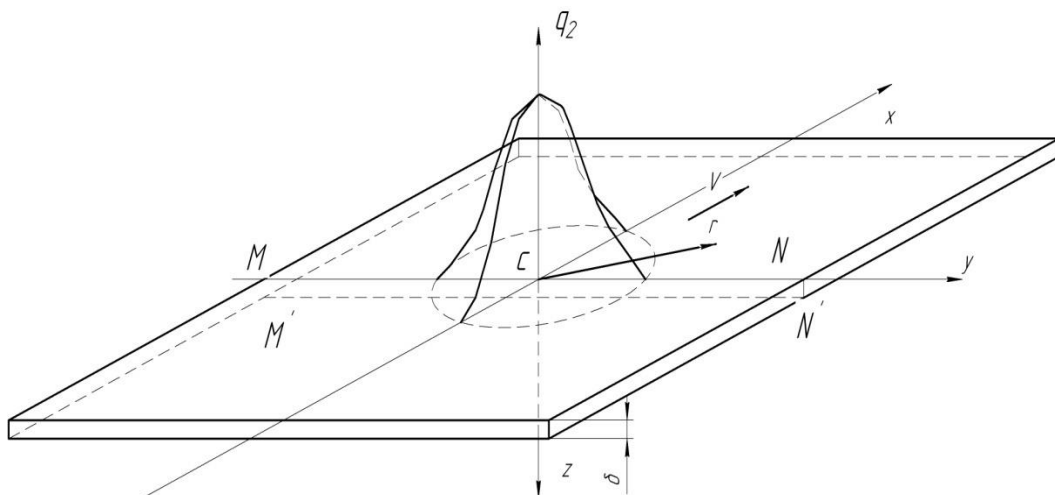


Рис. 2. Схема нагрева пластины быстро движущимся нормально-полосовым источником тепла

Построение температурного поля для быстро движущегося нормально-полосового источника тепла производится при помощи формулы:

$$T(0, \infty) = \frac{q_1}{2\sqrt{2\alpha\lambda\delta}}, \quad (3)$$

где q_1 - линейная эффективная мощность, *кал/см·сек*;

α - коэффициент линейного расширения, *1/°C*;

δ - толщина изделия, *м*; λ - коэффициент теплопроводности, *Вт/м·°C*;

T - температура, *°C*.

Рассмотренные схемы будут экспериментально исследованы с точки зрения точности и удобства описания тепловых процессов газогорелочного подогрева при автоматизированном ремонте сваркой (наплавкой) магистрального газопровода.

Список литературы

[1] Царьков А.В., Труханов К.Ю., Лоскутов С.В., Подхалюзин П.С. Разработка системы газопламенного подогрева участка трубы магистрального газопровода в условиях автоматизированного процесса ремонта поверхностных дефектов. *Сварка и диагностика*, 2014, №6, с. 20-23.

[2] Рыкалин Н.Н. – расчеты тепловых процессов при сварке. Учебник для вузов. «Высш. Школа», 1951 г.

[3] Петров Г.Л., Тумарев А.С. – Теория сварочных процессов (с основами физической химии). Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. М., «Высш. Школа», 1997 г.

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

Миронов Илья Михайлович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ilyamironov94@mail.ru

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

Н.И. Соловьев, К.Ю. Труханов

ОСОБЕННОСТИ ДУГОВОЙ СВАРКИ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

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

Сварка занимает важное место в различных отраслях промышленности и строительства, позволяет экономично использовать металлы и уменьшить отходы производства. Сварные соединения по прочности, как правило, не уступают основному металлу, хорошо работают при различных нагрузках, температурах и давлениях.

Медь и сплавы на ее основе в настоящее время широко применяются в промышленности, благодаря таким ее свойствам, как коррозионная стойкость и высокая теплопроводность.

Латунями называют сплавы меди с цинком. Сплав имеет более высокую прочность по сравнению с чистой медью. Однако при повышенном содержании цинка появляется склонность сплава к коррозии образованию трещин при нагреве. Латуни широко применяют в качестве конструкционного материала, обладающего высокой коррозионной стойкостью и более прочного, чем медь [1].

Сплавы на основе меди, в которых цинк не основной легирующий элемент, называют бронзами. Название бронзы уточняется по главному легирующему элементу, благодаря которому сплав приобретает необходимые свойства.

Оловянная бронза имеет хорошую коррозионную стойкость и антифрикционные свойства. Сплав нашел широкое применение при изготовлении коррозионностойкой арматуры, для различных трубопроводов, и вкладышей подшипников. Бронзы алюминиевые также имеют высокие механические свойства и хорошую коррозионную стойкость. Однако, более дешевы. Марганцовистые бронзы обладают высокой жаропрочностью. Бериллиевые бронзы после термической обработки становятся немагнитными с высокой прочностью, соответствующей прочности стали. Из этих бронз изготавливают различные гибкие, прочные элементы в приборах и различных устройствах [1].

Сварка меди и ее сплавов сопряжена с определенными трудностями. В связи с высокой теплопроводностью, затрудняющей локальный разогрев, требуются более концентрированные источники нагрева и повышенные сварочные режимы. Однако, в связи со склонностью меди к росту зерна, при сварке многослойных швов металл каждого прохода необходимо проковывать для уменьшения размера зерна.

Легкая окисляемость меди при высоких температурах приводит к засорению металла шва тугоплавкими окислами. Также, наличие некоторых

примесей может способствовать склонности соединений к образованию трещин [2].

При сварке латуней возможно испарение цинка. Образующийся окисел цинка ядовит, поэтому требуется хорошая вентиляция. Испарение цинка может привести к пористости металла. Этого удастся избежать предварительным подогревом и повышением скорости сварки, уменьшающей растекание жидкого металла и испарение цинка.

Высокий коэффициент линейного расширения способен вызвать остаточные сварочные напряжения и деформации. Сочетание высоких температурных напряжений со снижением механических свойств может способствовать образованию трещин. Для уменьшения деформации в процессе сварки необходимо жесткое закрепление свариваемых деталей.

Медь в расплавленном состоянии поглощает значительный объем водорода. При кристаллизации металла сварочной ванны с большой скоростью, ввиду высокой теплопроводности меди, атомарный водород не успевает покинуть металл. В околошовной зоне водород взаимодействует с оксидом меди, располагающимся по границам зерен. Образующиеся пары воды, которые не могут выйти из нее, создают значительные напряжения, приводящие к образованию большого числа микротрещин. Это явление получило название водородной болезни меди [2]. Для предупреждения водородной болезни следует снижать количество водорода в зоне сварки.

Повышенная жидкотекучесть расплавленной меди и ее сплавов (особенно бронзы) затрудняет сварку в вертикальном и потолочном положениях, поэтому чаще сварку ведут в нижнем положении. Для формирования корня шва без дефектов необходимы подкладки.

Дуговая сварка меди в защитных газах позволяет получать сварные соединения с наиболее высокими свойствами, так как металл шва содержит минимальное количество примесей.

С точки зрения результата этот способ наилучший. Швы отличаются высокой прочностью и аккуратностью. Сварка выполняется вольфрамовым лантанированным или иттрированным электродом диаметром до 6 мм на переменном или постоянном токе прямой полярности [2].

В качестве защитных газов используются аргон, гелий, азот или их смесь. Эти газы отличаются своими технологическими свойствами. Азот, в частности, требует меньшего сварочного тока в сравнении с аргоном, но швы имеют некоторую склонность к порообразованию. Кроме этого, расход азота превышает расход аргона. Поэтому последний, с учетом универсальности, используется чаще других.

В качестве присадочного металла пригодна проволока из меди и ее сплавов, которые по составу идентичны основному металлу, но содержат раскислители. На практике часто используют медные жилы из электрических проводов [3]. Желательно, чтобы температура плавления присадки была ниже температуры плавления основного металла.

Во избежание загрязнения вольфрамового электрода, дугу можно поджигать на угольной или графитовой пластине, перенося ее затем на изделие.

В отличие от алюминия, сварка меди требует манипуляций горелкой для формирования шва и обеспечения его соединения со стенками. Металл нужно расталкивать круговыми или зигзагообразными движениями горелки [3].

Тонколистовые детали не рекомендуется сваривать сплошным швом во избежание прожогов. Они варятся короткими швами с прерыванием дуги и перекрытием валиков.

Механизированная сварка под флюсом возможна неплавящимся угольным или графитовым электродом и по обычной схеме плавящимся электродом. При сварке угольным электродом кромки собирают на графитовой подкладке, поверх стыка накладывают полосу латуни, которая служит присадочным металлом. Дуга горит между угольным электродом, заточенным в виде плоской лопаточки, и изделием под слоем флюса. Раскислителем служит цинк, содержащийся в присадочном металле [4].

Однопроходную сварку и первые слои при многопроходной сварке выполняют на графитовой подкладке или флюсовой подушке. В связи с отсутствием предварительного подогрева начало шва располагают на выводной планке. При толщине листов до 15 мм соединение выполняют без скоса кромок; при большей толщине используют V-образную разделку с углом раскрытия 90 градусов.

С помощью покрытых электродов варят медь толщиной более 2 мм. Сварку выполняют постоянным током обратной полярности [5]. Однако, ввиду того, что покрытые электроды не могут обеспечить такое же качество шва, какое обеспечивает сварка в аргоне, этот способ редко применяется для сварки меди и ее сплавов.

Литература

- [1] Гуляев А.П. Металловедение. Москва, Металлургия, 1986, 650 с.
- [2] Геворкян В.Г. Основы сварочного дела. Москва, Высш. Шк., 1985, 168 с.
- [3] Кашин С. Сварочные работы. Практический справочник. Москва, ЭрнстТрейдинг, 2015, 330 с.
- [4] Юхин Н.А. Механизированная дуговая сварка. Москва, Суэло, 2002, 72 с.
- [5] Малышев Б.Д., Мельник В.И., Гетия И.Г. Ручная дуговая сварка. Москва, Стройиздат, 1990, 320 с.

Соловьев Николай Игоревич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: nick.solov@yandex.ru

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

Н.И. Соловьев, П.С. Зверев, К.Ю. Труханов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ СБОРКИ-СВАРКИ УЗЛА ПОПЕРЕЧНОЙ БАЛКИ АВТОМОБИЛЯ

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

Сварка широко применяется при производстве автомобилей и автокомпонентов. В условиях массового производства важным вопросом является автоматизация и механизация, как процессов сварки, так и сборки изделий.

Сборочно-сварочные приспособлениями - устройства, целью которых является повышение точности и качества сварных изделий, сокращения длительности выполнения производственных операций при сборке и сварке, облегчения условий труда и повышения безопасности работ.

По назначению приспособления делят на универсальные и специальные, стационарные и переносные, с ручным и механизированным приводом.

Универсальные чаще всего применяют в мелкосерийном и единичном производстве, когда изготовление относительно дорогой специализированной оснастки нерационально. Недостаток приспособлений - обеспечение менее производительной работы.

Специальные приспособления применяют в крупносерийном и массовом производстве, так как их стоимость часто велика, что при малом выпуске может намного увеличить себестоимость изделий. Однако могут применяться и в мелкосерийном производстве, когда невозможно изготовить узел с требуемой точностью с использованием универсальных приспособлений. Специальные приспособления позволяют обеспечить наивысшее качество работ и добиться высокой производительности труда.

Конструкции приспособлений должны обеспечивать заданную точность, свободный и удобный доступ к деталям и рукояткам управления крепежных устройств.

Проектирование сварочной оснастки необходимо начинать с экономического обоснования целесообразности его использования. Главный фактор – масштаб выпуска: чем больше изделий будет изготовлено с использованием приспособления, тем меньшая часть его стоимости будет входить в себестоимость изделия, и тем эффективнее скажется применение той или иной оснастки.

Немаловажное значение имеет особенность конструкции изделия. Часто совершить сборку и сварку без применения специального приспособления невозможно, особенно при изготовлении изделия без окончательной механической обработки, когда точность изготавливаемого узла высока. В этих случаях, даже при малой программе, их применение оправдано и необходимо.

Сложностью изготовления и точностью изделия обуславливают сложность приспособления. При невысокой требуемой точности допустимо использование простых съемных упоров и фиксаторов. Если требование к точности высокое, следует применять постоянные, жесткие упоры и фиксаторы.

Технология изготовления также играет роль при создании приспособления. Например, при ручной дуговой сварке допускаются большие зазоры в свариваемых соединениях, чем при автоматической сварке под флюсом [1].

Применяемые сборочно-сварочные приспособления можно разделить на устройства с ручным приводом: винтовые, эксцентриковые, рычажные и с механизированным приводом: пневматические, гидравлические и др..

Эксцентриковые прижимы являются быстродействующими. При повороте эксцентрика радиус поворота увеличивается, зазор между ним и деталью уменьшается до нуля. Зажим заготовки происходит за счет дальнейшего поворота эксцентрика [2].

Рычажные прижимы широко применяются в сборочно-сварочных процессах, являются быстродействующими, создают большие усилия прижима, величину которых можно регулировать с помощью пружинных амортизаторов. Конструкцию таких прижимов легко можно нормализовать, обеспечивая универсальность их использования [2].

Рассмотрим разработку сварочных приспособлений для сборки и сварки бокового крепежного узла (рисунок 1) поперечной балки автомобиля, производимую на одном из калужских заводов автокомпонентов.

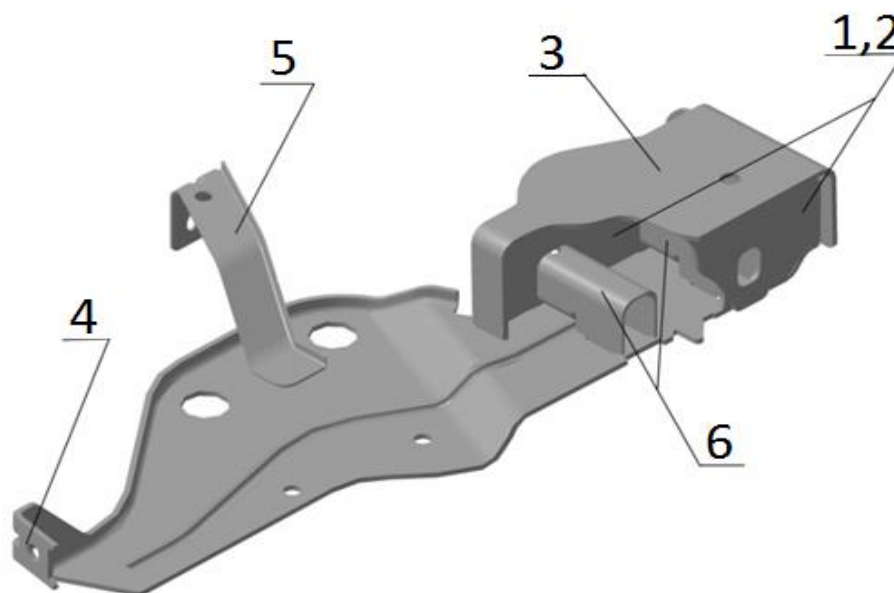


Рис. 1. Боковой крепежный узел

Изделие состоит из боковых стенок (1, 2), крышки (3), держателя панели (4), держателя вспомогательного (5) и U-вкладышей (6).

Для изготовления узла используется сталь для холодной штамповки DC01 1.0330 (DIN EN 10130) толщиной 2 мм, российским аналогом которой является сталь 10. Химический состав стали приведен в таблице.

Таблица 1. Химический состав и механические свойства DC01

Химический состав, %				Механические свойства		
C	P	S	Mn	R _e , МПа	R _m , МПа	A ₈₀
≤0,12	≤0,045	≤0,045	≤0,60	140-280	270-410	28

В процессе разработки зажимных устройств, предназначенных для изготовления изделия, было выяснено, что одновременная сборка под сварку всех деталей изделия трудновыполнима. Поэтому было принято решение разбить процесс изготовления изделия на этапы. Сначала боковые стенки привариваются к крышке, к основанию привариваются U образные вкладыши и вспомогательный держатель, затем вся деталь сваривается вместе.

Рассмотрим разработку прижимное устройство для сварки боковых стенок и крышки (рисунок 2).

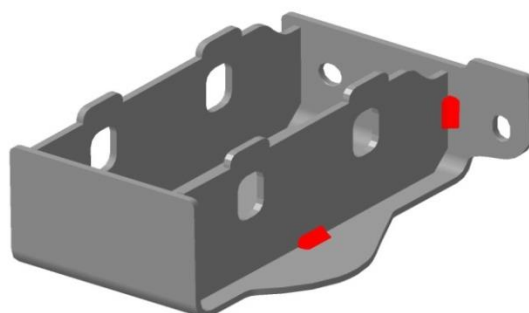


Рис. 2. Первый этап сборки-сварки крепежного узла

Было разработано две схемы зажимных устройств для сборки под сварку. Первый вариант (рисунок 3) представляет собой механизированный эксцентриковый прижим. Достоинством данной схемы является высокая производительность и точность позиционирования деталей относительно друга.

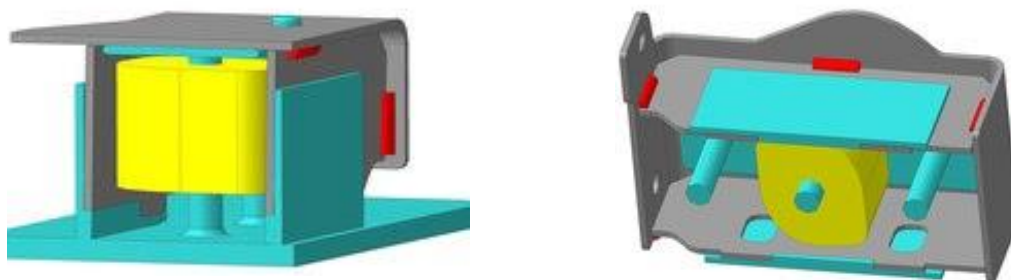


Рис. 3. Схема сборки-сварки с механизированным эксцентриковым прижимом

Вторая схема (рисунок 4) состоит из универсальных рычажных прижимов, что сильно уменьшает стоимость по сравнению с первой моделью. Однако универсальные прижимы менее точны и их производительность ниже, чем у механизированных прижимов.

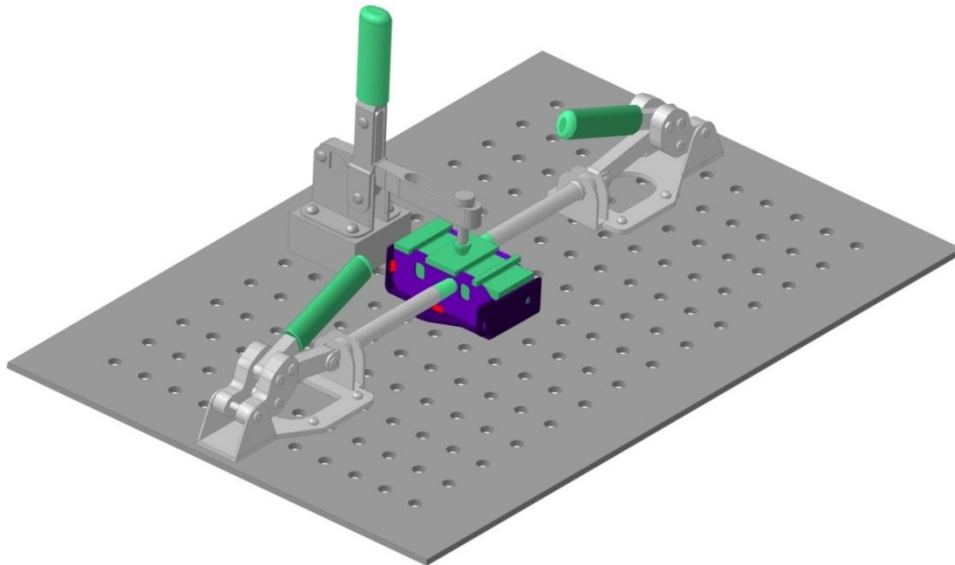


Рис. 4. Схема сборки-сварки с универсальными рычажными прижимами

Разработанные схемы удовлетворяют требованиям к быстродействию и точности для мелко и среднесерийного производства и планируются к реализации в качестве демонстрационного материала в учебном процессе.

Список литературы

[1] Таубер Б.А. Сборочно-сварочные и механизмы. Москва, МАШГИЗ, 1951, 410 с.

[2] Гитлевич А.Д., Этингоф Л.А. Механизация и автоматизация сварочного производства. 2-е изд., перераб. Москва, Машиностроение, 1979, 280 с.

Соловьев Николай Игоревич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: nick.solov@yandex.ru nick.solov@yandex.ru

Зверев Павел Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: zverev.pavel1995@yandex.ru

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

Н.Н. Максимов, В.Ю. Сергеев

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОУСИЛИТЕЛЯ РУЛЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ

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

В связи с необходимостью развития выпуска широкой номенклатуры товаров народного потребления, особенно изделий электротехнической и радиоэлектронной промышленности, часто возникает потребность соединять детали из высокотеплоэлектропроводных материалов (ВТЭПМ). Наиболее распространенными из этих материалов является медь, латунь, алюминий.

Именно при сварке данных материалов испытываются наибольшие затруднения, связанные с их низким удельным сопротивлением и высокой теплопроводностью, что приводит к недостаточному тепловыделению при контактной точечной сварке[1,2].

Характерным представителем деталей из ВТЭПМ является щеточный узел электроусилителя рулевого управления автомобилей, в котором необходимо соединить токоподводы из латуни Л63 ($\lambda=85$ Вт/м*град; $\rho=0.03$ ом*мм²/м) с медными проводниками ($\lambda=360$ Вт/м*град; $\rho=0.0175$ ом*мм²/м).

В одном щеточном узле содержится 10 сварных соединений. Соединения контактных площадок с проводниками и резистором нахлесточные. Работают в условиях протекающих через них пусковых и рабочих токов при нагреве до 80-100°C (допустимая температура нагрева определяется, в первую очередь, термостойкостью изоляции), воздействию отрывающих эл. динамических сил и вибрации.

К ним предъявляются жесткие требования, вытекающие из условий их работы.

Основными из них являются:

1. Электрическая проводимость не ниже проводимости рабочих элементов.
2. Механическая прочность не ниже 70-80 % от прочности основного металла.
3. Стойкость к вибрационным нагрузкам в условиях нагрева до 80-100 °С.

Особенности конструкции щеточного узла и самого электродвигателя обуславливают требования: сохранение исходных размеров контактных площадок, или обеспечение зоны термического влияния с таким расчетом, чтобы температура на границе контактной площадки и проводника не превышала предела термостойкости изоляции (в зависимости от свойств 250-450 °С). Другие условия определяются современными требованиями серийного производства. К ним относятся: экономические показатели, производительность, возможность механизации и автоматизации, а

также соответствие современным санитарно-гигиеническим и экологическим требованиям.

Обеспечить высокую стабильность указанных требований с помощью известных экономичных и производительных способов соединения препятствуют такие особенности, как ограниченные размеры контактных площадок и высокие теплофизические свойства свариваемых материалов.

В настоящее время контактные площадки деталей соединяют электроконтактной пайкой в электродах контактной машины. В качестве припоев используют самофлюсующиеся на основе никеля и меди.

Однако этот процесс малопроизводителен. Наличие большого числа соединений с развитой поверхностью определяет значительность затрат на припой, мероприятия по обеспечению дополнительных операций.

Недостатки процесса пайки можно исключить, применив один из известных способов сварки. Анализируя специфику материала и требований, предъявляемых к соединению и техпроцессу, можно было бы утверждать, что для нашего случая наиболее предпочтительным является способ контактной точечной сварки. Однако он не получил широкого распространения. Основным препятствием при его внедрении является низкое качество соединений, обусловленное высокими теплофизическими свойствами меди и затруднениями, связанными с концентрацией тепла в области контакта деталь-деталь.

Для повышения тепловыделения в зоне сварки таких деталей применяют различные технологические решения. В частности, для снижения оттока тепла из зоны соединения в электроды контактной машины, в качестве тепловых экранов применяют вольфрамовые вставки [3].

Отсутствие рекомендаций, на базе которых можно было бы выбрать величину сварочного тока $\zeta_{св}$, время сварки $t_{св}$, сварочное усилие $F_{св}$, диаметр вставок d_w , величину их вылета L_w (длину выступающей из медных электродов части вставок), а также глубоких теоретических исследований в данном вопросе, заставляет нас предпринять ряд самостоятельных исследований электротепловой обстановки в зоне соединения.

В данной работе для уменьшения отвода тепла из зоны соединения, кроме применения тепловых экранов, в виде вольфрамовых вставок, было предложено использовать адиабатическую границу совмещенной кромки детали и образующей электрода. С этой целью при установке деталей в электродах контактной сварочной машины их необходимо располагать так, чтобы образующая электрода совпадала с кромкой детали.

Для сохранения геометрических размеров контактных площадок свариваемых деталей предложено применять способ односторонней контактной точечной сварки (Рис 1).

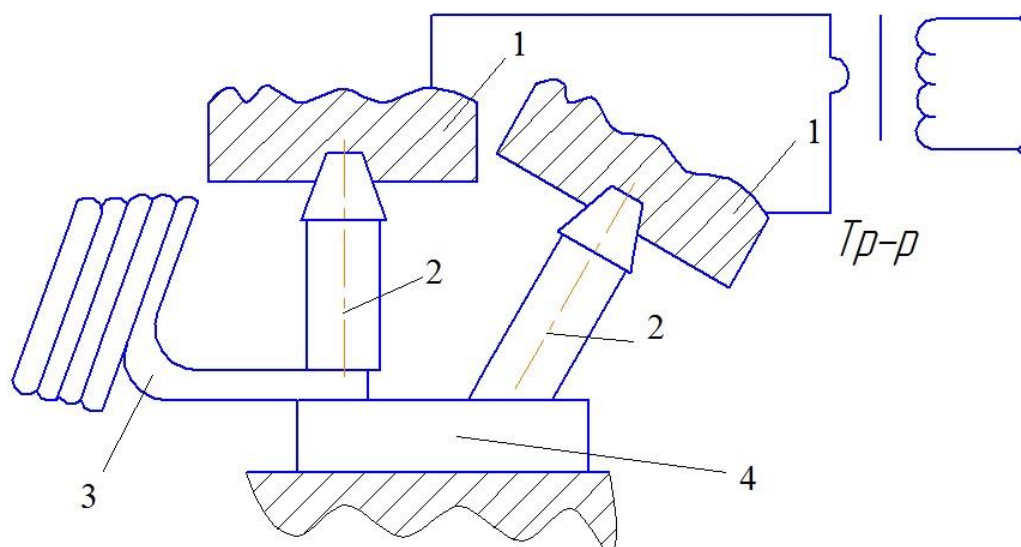


Рис 1.

где: 1-медные электроды; 2-вольфрамовые вставки; 3-медный провод; 4-контактная плоскость Л63

Применение данной схемы процесса и расчетных параметров геометрических размеров вставок, при сварке экспериментальных образцов показала положительные результаты по прочности и электропроводности сварных соединений.

Список литературы

[1] Антонов В.Ф. Системный анализ тепловых процессов при контактной сварке. – Пятигорск, 2011-19с.

[2] Ульрих Т.А. Математическое моделирование процесса контактной точечной сварки. – Пермь, 2000-22с.

[3] Максимов, Николай Николаевич. Разработка технологического процесса контактной точечной сварки меди электродами с вольфрамовыми вставками : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.03.06.- Москва, 1995-5-12с.

Максимов Николай Николаевич - канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии сварки" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstu-kaluga.ru

Сергеев Владислав Юрьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vladsergeev201293@gmail.com

А.С. Коваленко, И.Н. Зыбин

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВАРИАНТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАВАРКОЙ ПРОВОЛОКОЙ

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

Одной из ресурсосберегающих технологий восстановления деталей типа “вал” является электроконтактная наварка проволокой (ЭКНП).

Практический опыт применения ЭКНП для восстановления наружных поверхностей деталей типа “вал” показал, что наряду с цилиндрическими поверхностями деталей возникает необходимость в восстановлении конических поверхностей с углом конуса в большинстве случаев, находящимся в диапазоне от 0° до 30° [1].

В зависимости от угла конуса восстанавливаемой поверхности детали в работе [1] разработаны технологические варианты процесса наварки.

Согласно первому технологическому варианту наварка осуществляется без разворота электродов относительно навариваемой поверхности (при относительно небольших углах наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали). Второй технологический вариант также выполняется без разворота электродов относительно навариваемой поверхности, но с незначительным внедрением кромки электрода в деталь в конце цикла наварки. Согласно третьему технологическому варианту выполняется разворот электродов относительно навариваемой поверхности (при относительно больших углах наклона рабочей поверхности электрода к поверхности детали) [1].

В процессе ЭКНП рабочая поверхность электрода постепенно изнашивается, что предопределяет необходимость в ее переточке. К дополнительному значительному износу рабочей поверхности электрода и изменению геометрической формы кромки электрода, как показал производственный опыт восстановления ЭКНП деталей типа “вал”, может приводить даже незначительное внедрение кромки электрода в деталь (согласно второму технологическому варианту). Это требует более частой переточки рабочей поверхности электрода, что увеличивает затраты на восстановление деталей.

Анализ процессов внедрения кромки электрода в деталь при ЭКНП показал, что при этом происходит перенос части металла электрода в наваренный слой металла, что ухудшает структуру формируемого слоя металла и его эксплуатационные свойства. Это приводит к снижению качества восстановления и свидетельствует о нецелесообразности использования технологического варианта при восстановлении деталей наваркой с внедрением кромки электрода в деталь.

Известно [2-4], что наличие тангенциальной составляющей усилия, действующего в зоне контакта металлов, положительно сказывается на условии формирования соединения металлов. Например, наличие даже не-

большой тангенциальной силы в зоне контакта металлов, не вызывающей процессы макродислокаций при сварке давлением, способствует интенсификации процессов схватывания металлов [2]. С учетом положительного влияния тангенциальной составляющей усилия сжатия электродов предложены следующие технологические варианты восстановления конических поверхностей деталей типа “вал”, представленные на рис.1.

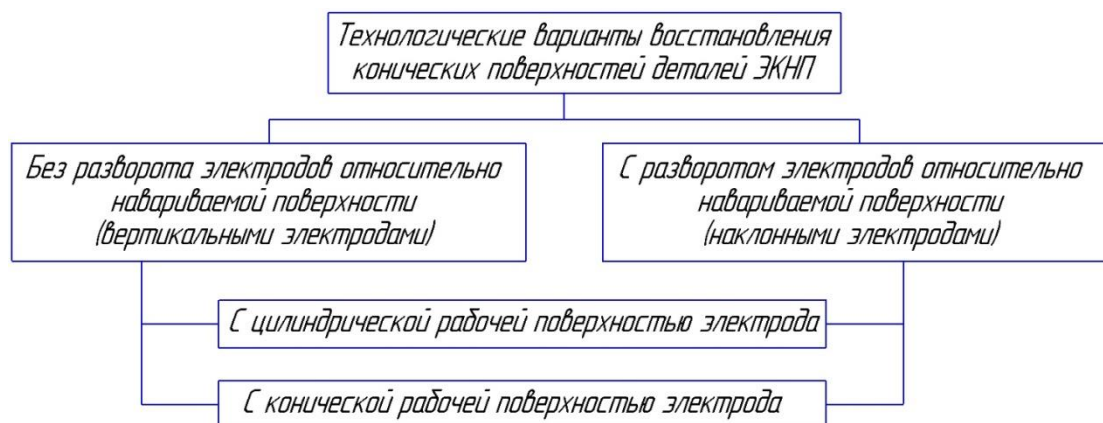


Рис. 1. Технологические варианты восстановления конических поверхностей деталей ЭКНП

Таким образом, предложены технологические варианты восстановления ЭКНП конических поверхностей деталей типа “вал”, учитывающие положительное влияние тангенциальной составляющей усилия, действующего в зоне контакта металлов, на условия формирования соединения металлов.

Список литературы:

- [1] Зыбин И.Н. Разработка процесса электроконтактной наварки проволокой наклонными электродами: дис.... канд. техн. наук. – М., 2003. – 197 с.
- [2] Гельман А.С. Основы сварки давлением. - М.: Машиностроение, 1970. – 312 с.
- [3] Шоршоров М.Х., Колесниченко В.А., Алехин В.П. Клинопрессовая сварка давлением разнородных металлов. – М.: Металлургия, 1982. – 112 с.
- [4] Зыбин И.Н. Особенности формирования соединения при электроконтактной наварке проволокой наклонными электродами // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15574> (дата обращения: 09.03.2016).

Коваленко Антон Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: toxa2394@mail.ru

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

В.В. Савосто, И.Н. Зыбин

ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ НАВАРКА ПРОВОЛОКОЙ С РАЗВОРОТОМ ЭЛЕКТРОДА ОТНОСИТЕЛЬНО ДЕТАЛИ

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

Электроконтактная наварка проволокой (ЭКНП) является одной из перспективных ресурсосберегающих технологий восстановления наружных поверхностей деталей типа “вал” широкой номенклатуры.

К одним из показателей качества восстановленной ЭКНП детали относится прочность соединения основного и присадочного металлов [1], которая в большей степени зависит от правильного выбора режима наварки и других сопутствующих процессу факторах (например, качество подготовки поверхности детали, подача охлаждающей воды в зону наварки и т.д.). Это свидетельствует об актуальности вопроса, направленного на повышение стабильности процесса ЭКНП, которое непосредственно взаимосвязано со стабильным значением прочности соединения металлов.

Одним из направлений, предложенных в работе [1,2] для повышения стабильности процесса ЭКНП, является уменьшение роли тепловой энергии в обеспечении физического контакта между соединяемыми металлами и образования между ними сварного соединения. Уменьшение этой роли возможно за счет интенсификации скольжения присадочной проволоки по поверхности детали в процессе термомеханического цикла ее наварки, что облегчает условия формирования физического контакта между присадочной проволокой и деталью [1]. Также известно [1,2], что скольжение проволоки по поверхности детали позволяет повысить прочность соединения металлов за счет дополнительного увеличения плотности активных центров схватывания.

Одним из способов, способствующих интенсификации скольжения присадочной проволоки по поверхности детали является способ, когда осуществляется разворот оси электрода относительно оси детали на угол α [1] (рис.1).

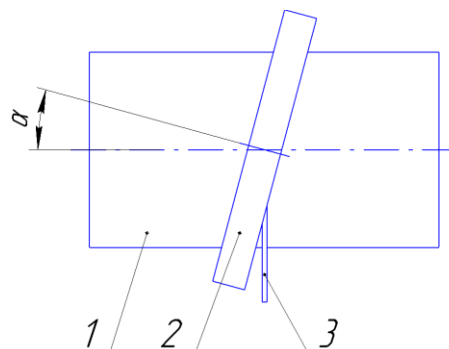


Рис.1. Разворот оси электрода относительно оси детали:
1 – роликовый электрод; 2 – деталь

При использовании данного способа интенсификации скольжения проволоки по поверхности детали, прежде всего, необходимо предусмотреть

реть такой узел сжатия роликовых электродов, который имел бы возможность разворота оси электрода относительно оси детали.

Анализ литературных источников и патентный поиск позволил выявить ряд устройств, в которых рассматривается конструкция узла сжатия роликового электрода с возможностью поворота оси электрода относительно оси детали. В частности, согласно патенту [3] устройство имеет корпус, внутри которого находится роликовый электрод, установленный на оси. При этом торцы оси выполнены в виде сегментов и размещены в кольцевом направляющем пазу корпуса с возможностью вращения в по окружности. Это вращение позволяет выполнять разворот оси электрода относительно оси детали при наварке. Однако такое устройство характеризуется значительными габаритными размерами, что предопределяет уменьшение номенклатуры восстанавливаемых деталей.

Устройство, имеющее меньшие габаритные размеры, предложено в патенте [4]. Подвод электрода к детали выполняется с помощью пневмоцилиндра, шток которого жестко связан с осью роликового электрода. На штоке имеется конусная часть, которая может входить во внутренний конус втулки, которая имеет возможность перемещаться по пазам цилиндрической втулки, жестко закрепленной на пневмоцилиндре. При выключенном приводе сжатия роликовый электрод поворачивают на требуемый угол и включают привод сжатия. Конусная часть штока при этом входит во внутренний конус втулки и за счет сил трения обеспечивает жесткое положение роликового электрода относительно детали. Данное устройство характеризуется относительно несложной конструкцией и незначительными габаритными размерами.

Таким образом, для реализации технологического варианта, связанного с интенсификацией скольжения проволоки по поверхности детали посредством разворота оси электрода относительно оси детали целесообразно применить вышерассмотренное устройство, предложенное в патенте [4] и характеризующееся незначительными габаритными размерами.

Список литературы:

[1] Латыпов Р.А., Булычев В.В., Коротков В.В. Повышение стабильности процесса электроконтактной приварки проволоки // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13387> (дата обращения: 10.03.2016).

[2] Булычев В.В. Технологические пути повышения стабильности электроконтактной приварки проволоки // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе: материалы ВНТК, Т.1. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – с. 275-276.

[3] Михайлов В.П., Фатехов А.Х. (СССР). Устройство для шовной электроконтактной сварки. А.с. 1044447 СССР, опубл. 30.09.83, бюл. № 36, 4 с.

[4] Сайфуллин Р.Н. Устройство для роликовой электроконтактной сварки. Пат. № 2343053 Российская Федерация, опубл. 10.01.2009.

Савосто Владимир Витальевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vovanpostbag@mail.ru

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

СЕКЦИЯ 3.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Аунг Пьо

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЕВ CDS НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ NCDS- PCdTE

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

Прямая солнечная энергия имеет значительный потенциал для обеспечения мировых энергетических потребностей. Солнечная энергия преобразуется в электричество двумя различными способами: солнечная тепловая и фотоэлектрическая. Солнечная тепловая генерация электроэнергии, как правило, делается за счет концентрации солнечного излучения в тепло жидкости и эксплуатации паровой электростанции[1]. Солнечный свет также может быть преобразован прямо в электричество с помощью фотоэлектрических эффектов в солнечных элементах. Солнечная батарея состоит из множества отдельных солнечных элементов и набор солнечных батарей расположены в солнечных панелях.

Структура для фотоэлектрических солнечных батарей относительно простая и недорогая по сравнению с другими технологиями. Солнечная энергия является региональной спецификой, но намного меньше, чем обшуждавшиеся ранее технологий. Стоимость фотоэлектрических производства электроэнергии продолжает сокращаться в последние несколько десятилетий и приближается к \$ 1 за ватт. Из возобновляемых технологий, которые в настоящее время предпринимаются для крупномасштабного производства электроэнергии и фотоэлектрические имеют значительный потенциал.

На основе CdTe является полупроводником A^{II}-B^{VI} с прямой запрещенной зоны 1,5 эВ с высоким коэффициентом поглощения $>10^5$ см⁻¹. CdTe хорошо сочетается с солнечным спектром и может быть поглощаться более 90% падающих фотонов с энергией на уровне или выше запрещенной зоны в только около 2 мкм слоя. Поглотитель слоя CdTe чаще всего в паре с CdS в качестве оконного слоя элементов. CdS имеет более высокую запрещенную зону ~ 2,5 эВ, что позволяет фотонам проходить через и быть поглощенным в слое CdTe. CdS слой сделан как можно тоньше, чтобы максимальное количество фотонов пройти к CdTe слоя. Почти все CdS/CdTe фотоэлементы производятся в вышележащей конфигурации.

Выходные параметры солнечных элементов зависят от структуры СЭ и толщины СЭ. В работе[2] проведено численное моделирование зависимостей функциональных характеристик кремниевых солнечных элементов, полученных методом ионно-лучевого осаждения, от толщины и уровня легирования фронтального слоя. Уменьшение толщины от 10 мкм до 0,1 мкм приводит к возрастанию тока короткого замыкания до 38 мА/см². Также в

работе[3] исследовано влияние толщины поглощающего слоя на эффективность солнечного элемента CdS/CdTe. Показано, что время жизни неосновных носителей (электронов) в поглощающем слое CdTe составляет 10^{-10} – 10^{-9} с, его толщина $d=3$ – 4 мкм является оптимальной.

Толщина CdS является одним из важных параметров высоких солнечных элементов эффективности. Толщина оптимизации CdS всегда требуется, которая может обеспечить максимальные выходные характеристики I_{\max} , U_{\max} и FF. Установлено, что изменение толщины d показывает большее влияние на ток короткого замыкания I_{sc} , чем на напряжение холостого хода, в случае увеличения d снижает I_{sc} . Увеличение толщины слоя CdS приводит к снижению тока короткого замыкания и максимальной мощности. Таким образом, применяемая математическая модель позволяет оценить влияние толщины слоев CdS и CdTe на выходные параметры СЭ на их основе. Полученные результаты могут быть использованы при производстве СЭ и СБ.

Список литературы

[1] R. L. Evans. Fueling our future an introduction to sustainable energy. Cambridge :: Cambridge University Press, 2007. P-117.

[2] *Черботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунина М.Л.* Моделирование зависимостей функциональных характеристик кремниевых солнечных элементов, полученных методом ионно-лучевого осаждения, от толщины и уровня легирования фронтального слоя // Вестник южного научного центра РАН. 2011. Т. 7. № 4. С.25-30.

[3] *Косяченко Л.А., Грушко Е.В.* Напряжение холостого хода, фактор заполнения и коэффициент полезного действия CdS/CdTe-солнечного элемента // Физика и техника полупроводников. 2010. том 44. вып. 10. с. 1422-1429.

Аунг Пьо - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aplay48@gmail.com

Тун Тун Лин

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРИТОВЫХ ПЛЕНОК ПО СПИН-ВОЛНОВЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

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

Законы дисперсии магнитостатических волн (МСВ), распространяющихся в пленках ферритов, определяют характеристики построенных на их основе приборов [1]. Наибольшее применение нашли пленки кубических ферритов, выращиваемые на монокристаллических подложках. Такие пленки обладают двумя видами магнитной анизотропии – кристаллографической и одноосной [2]. При проектировании спин-волновых устройств необходимо знать значения констант магнитной анизотропии. Цель данной работы состояла в разработке метода определения констант на основе частотно-полевых зависимостей в спектре поверхностной МСВ. В работе [3] частотно-полевые соотношения были выведены из уравнений Максвелла и уравнения Ландау-Лифшица. Магнитная анизотропия феррита была учтена с помощью эффективных размагничивающих факторов. Было выяснено, что дисперсионные уравнения (ДУ) основной моды прямой объемной и поверхностной МСВ плавно переходят друг в друга, и для обоих типов ДУ имеет место соотношение:

$$\frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_{ez}^2)}{dH_{ez}} = 4\pi M_0 + M_0 N_{xx}^a + M_0 N_{yy}^a - 2M_0 N_{zz}^a. \quad (1)$$

Здесь f – частота МСВ с фиксированным значением волнового числа; $4\pi M_0$ – намагниченность насыщения феррита; g – гиромагнитное отношение (у ферритов $g \approx 2.8$ МГц/Э); H_{ez} – проекция намагничивающего поля на направление вектора равновесной намагниченности M_0 ; N_{xx}^a , N_{yy}^a , N_{zz}^a – эффективные размагничивающие факторы анизотропии в системе координат, у которой ось X направлена вдоль нормали к пленке n , ось Y – вдоль волнового вектора k , ось Z – вдоль вектора M_0 (рис. 1).

Уравнение (1) может быть использовано для определения магнитных параметров ферритовых пленок. Для этого необходимо получить экспериментальную зависимость $f(H_{ez})$ при любом фиксированном значении волнового числа и по ней рассчитать левую часть уравнения. При этом в правую часть нужно подставить выражение, рассчитанное на основе выбранной модели пленки. В результате получится уравнение с известной левой частью и с набором материальных параметров в правой части. Составив систему из нескольких уравнений для разных кристаллографических ориентаций намагничивающего поля, можно рассчитать значения

входящих в модель параметров. В данной работе была использована модель пленок кубических ферритов. При этом, в отличие от работы [3], была учтена не только первая (K_{c1}), но и вторая константа кубической магнитной анизотропии (K_{c2}).

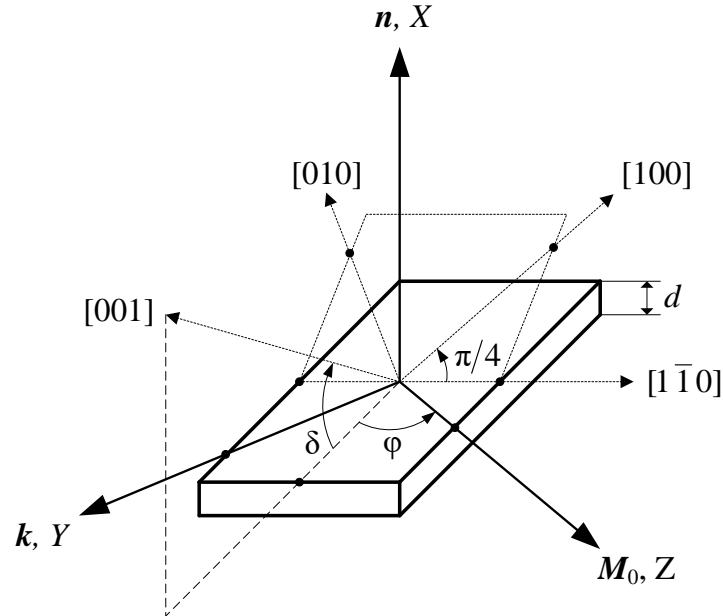


Рис. 1. Модель пленки кубического феррита

1. Пленки с ориентацией типа $\{100\}$.

Такой пленке соответствует значение $\delta = \pi/2$ (рис. 1). Выражения для эффективных размагничивающих факторов анизотропии с учетом не только кубической, но и одноосной анизотропии (параметр N_{xx}^u), имеют вид [4]:

$$N_{xx}^a = \frac{K_{c2}}{4M_0^2} (1 + \cos 4\varphi) + N_{xx}^u;$$

$$N_{yy}^c = -\frac{K_{c1}}{M_0^2} \frac{3(1 + \cos 4\varphi)}{2};$$

$$N_{zz}^c = -\frac{K_{c1}}{M_0^2} \frac{(3 - \cos 4\varphi)}{2}.$$

Уравнение (1) после подстановок примет вид:

$$\frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_{ez}^2)}{dH_{ez}} = 4\pi M_{eff} + H_{c1} \frac{(3 - 5 \cos 4\varphi)}{2} + H_{c2} \frac{(1 + \cos 4\varphi)}{4}, \quad (2)$$

где $4\pi M_{eff} = 4\pi M_0 + M_0 N_{xx}^u$ – эффективная намагниченность;
 $H_{c1} = K_{c1}/M_0$ и $H_{c2} = K_{c2}/M_0$ – компоненты поля кубической магнитной анизотропии. Кроме того, при намагничивании вдоль касательных осей

типа $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ проекция H_{ez} будет совпадать с полной напряженностью намагничивающего поля, так что можно полагать $H_{ez} = H_e$.

2. Пленки с ориентацией типа $\{110\}$.

В данном случае $\delta = 0$, и эффективные размагничивающие факторы выражаются формулами:

$$\begin{aligned} N_{xx}^a &= -\frac{K_{c1}}{M_0^2} \frac{3(1 - \cos 2\varphi)}{2} - \frac{K_{c2}}{M_0^2} \frac{(1 - \cos 4\varphi)}{8} + N_{xx}^u, \\ N_{yy}^a &= -\frac{K_{c1}}{M_0^2} \frac{9(1 - \cos 4\varphi)}{8} + \frac{K_{c2}}{M_0^2} \frac{(6 - \cos 2\varphi + 10\cos 4\varphi - 15\cos 6\varphi)}{64}, \\ N_{zz}^a &= -\frac{K_{c1}}{M_0^2} \frac{(9 + 4\cos 2\varphi + 3\cos 4\varphi)}{8} + \frac{K_{c2}}{M_0^2} \frac{3(2 - \cos 2\varphi - 2\cos 4\varphi + \cos 6\varphi)}{64} \end{aligned}$$

Частотно-полевое уравнение (1) после всех подстановок и алгебраических преобразований примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_{ez}^2)}{dH_{ez}} &= 4\pi M_{eff} - H_{c1} \frac{(3 - 20\cos 2\varphi - 15\cos 4\varphi)}{8} + \\ &+ H_{c2} \frac{(-14 + 5\cos 2\varphi + 30\cos 4\varphi - 21\cos 6\varphi)}{64}. \end{aligned} \quad (3)$$

В плоскости пленок с ориентацией типа $\{110\}$ расположены кристаллографические оси симметрии типа $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$, и сама плоскость $\{110\}$ является плоскостью симметрии кристалла. Анализ, основанный на преобразованиях симметрии, показывает, что для всех трех типов осей можно полагать $H_{ez} = H_e$. Каждый из косинусов в правой части уравнения (3) может быть выражен через $\cos^2 \varphi$. При этом направлениям вдоль осей типа $\langle 100 \rangle$ соответствует значение $\cos^2 \varphi = 1$, вдоль $\langle 110 \rangle$ – $\cos^2 \varphi = 0$, вдоль $\langle 111 \rangle$ – $\cos^2 \varphi = 1/3$. Для этих значений получаются следующие частотно-полевые уравнения:

$$\left[\frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_e^2)}{dH_e} \right]_{\langle 100 \rangle} = 4\pi M_{eff} + 4H_{c1}, \quad (4)$$

$$\left[\frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_e^2)}{dH_e} \right]_{\langle 110 \rangle} = 4\pi M_{eff} - H_{c1} + \frac{1}{2} H_{c2}, \quad (5)$$

$$\left[\frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_e^2)}{dH_e} \right]_{\langle 111 \rangle} = 4\pi M_{eff} - \frac{8}{3} H_{c1} - \frac{8}{9} H_{c2}. \quad (6)$$

3. Пленки с ориентацией типа $\{111\}$, $\sin \delta = 1/\sqrt{3}$ и $\cos \delta = \sqrt{2}/\sqrt{3}$.

$$N_{xx}^a = -\frac{2K_{c1}}{M_0^2} + \frac{K_{c2}}{6M_0^2} + N_{xx}^u, \quad N_{yy}^a = -\frac{K_{c1}}{M_0^2} + \frac{K_{c2}}{M_0^2} \frac{(1 - 5 \cos 6\phi)}{18},$$

$$N_{zz}^a = -\frac{K_{c1}}{M_0^2} + \frac{K_{c2}}{M_0^2} \frac{(1 + \cos 6\phi)}{18}.$$

Уравнение (1) с этими выражениями можно преобразовать к виду:

$$\frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_{ez}^2)}{dH_{ez}} = 4\pi M_{eff} - H_{c1} + H_{c2} \frac{(2 - 7 \cos 6\phi)}{18}. \quad (7)$$

4. Пример использования метода в пленке с ориентацией типа $\{100\}$.

Из уравнения (2) в условиях, когда $\mathbf{H}_e \parallel \langle 100 \rangle$ или $\mathbf{H}_e \parallel \langle 110 \rangle$ и, соответственно, $\cos 4\phi = -1$ или $\cos 4\phi = 1$, получается система из уравнений:

$$\left[\frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_e^2)}{dH_e} \right]_{\langle 100 \rangle} = 4\pi M_{eff} + 4H_{c1},$$

$$\left[\frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_e^2)}{dH_e} \right]_{\langle 110 \rangle} = 4\pi M_{eff} - H_{c1} + \frac{H_{c2}}{2}.$$

Простейшие алгебраические преобразования приводят к соотношениям, в которых параметр H_{c2} учтен в виде поправки к $4\pi M_{eff}$ и H_{c1} :

$$\frac{1}{5} \left\{ \left[\frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_e^2)}{dH_e} \right]_{\langle 100 \rangle} + 4 \left[\frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_e^2)}{dH_e} \right]_{\langle 110 \rangle} \right\} = 4\pi M_{eff} + 0.4H_{c2}, \quad (8)$$

$$\frac{1}{5} \left\{ \left[\frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_e^2)}{dH_e} \right]_{\langle 100 \rangle} - \left[\frac{1}{g^2} \frac{d(f^2 - g^2 H_e^2)}{dH_e} \right]_{\langle 110 \rangle} \right\} = H_{c1} - 0.1H_{c2}. \quad (9)$$

Выводы. Получены уравнения, которые позволяют определять магнитные параметры ферритовых пленок по спектрам МСВ. При этом в пленках кубических ферритов с ориентацией типа $\{110\}$ система из уравнений (4), (5), (6), позволяет определить три параметра – $4\pi M_0$, H_{c1} , H_{c2} . В пленках с кристаллографическими ориентациями типа $\{100\}$ и $\{111\}$ будет два определяющих уравнения. В этих случаях выведенные соотношения позволяют корректно учесть погрешность, обусловленную пренебрежением второй константой анизотропии (обычно в ферритах с $H_{c2} \ll H_{c1}$ полагают $H_{c2} \approx 0$). Так, приведенные в работе [3] данные по температурным коэффициентам параметров $4\pi M_0$, H_{c1} фактически были основаны на уравнениях (8), (9) и зависимостях, изображенных на рис. 2.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и совершенствовании материалов спин-волновой электроники.

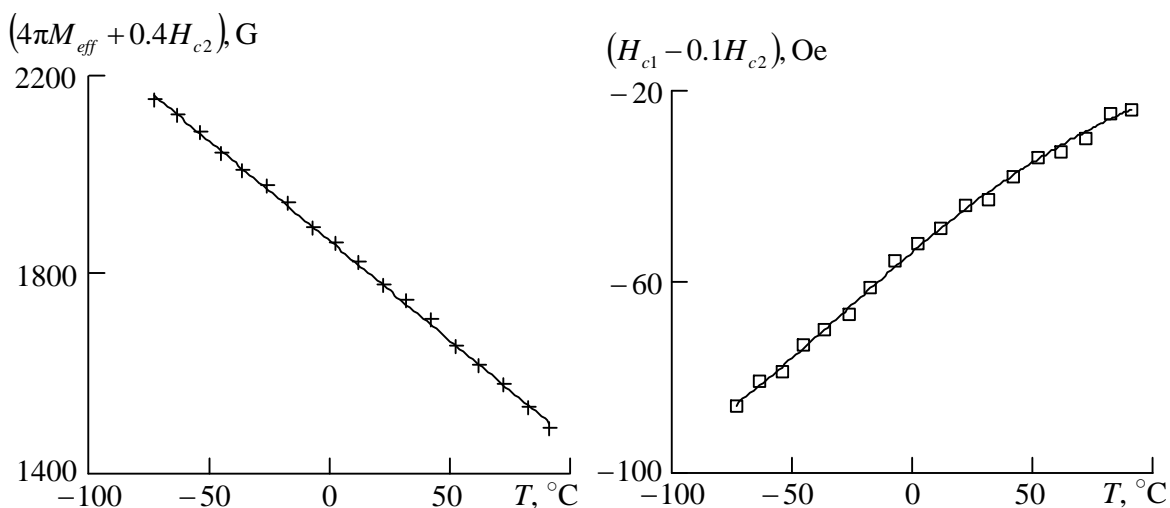


Рис. 2. Температурные зависимости магнитных параметров в пленке $Y_3Fe_5O_{12}$, ориентированной вдоль плоскости $\{100\}$, с поправками, учитывающими вторую константу кубической анизотропии

Список литературы

[1] Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.Г. Магнито-статические волны в электронике СВЧ. – Саратов: Изд.-во СГУ, 1993. – 316 с.

[2] Берегов А.С. Магнито-статические волны в структуре с произвольно намагниченной пленкой кубического ферромагнетика // Изв. ВУЗов. Сер. Радиоэлектроника. – 1984. – Т. 27, № 10. – С. 9-16.

[3] Шагаев В.В. Зависимость частот магнито-статических волн от напряженности поля подмагничивания в ферритовых пленках // ФТТ. – 1998. – Т.40, № 11. – С. 2089-2092.

[4] Шагаев В.В., Тун Тун Лин. Частотно-полевые зависимости в спектре поверхностной магнито-статической волны и их использование для определения магнитных параметров ферритовых пленок // Журнал Радиоэлектроники (электронный журнал). – 2015 – №1 – 16 с. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/16/text.pdf>.

Тун Тун Лин - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tuntunlinn50@gmail.com

Аунг Пьо

ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УЧИТЫВАЮЩИХ ТЕМПЕРАТУРНОЕ ВЛИЯНИЕ

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

Модель можно рассматривать как простой и быстрый инструмент для характеристики различных типов солнечных батарей, а также, определяет эффект условий окружающей среды на работу предлагаемой системы[1]. Температура оказывает значительное влияние на параметры ВАХ. В связи с разработкой высокоэффективных СЭ в последние годы вновь возник интерес к температурным эффектам в СЭ. Основное внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям температурных зависимостей таких параметров ВАХ СЭ, как КПД, коэффициент заполнения ВАХ, ток короткого замыкания, напряжение холостого хода[2].

В настоящее время математические модели (ММ) применяются при моделировании и анализе солнечных элементов (СЭ) и солнечных батарей (СБ). В данном обзоре рассмотрены математические модели солнечных элементов, учитывающих температурное влияние. Существуют следующие математические модели ВАХ СЭ, которые мы сможем использовать для моделирования, влияния температуры на выходные характеристики солнечных элементов и батарей.

Модель 1. СЭ с сосредоточенными параметрами, работающего в стационарном режиме, содержит генератор тока (I_ϕ) с большим внутренним сопротивлением. Величина тока пропорциональна освещенности и называется фототоком. В этом случае ток через нагрузку (I) описывается выражением:

$$I = I_\phi - I_0 \cdot \left\{ \exp \left[\frac{q \cdot (U + I \cdot R_{II})}{A \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right\} - \frac{U + I \cdot R_{II}}{R_{III}} \quad (1)$$

где I_ϕ – фототок, q – заряд электрона, U – напряжение на нагрузке, R_{II} – последовательное сопротивление, I_0 – обратный ток, R_{III} – шунтирующее сопротивление, A – диодный коэффициент (фактор не идеальности), k – постоянная Больцмана, T – температура.

Модель 2. Ток $I_{СЭ}$ СЭ зависит от интенсивности светового потока,

$$I_{СЭ} = I_\phi - I_0 \left(e^{\frac{qU_{СЭ}}{kT}} - 1 \right), \quad (2)$$

где I_ϕ – светового тока, I_0 – ток насыщения, q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура. Напряжение СЭ $U_{СЭ}$ при комнатной температуре $T = 293 \text{ }^\circ\text{K}$ возрастает по логарифмическому закону с увеличением интенсивности фототока I_ϕ .

Вольт-амперную характеристику СБ можно построить из формулы (2)

$$U_{CЭ} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{\phi} - I_{CЭ}}{I_0} \right) + 1, \quad (3)$$

В уравнении (3) напряжение СЭ зависит от фототока, тока насыщения и температуры. Ток насыщения I_0 зависит от носителей заряда рекомбинации в СЭ[3].

Модель 3. Аналогичный характер изменения напряжения холостого хода ФЭП (фотоэлектрический преобразователь) от температуры показан в работе [4], в которой эта зависимость представлена аналитическим выражением:

$$U_{XX} = \frac{E_g}{q} \left(1 - \frac{T}{T_{кр}} \right), \quad (4)$$

где T – температура; $T_{кр}=1000$ К (расчетов и обоснований в определении величины критической температуры в работе [4] не приведено).

Модель 4. В работе [5] представлена аналитическая зависимость напряжения холостого хода U_{XX} полупроводникового фотопреобразователя от температуры и уровня освещенности одновременно в виде произведения двух множителей.

$$U_{XX} = U_{XX0} \cdot \left[2 - \exp \left(\frac{-R_x}{K_0 \cdot R_0} \right) \right], \quad (5)$$

где U_{XX0} – теоретическая величина напряжения холостого хода, преобразователя с заданной шириной запрещенной зоны при нулевом уровне освещенности; R_x/R_0 – отношение заданного уровня освещенности преобразователя к стандартному СИ АМ 1,5 (1000 Вт/м²); K_0 – коэффициент, характеризующий индивидуальные свойства преобразователя, такие как степень отражения светового потока от рабочей поверхности, степень затенения контактной сеткой и степень эффективного разделения генерированных излучением неравновесных зарядов.

Теоретическая величина U_{XX0} представлена в виде выражения

$$U_{XX0} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{E_g}{q} - \frac{3}{2} \cdot \frac{kT}{q} \right] = \frac{1}{2} \frac{E_g}{q} \left[1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{kT}{E_g} \right], \quad (6)$$

где T – температура; E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника при нулевой температуре; $3/2kT$ – величина эффективного снижения ширины запрещенной зоны при заданной температуре T ; q – заряд электрона.

При постоянных E_g и T первый множитель выражения (6) U_{XX0} является некоторой константой. В этом случае U_{XX} преобразователя определяется уровнем освещенности R_x и коэффициентом K_0 , входящими в экспоненциальный член второго множителя выражения (5).

В выражении (6) температурный член не полностью отражает влияние температуры, не смотря на то, что при стандартной температуре 25 °С, выражение (5), содержащее U_{xx0} , хорошо описывает зависимость напряжения холостого хода преобразователя от освещенности.

Это обстоятельство послужило предпосылкой введения в выражение (6) слагаемого, несущественного при стандартной температуре, в виде $(1 - T/T_0)$, где T – текущее значение температуры, а $T_0 = 298$ К. В этом случае теоретическая величина U_{xx0} определяется как:

$$U_{xx0} = \frac{E_g}{q} \cdot \left[1 - \frac{1,5kT}{2E_g} - \frac{T}{2T_0} \right], \quad (7)$$

где T – температура;

Модель 5. В результате в работе [6] получено выражение для U_{xx0} :

$$U_{xx0} = \frac{E_g}{q} \cdot \exp \left[- \left(\frac{T}{\sigma_i} \right)^2 \right], \quad (8)$$

Для кремниевых СЭ на основе экспериментально-расчетного анализа величина σ определяется как:

$$\sigma_i = 330 \text{ К}, \quad (9)$$

Для других полупроводниковых материалов предложена методика оценки дисперсии в виде:

$$\sigma_i = \sigma_{si} \cdot \left(\frac{E_{gX}}{E_{gsi}} \right)^{0,5}, \quad (10)$$

где E_{gX} – ширина запрещенной зоны полупроводника; E_{gsi} – ширина запрещенной зоны кремния.

Таким образом, общее выражение U_{xx} полупроводниковых ФЭП представляется в виде функции:

$$U_{xx} = \frac{E_{gX}}{q} \cdot \exp \left[- \left(\frac{T}{\sigma_{si}} \right)^2 \cdot \frac{E_{gsi}}{E_{gX}} \right] \cdot \left[2 - \exp \left(\frac{R_x}{K_0 \cdot R_0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^4 \right) \right], \quad (11)$$

где R_x , R_0 – текущее и стандартное значение уровня освещенности, Вт/м²; T_0 – стандартное значение температуры ФЭП (равное 298 К); K_0 – параметр экспоненты, отражающий индивидуальные свойства исследуемого фотоэлемента.

Температурное влияние математических моделей (ММ) может проводиться с целью подбора технологических параметров обеспечивающих максимальный коэффициент заполнения ВАХ и максимальную выходную мощность солнечных элементов и батарей.

Список литературы

[1] S. SheikMohammed. Modeling and Simulation of Photovoltaic module using MATLAB/Simulink // International Journal of Chemical and Environmental Engineering. October 2011, Volume 2, No.5.P.350-355.

[2] Бордина Н.М., Летин В. А. Моделирование вольт-амперных характеристик солнечных элементов и солнечных батарей // Электротехн. Пром-сть. Сер. 22, Хим. и физ. источники тока. Обзор информ,—1986.— Вып. 1 (7). С. 1—64.

[3] Нянь Лин Аунг. Разработка солнечной фотоэлектрической системы автономного электроснабжения индивидуальных потребителей в тропических условиях: Дис. ... канд. тех. наук. – М.: МЭИ. – 2015. – 157с.

[4] <http://www.solarhome.ru/basics/pv/techirrad.htm> (Дата обращения 18.11.2015).

[5] Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P. Utmost efficiency coefficient of solar cells versus forbidden gap of used semiconductor // Adomavicius The 5th International Conference on Electrical and Control Technologies. Kaunas, Lithuania, 2010. P. 289-294.

[6] Стребков Д.С., Никитин Б.А., Харченко В.В., Гусаров В.А., Тихонов П.В. Влияние температур в широком интервале значений на параметры солнечных элементов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2013. №4. С. 46-48.

Аунг Пьо - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aplay48@gmail.com

Чжо Зай, В.В. Прасицкий

ПАРАМЕТРЫ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА КАК МАКСИМАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ РАССЕЯНИЯ, ВХОДНОЕ И ВЫХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДАТЧИКА

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

Рассмотрим вопрос о пригодности полупроводниковых материалов для датчиков Холла с точки зрения вышеперечисленных параметров.

Чувствительность датчика в режиме холостого хода равная

$$\lambda = \frac{U_H}{B} = \frac{RI}{d}, \quad (1)$$

где U_H – электродвижущая сила; R – постоянная Холла; I – сила тока через датчик; d – толщина датчика.

Для сравнения чувствительности датчиков Холла из различных полупроводниковых материалов формулу (1) удобнее представить в виде:

$$\lambda = \frac{U_H}{B} = \sqrt{AR\mu P_m} \cdot b, \quad (2)$$

где A – безразмерный параметр, величина которого зависит от механизма рассеяния электронов в полупроводнике и может изменяться от 1 до 2, μ – подвижность электронов в полупроводнике в $\frac{m^2}{B \cdot c}$, $P_m = j^2 \rho$ – максимальная

мощность, выделяемая в 1 м^3 полупроводника, j – плотность тока через датчик, ρ – удельное сопротивление полупроводника, из которого изготовлен датчик Холла. Величина P_m зависит от условий охлаждения датчика, геометрических размеров и максимально допустимого нагрева датчика.

Если пренебречь площадью боковых граней датчика, то $P_m = \frac{2Q\Delta T}{d}$, где Q – коэффициент теплоотдачи, ΔT – максимально допустимый нагрев датчика (разность температур датчика и окружающей среды).

Для датчиков Холла из различных полупроводниковых материалов, но с одинаковыми размерами, рассеиваемую мощность можно считать примерно одной и той же. С учетом P_m формула (2) применяется в виде

$$\gamma = \sqrt{\frac{2Q\Delta TAR\mu}{d}} \cdot b. \quad (3)$$

Величина ЭДС Холла зависит и от геометрических размеров датчика, а именно, от соотношения длины и ширины, а также от толщины датчика [1].

На рис. 1 показано схематическое представление принципа работы датчика. Полосковая пластина из подходящего материала толщиной d ,

длиной l и шириной b проводит ток I в продольном направлении и подвергается воздействию магнитного поля B , перпендикулярного пластине.

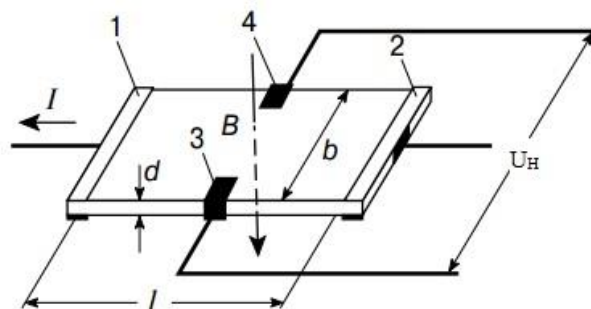


Рис. 1. Иллюстрация принципа работы датчика Холла

В этом случае между точками 3 и 4 возникает разность потенциалов, которую называют электродвижущей силой ЭДС Холла U_H . Обычно образцы для датчиков Холла имеют прямоугольную форму в виде тонких пластин или пленок. В таких случаях влияние относительных размеров датчика на величину ЭДС Холла становятся заметным и им нельзя пренебрегать. Если $\frac{l}{b} = 1$, то нельзя получить полной ЭДС Холла, т.к. происходит сильное закорачивание. Величина этого ЭДС Холла определяется выражением:

$$U_H = R_H \frac{I \cdot B}{d} f\left(\frac{l}{b}\right), \quad (4)$$

Если построить график зависимости отношения $\frac{U_H}{U_0}$. (U_H – ЭДС Холла на датчике данной формы, U_0 – ЭДС Холла на бесконечно длинном датчике) от величины отношения $\frac{l}{b}$, то из вычислений [2] и [3] ход поправочной функции будет иметь вид (рис. 2).

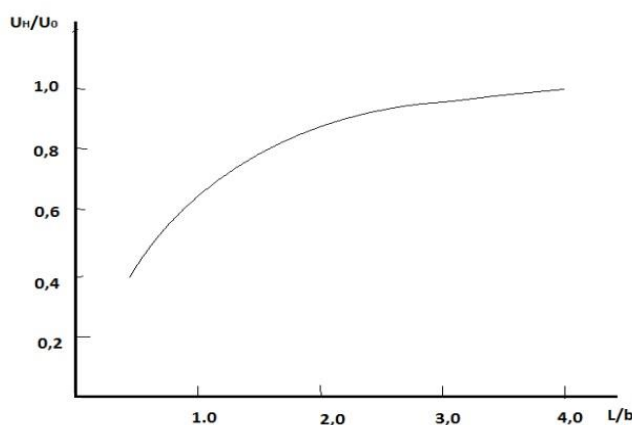


Рис. 2. Зависимость отношения $\frac{U_H}{U_0}$

Поправка на конечную длину датчика относительно мала. При $\frac{l}{b} = 2$ величина $\frac{U_H}{U_0}$ достигает значения 0,95; а при $\frac{l}{b} = 3$ поправка составляет всего около 1%. Поэтому не имеет смысла увеличивать это отношение, на практике обычно берется $\frac{l}{b} = 2 \div 3$. К такому же выводу пришел [4] и [5] вычислили ход поправочной функции $f\left(\frac{l}{b}\right)$ при разных углах Холла (θ) (рис. 3).

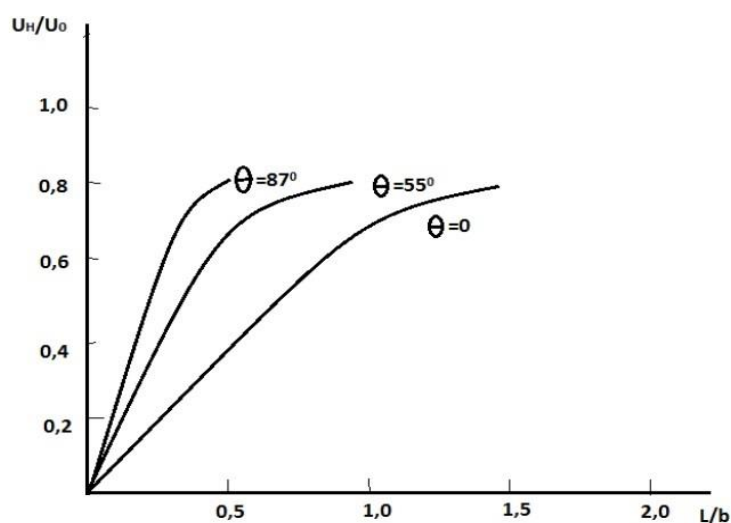


Рис. 3. Ход поправочной функции $f\left(\frac{l}{b}\right)$ при разных углах Холла (θ)

Мы рассмотрели здесь влияние соотношения сторон датчика, т.е. длины и ширины его на чувствительность. Как следует из формулы (3) ЭДС Холла обратно пропорциональна корню квадратному из толщины датчика. Следовательно, более тонкий датчик из полупроводника с оптимальными характеристиками может обладать большей чувствительностью, чем датчик из полупроводника с большой подвижностью электронов и с большим коэффициентом Холла. Изготовление датчика наименьшей толщины зависит от технологических возможностей полупроводника, при которых он не теряет или заметно не ухудшает основных своих характеристик – концентрации и подвижности электронов. Поэтому минимально возможную толщину датчика можно рассматривать как один из показателей полупроводника, из которого он изготавливается. Наиболее тонкие датчики в виде пленок можно получить испарением в вакууме селенида и теллурида ртути (HgSe и HgTe). Их характеристики мало отличаются от характеристик кри-

сталлов этих веществ. Можно также получать пленочные датчики Холла из антимонида и арсенида индия InSb и InAs .

Создание пленочных датчиков из названных низкоомных полупроводниковых материалов представляется особенно интересным, поскольку с уменьшением толщины датчика будет расти его сопротивление. Это облегчит измерение пороговой чувствительности датчика. Величина пороговой чувствительности обратно пропорциональна подвижности электронов и ширине датчика. Поэтому для измерения очень слабых полей нужно использовать полупроводниковые материалы с высокой подвижностью электронов, а ширину датчика выбирать как можно больше. При этом необходимо сохранять отношение $\frac{l}{b} \geq 2 \div 3$, хотя при заданной длине датчика вероятно выгоднее выбирать форму датчика, близкой к квадратной. Эти параметры не охватывают все требования, которые предъявляются к датчикам при решении разнообразных задач.

Список литературы

[1] Антропов В.А., Антропова Л.Х. Применение гальваномагнитных явлений в полупроводниках для создания приборов и устройств СВЧ диапазона. Пенза, ПГУ, 2011, с. 18-34.

[2] Isenberg J., Russell B.R., Greene R.F. Improved method for measuring Hall coefficient// Review of Scientific Instruments. 1948. V. 19, № 10. P. 685-688.

[3] Wick R. F. Solution of the field problem of the Germanium gyrator// Journal of Applied. 1954, V. 25, № 6, P. 741-756.

[4] Kuhrt F. Eigenschaften der Hallgeneratoren// Siemens Zeitschrift Bd. 1954, 28, P. 370-76.

[5] Lippmann H.J., Kuhrt F. Der Geometreinfluss auf den transversalen magnetischen Widerstandseffekt bei rechteckförmigen Halbleiterplatten// Zeitschrift für Naturforschung. 1958, V. 13a, № 6.

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

А.В. Мазин, Аунг Пьей Зон

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ХАРМАНА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

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

Метод Хармана [1] известен возможностью прямого измерения добротности при комнатной температуре. Помимо простоты осуществления метода, термоэлектрические свойства измеряются в одном и том же направлении. Вторым преимуществом является то, что технологическая добротность, которая отвечает за электрическое замыкание контактов ТЭМ (термоэлектрический модуль), достижима без необходимости изготовления целостного термоэлектрического прибора.

Для контроля качества ТЭМ методом Хармана используется измерение их термоэлектрических параметров. При применении этого метода для точного расчета характеристик термоэлектрической эффективности материалов необходимо вводить поправки, которые связаны с теплопроводностью подводящих и зондовых проводов, с тепловым излучением с образца и проводов, а также с теплотой Джоуля, выделяющейся в подводящих проводах. Конструкция образца проста и показана на рисунке 1. Образец (полоса или ветвь относительно узкая и длинная) спаян с линиями питания. Припой покрывает всю поверхность обоих концов образца так, чтобы направление течения тока было параллельно продольной оси образца.

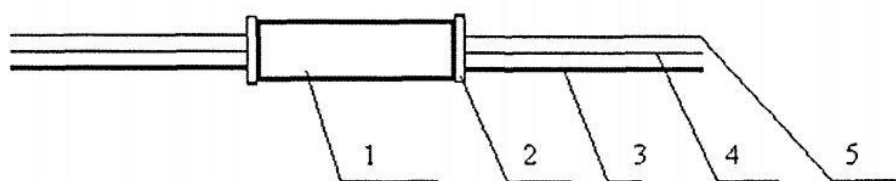


Рис. 1. Конструкция образца: 1-образец, 2-токораспределительная медная пластина, 3-константановый провод, 4-токовый медный провод, 5-зондовый медный провод

Введение добавочных термопарных проводов (константановый провод) к торцам образца (6 проводная схема измерений) позволяет выполнять измерения не только термоэлектрической эффективности, но и термо ЭДС и электропроводности. Контроль качества и численные расчеты термоэлектрических материалов методом Хармана обычно осуществляются на образцах в форме параллелепипеда со стандартным размером $4 \times 4 \times 10 \text{ мм}^3$, но усовершенствованная установка позволяет проводить измерения и на образцах других размеров. Все измерения проводятся в вакууме 10

Торр. Точность измерений термоэлектрической эффективности составляет 2% [2].

Рассмотрим основные требования к измерительной методике, которые должны обеспечиваться при измерении методом Хармана свойств термоэлектрических материалов. Обычно считают, что для измеряемого образца с термо ЭДС α_s и сопротивлением R_s пропускаемый через образец ток I должен быть таким, чтобы теплота Пельтье Q_p на контакте с температурой T , ($Q_p = \alpha IT$) была бы намного больше теплоты Джоуля ($Q_J = I^2 R$). Для того чтобы теплопроводность подводящих проводов k_w не сказывалась на температурном поле внутри образца, она должна быть мала по сравнению с теплопроводностью образца k_s .

Тепловые балансы на спаях (концах) образца имеют вид:

$$\alpha_s IT_0 - \frac{1}{2} I^2 R_s - k_s \Delta T = 0 \quad (1)$$

$$\alpha_s IT_1 + \frac{1}{2} I^2 R_s - k_s \Delta T = Q_1 \quad (2)$$

где $-T_0$ температура теплопоглощающего конца образца, T_1 - температура тепловыделяющего конца образца, ΔT - разность температур на образце.

Так как значение пропускаемого через образец тока I мало, пренебрегаем теплотой Джоуля на спаях образца. Таким образом, из (1) получаем:

$$\alpha_s IT_0 - k_s \Delta T = 0 \quad (3)$$

Потенциал (напряжение) U возникает между двумя термопарами, служащими для измерения ΔT . Данный потенциал является алгебраической суммой активного (омического) падения напряжения U_R между подводящими проводами термопары и потенциалом Зеебека между образцом и подобными ветвями термопар:

$$U = IR_s + \alpha_s \Delta T = U_R + \alpha_s \Delta T \quad (4)$$

Активное (омическое) падение напряжения выделяется измерением напряжения между термопарами с переменным током 60 циклов/сек. в образце:

$$U_R = IR_s \quad (5)$$

Следовательно,

$$I = \frac{U_R}{R_s} \quad (6)$$

Вычитание U_R из U и поправка на напряжение Зеебека из-за материала термопары дает абсолютное напряжение Зеебека (U_α) образца:

$$U_\alpha = \alpha_s \Delta T \quad (7)$$

Таким образом,

$$\Delta T = \frac{U_{\alpha}}{\alpha_s} \quad (8)$$

Подставив (6) и (8) в уравнение (3), получим:

$$\alpha_s \frac{U_R}{R_s} T_0 - k_s \frac{U_{\alpha}}{\alpha_s} = 0 \quad (9)$$

Отсюда следует выражение, описывающее функцию псевдодобротности Z :

$$\frac{U_{\alpha}}{U_R} = \frac{\alpha_s^2 T_0}{k_s R_s} = Z T_0 \quad (10)$$

Таким образом, предложенная модификация метода Хармана позволяет учитывать радиационные потери с измеряемого образца и подводящих проводов, а также тепловые потоки вдоль образца и подводящих проводов.

Список литературы

[1] Harman T.C. Special techniques for Measurement of Thermoelectric Properties// J.Appl.Phys.,V. 29, 1958. pp.1373-1374

[2] Гочуа К.В, Влияние дефектности структуры на электрофизические свойства термоэлектрических материалов на основе халькогенидов Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 , полученных методом вертикальной направленной кристаллизации и экстракции: Дис. канд. техн. наук-Москва, 2013 – 174с.

Мазин Анатолий Викторович - д-р техн. наук, зав. каф. "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

С.М. Твердова

РАСЧЕТ НЕКОТОРЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ В ТРЕХКОМПОНЕНТНОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ

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

В настоящее время получили применение трехкомпонентные полупроводники. Трехкомпонентный полупроводник $Al_xGa_{1-x}As$ – соединение, свойства которого являются промежуточными между $AlAs$ и $GaAs$ в зависимости от соотношения компонентов x (доли атомов Ga в $GaAs$, замещенных атомами Al).

Важнейшей характеристикой таких полупроводников является ширина запрещенной зоны – область энергий, отделяющая полностью заполненную электронами валентную зону (при $T = 0$ К) от незаполненной зоны проводимости. В данной работе представлены результаты эмпирического исследования температурной зависимости ширины запрещенной зоны E_g в зависимости от соотношения компонентов x .

Для полупроводника $Al_xGa_{1-x}As$ при комнатной температуре ($T = 300$ К) ширина запрещенной зоны E_g полупроводника меняется от $1,42$ эВ для $GaAs$ до $2,16$ эВ для $AlAs$ по мере того, как x меняется от 0 до 1 [1].

Ширину запрещенной зоны E_g можно рассчитать с помощью следующих выражений.

$$E_g(x) = 1,422 + 1,2475 \cdot x; \quad \text{если } x < 0,45 \quad (1)$$

$$E_g = 1,9 + 0,125 \cdot x + 0,143 \cdot x^2; \quad \text{если } x > 0,45 \quad (2)$$

Если $x < 0,45$ – прямозонный полупроводник; если $x > 0,45$ – непрямозонный [2].

Результаты расчетов для прямозонных полупроводников ($Al_{0,1}Ga_{0,9}As$, $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ и $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$) на различных температурах приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов

	$Al_{0,1}Ga_{0,9}As$		$Al_{0,2}Ga_{0,8}As$		$Al_{0,3}Ga_{0,7}As$	
	E_g (эВ)	λ_g (мкм)	E_g (эВ)	λ_g (мкм)	E_g (эВ)	λ_g (мкм)
$T = 100$	1,620	0,765	1,747	0,709	1,881	0,659
$T = 300$	1,541	0,804	1,668	0,743	1,802	0,688
$T = 500$	1,446	0,857	1,572	0,788	1,706	0,726

На рисунке 1а показана зависимость ширины запрещенной зоны E_g от соотношения компонентов x . Как видно, ширина запрещенной зоны E_g увеличивается с ростом доли компонентов x . Длина волны λ_g ($\lambda_g = 1,24 / E_g$) обратно пропорциональна самой ширине запрещенной зоны E_g . Зависимость длины волны λ_g от ширины запрещенной зоны E_g показана на рисунке 1б.

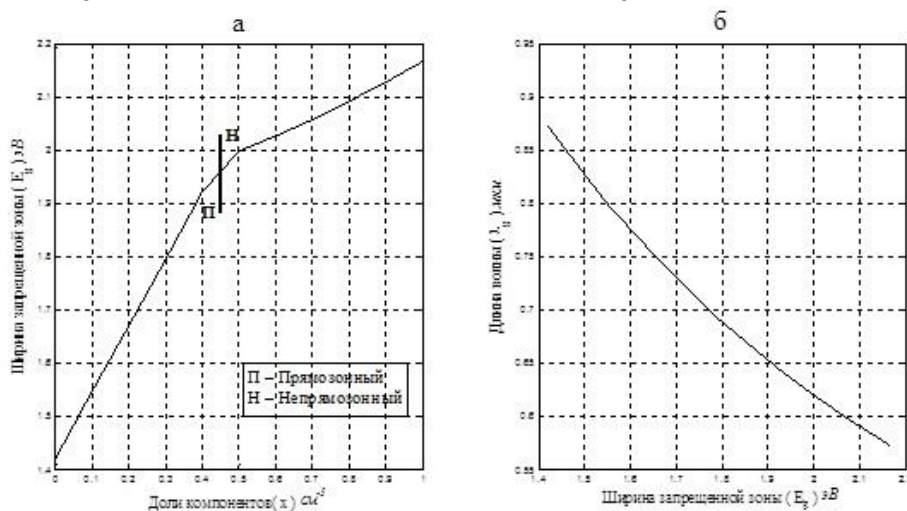


Рис. 1. а) зависимость ширины запрещенной зоны E_g от доли компонентов x ; б) зависимость длины волны λ_g от E_g

Ширина запрещенной зоны E_g и длина волны λ_g были рассчитаны при температурах $T = 100K, 300K$ и $500K$. Из таблицы видно, что с ростом температуры ширина запрещенной зоны E_g уменьшается и это приводит к увеличению длины волны λ_g . Это связано с изменением концентрации носителей. Концентрация собственных носителей n_i определяется в основном температурой и шириной запрещенной зоны полупроводника.

В собственных полупроводниках, в которых отсутствуют донорные и акцепторные примеси, электроны появляются в зоне проводимости только за счет теплового заброса из валентной зоны, тогда концентрация дырок в нем всегда равна концентрации свободных электронов ($n = p$) [3].

Оценка значений концентрации носителей (электронов и дырок) n_i была выполнена по формуле:

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (3)$$

где $N_c = 2\left(\frac{2\pi m_c kT}{h^2}\right)^{3/2}$; $N_v = 2\left(\frac{2\pi m_v kT}{h^2}\right)^{3/2}$.

Здесь N_c – эффективная плотность состояний в зоне проводимости; N_v – эффективная плотность состояний в валентной зоне; m_c – эффектив-

ная масса электрона; m_v – эффективная масса дырок; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана.

На рисунке 2 представлена зависимость концентрации собственных носителей n_i от температуры для $(Al_{0,1}Ga_{0,9}As)$, $(Al_{0,2}Ga_{0,8}As)$ и $(Al_{0,3}Ga_{0,7}As)$ полупроводников.

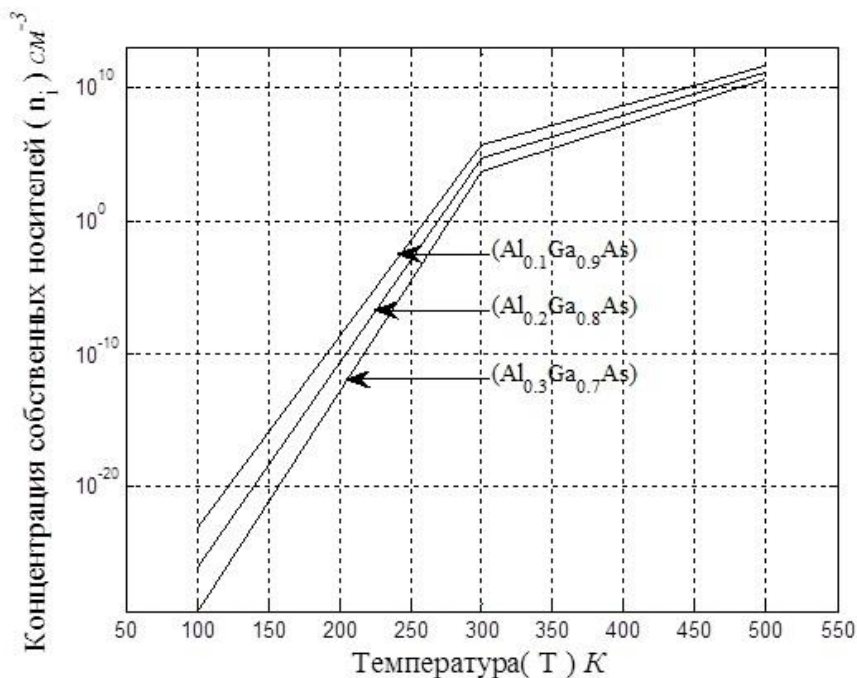


Рис. 2. Зависимость концентрации собственных носителей n_i от температуры K

Из графика видно, что при изменении температуры от $300K$ до $500K$ концентрация собственных носителей изменяется от значения 10^5 до 10^{11} .

Таким образом, в данной работе были рассмотрены два основных фундаментальных параметра в физике трехкомпонентных полупроводников, на примере $Al_xGa_{1-x}As$ – ширина запрещенной зоны E_g и концентрация собственных носителей n_i . Необходимо учитывать их изменение относительно внешних воздействий, в частности от температуры и доли компонентов x , которые влияют на свойства полупроводника.

Библиографический список

- [1] Saleh B.E., Teich M.C. *Fundamentals of photonics*. John Wiley & Sons, 2007, 1200 p.
- [2] Davies J.H. *The physics of low-dimensional semiconductor*. Cambridge University, 1998, 438 p.
- [3] Шалимова К.В. *Физика полупроводников*. Москва, Изд-во Энергоатомиздат, 1985, 392 с.

Твердова Светлана Михайловна - канд. техн. наук, преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivalug@rambler.ru

А.В. Мазин, Аунг Пьей Зон

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОМ ПЕЛЬТЬЕ

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

Термоэлектрический модуль является уникальным устройством по преобразованию электрической и тепловой энергии. Он позволяет осуществлять как прямое преобразование энергии (из электрической в тепловую) режимы охлаждения или нагрева, так и обратное преобразование режим генерации электрической энергии. Термоэлектрический модуль может также использоваться как устройство для измерения температуры или потока тепловой энергии[1].

При протекании электрического тока через элемент Пельтье в нем возникает два тепловых потока: Пельтье и Джоуля, также возникает ЭДС Зеебека, величина, которой пропорциональна перепаду температур на термоэлектрическом элементе. Эквивалентная схема элемента Пельтье показана на рис. 1.

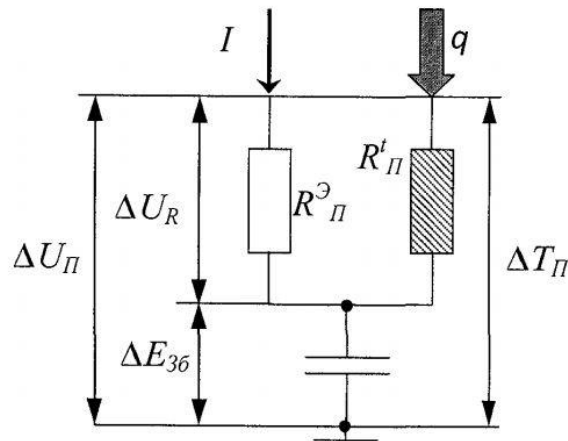


Рис. 1. Эквивалентная схема элемента Пельтье

ΔU_R - падение напряжения на активном сопротивлении элемента Пельтье; $R_{П}^t$ - тепловое сопротивление элемента Пельтье; $\Delta U_{П}$ - падение напряжения на элементе Пельтье, I - электрический ток, проходящий через элемент Пельтье, $R_{П}^{\mathcal{E}}$ - электрическое сопротивление элемента Пельтье, $\Delta E_{зб}$ - ЭДС Зеебека, $\Delta T_{П}$ - перепад температур на элементе Пельтье.

Взаимосвязь электрических и тепловых процессов отображают уравнения[2]:

$$\Delta E_{зб} = K_{зб} \Delta T_{П}, \quad (1)$$

$$\Delta U_{П} = IR_{П}^{\mathcal{E}} - \Delta E_{зб}. \quad (2)$$

где $K_{зб}$ - коэффициент Зеебека

Эти особенности элемента Пельтье позволяют применять его для измерения теплового сопротивления.

Тепловое сопротивление на участке тепловой цепи рис. 2. вычисляется по формуле:

$$Rt = \frac{\Delta t}{q}, \quad (3)$$

Rt - тепловое сопротивление на участке тепловой цепи, $K/Вт$

t_2 - температура начала участка, K

t_1 - температура конца участка, K

q - тепловой поток, протекающий через участок цепи, $Вт$

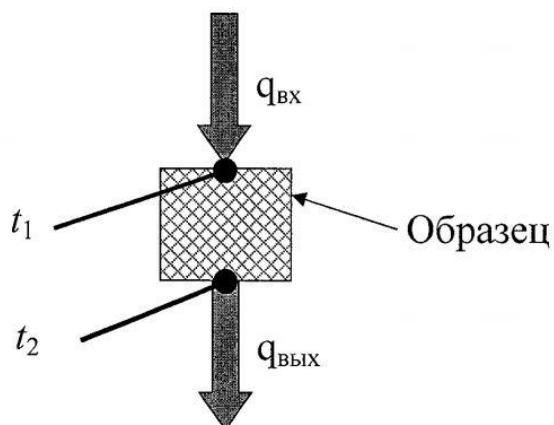


Рис. 2. Тепловой поток участка тепловой цепи

Элемент Пельтье позволяет одновременно генерировать одномерный тепловой поток заданных направления и величины, эти свойства термоэлектрического элемента позволяют реализовать схему измерения теплового сопротивления показанного на рис. 3.

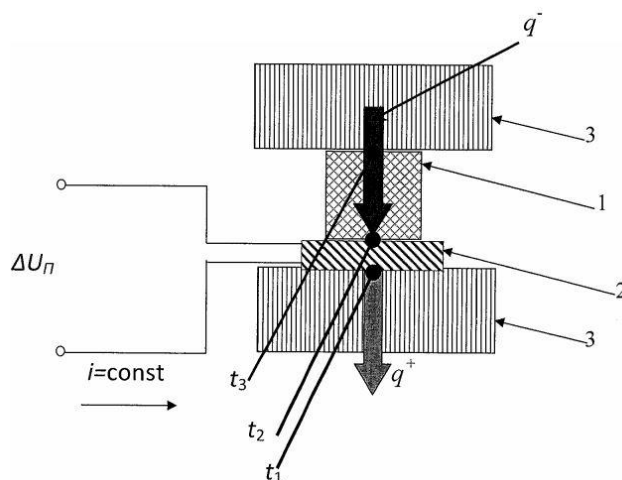


Рис. 3. Тепловой поток в системе элемент Пельтье - образец - теплоприемник

1 - образец, 2 - элемент Пельтье, 3 - теплоприемник, t_1 - температура нижней обкладки (поверхности) элемента Пельтье, t_2 - температура верхней обкладки (поверхности) элемента Пельтье и нижней стороны образца, t_3 - температура верхней стороны образца, $\Delta t = t_3 - t_2$ - перепад температур на образце.

Т. к. температуры t_1 и t_3 (рис.3) зафиксированы теплоприемниками (обладающих высокой теплопроводностью и теплоемкостью), находящихся вне посредственном контакте с образцом, относительно температуры окружающей среды, то их можно считать неизменными и равными температуре окружающей среды, т. е. $t_1 = t_3 = const$.

Эквивалентная схема системы (рис. 3) элемент Пельтье - образец - теплоприемник представлена на рис. 4.

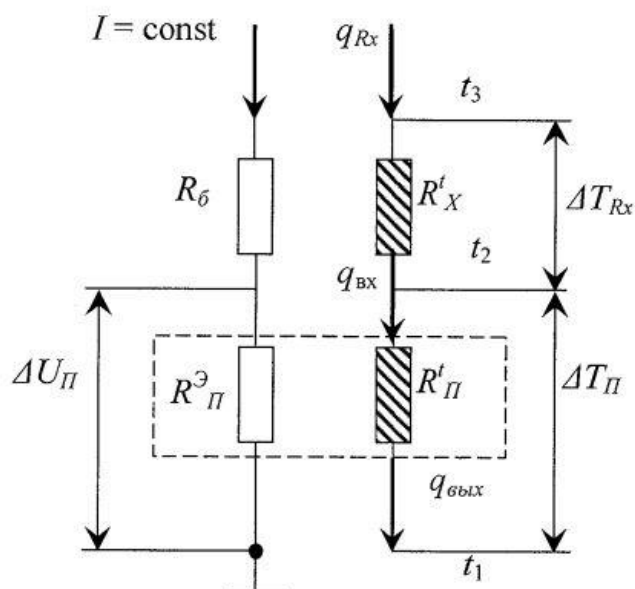


Рис. 4. Эквивалентная схема системы элемент Пельтье - образец - теплоприемник

где I - электрический ток, проходящий через элемент Пельтье, $\Delta U_{\text{П}}$ - падение напряжения на элементе Пельтье, R_0 - балластное сопротивление, $R^{\text{Э}}_{\text{П}}$ - электрическое сопротивление элемента Пельтье. R^t_x - тепловое сопротивление образца, $R^t_{\text{П}}$ - тепловое сопротивление элемента Пельтье, $q_{\text{вх}}$, $q_{\text{вых}}$ - тепловой поток генерируемый элементом Пельтье, $\Delta T_{\text{П}}$ - перепад температур на элементе Пельтье, ΔT_{R_x} - перепад температур на образце.

Тепловой поток $q_{\text{вх}}$ генерируемый элементом Пельтье определяется выражением:

$$q_{\text{ex}} = -\alpha_n \cdot I + \frac{R_{\text{II}}^{\text{Э}} \cdot I^2}{2} \quad (4)$$

Так как $q_{R_x} = q_{\text{ex}}$, то тепловой поток проходящий через образец R_x^t определяется также выражением (4)

Перепад температур ΔT_{II} на элементе Пельтье и тепловое сопротивление R_{II}^t , перепад температур ΔT_{R_x} на тепловом сопротивлении R_x^t и теплосопротивление R_x^t , при прохождении через элемент Пельтье электрического тока I , связаны следующим отношением:

При достижении стационарного режима и при условии равенства температур $t_1 = t_3$ тепловое сопротивление R_x^t определяется соотношением:

$$R_x^t = \frac{\Delta T_{R_x}}{q_{R_x}} \quad (5)$$

Так как $\Delta T_{\text{II}} = -\Delta T_{R_x}$, а $q_{R_x} = q_{\text{ex}}$ то получим следующее выражение;

$$R_x^t = \frac{-\Delta T_{\text{II}}}{-\alpha_n \cdot I + \frac{R_{\text{II}}^{\text{Э}} \cdot I^2}{2}} \quad (6)$$

Подставив соотношения (1) и (2) в выражение (6), получим:

$$R_x^t = \frac{\Delta U_{\text{II}} - IR_{\text{II}}^{\text{Э}}}{\left(-\alpha_n \cdot I + \frac{R_{\text{II}}^{\text{Э}} \cdot I^2}{2}\right) K_{\text{зб}}} \quad (7)$$

В связи с тем, что теплоприемники 3 на рис 3 имеют конечную теплоемкость, то при возникновении тепловых потоков в системе неизбежно возникает разность температур t_1 и t_3 , что является источником методической погрешности. Для обеспечения равенства $t_1 = t_3$ необходимо применять специальные устройства.

Зная тепловое сопротивление образца R_x^t и его геометрические размеры можно вычислить удельную теплопроводность образца. Тепловое сопротивление (R_x^t) и удельная теплопроводность (λ) материалов - взаимосвязаны соотношением:

$$\lambda = \frac{S}{R_x^t \cdot H} \quad (8)$$

где H - толщина образца ($м$), R_x^t - тепловое сопротивление ($К/Вт$), S - площадь поперечного сечения образца ($м^2$).

На практике не всегда возможно выполнение условия $t_1 = t_3 = const$, из-за того, что теплоприемник выполненный из меди имеет конечную и определенную теплопроводность и теплоемкость, вследствие чего происходит

нагрев/охлаждение теплоприемника и изменение температур t_1 и t_3 относительно окружающей среды и друг друга. Для обеспечения равенства температур $t_1 = t_3$, необходимо применять специальные устройства. Эти недостатки можно устранить, применив при измерении адиабатическую камеру.

Предложен метод позволяет измерить тепловое сопротивление при помощи применения элемента Пельтье.

Список литературы

[1] Тушенцова Е.Н. Термоэлектрический модуль (ТЭМ) [Электронный ресурс] // Четвертая Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая весна 2011: Машиностроительные технологии» / МГТУ им. Н.Э. Баумана.

[2] Гринюк А.В. Термоэлектрический метод контроля теплофизических параметров твердых материалов: Дис. канд. техн. наук – Москва, 2012 – 129с

Мазин Анатолий Викторович - д-р техн. наук, зав. каф. "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

Чжо Зай, В.В. Прасицкий

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДА НАТРИЕВОЙ ЛАМПЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

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

В настоящее время натриевые лампы высокого давления (ДНаТ) являются наиболее эффективными источниками искусственного освещения. Благодаря их высокой светоотдаче, достигающей 150лм/Вт, и спектру мощностей от 50Вт до 3кВт, они применяются для освещения складских помещений, автомагистралей, карьеров, парников и теплиц.

В мировой практике доля ламп типа ДНаТ превышает половину всех источников наружного освещения и составляет почти 100% тепличного искусственного освещения. В связи с этим остается актуальным вопрос совершенствования этого типа ламп по пути увеличения их долговечности и снижения отрицательного воздействия на экологию: увеличение срока службы уменьшает количество утилизируемых ламп и, соответственно, снижает выбросы в окружающую среду продуктов их переработки.

Современным электродом, обеспечивающим достаточно высокую долговечность лампам, является так называемый спеченный электрод, выполненный в виде вольфрамового стержня (керна) с напрессованной на него порошковой вольфрамовой матрицей, свободное пространство которой заполнено эмиссионно-активными добавками.

Конструкция электрода обеспечивает приемлемую себестоимость технологического процесса изготовления эмиссионного материала при обеспечении хорошей электронной эмиссии.

Недостатком существующего спеченного электрода является уменьшение срока службы, обусловленное обратным осаждением на эмиссионную поверхность электрода материала, удаленного с электрода распылением в процессе тлеющего разряда при зажигании лампы и испарением в процессе установившегося дугового разряда. Беспорядочно осажденное эмиссионно-активное вещество приводит к снижению термоэлектронной эмиссии, в результате чего лампа теряет свои эксплуатационные характеристики.

Для устранения подобного эффекта в конструкции электрода газоразрядной лампы, содержащего керн с закрепленной на нем спеченной массой, предлагается выполнять спеченную массу пористой, причем количество пор должно составлять от 5% до 35% ее общего объема.

Сущность предложения заключается в следующем.

Срок службы ламп определяется главным образом долговечностью термоэлектродов. Когда они теряют основную часть термоэмиссии, определяемой наличием эмиссионно-активного вещества на рабочей

поверхности электрода, лампы или перестают зажигаться, или работают в режиме тлеющего разряда, не обеспечивающего требуемые световые характеристики.

Если лампу ДНаТ мощностью 400Вт включить и оставить в этом состоянии, то она может функционировать 25-30 тысяч часов до выхода из строя. Если такую же лампу включать и выключать через каждые три часа, ее долговечность составит 8 – 10 тысяч часов.

Рассмотрим явления на поверхности термоэмиссионного электрода, работающего в режиме катода при его бомбардировке ионами плазмы тлеющего разряда [1]. Катодное падение потенциала в этом случае находится на уровне 200В при плотности ионного тока около 50мА/см². При этом характерная скорость распыления составит 0,1 атома, удаляемого с поверхности катода, на один падающий ион. Скорость удаления активно-эмиссионного вещества в вакууме будет равна $3,75 \cdot 10^{-6} \text{г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Из этого следует, что при пяти тысячах включений с односекундной длительностью тлеющего разряда будет потеряно около $200 \cdot 10^{-3} \text{г} \cdot \text{см}^{-2}$.

Следствием будет снижение термоэмиссии по нескольким направлениям. Во первых, обратно осаждающиеся на поверхность термоэмиттера из-за столкновения с атомами газа распыленные атомы эмиссионного вещества нарушают упорядоченную структуру. Нарушение структуры слоев активно-эмиссионного вещества, например, Ва-ВаО неизбежно приведет к увеличению работы выхода и снижению уровня термоэмиссии. Во вторых, ионы с энергиями на уровне 200эВ распыляют поверхность вольфрама. При этом обратно осаждающиеся атомы вольфрама осаждаются в том числе и на поверхности эмиссионно-активного вещества, закрывая его металлическим слоем и увеличивая работу выхода термоэмиттера. Следствием этих процессов является необходимость последующего повышения температуры электрода, необходимой для получения требуемого уровня термоэмиссии при работе в условиях дугового разряда.

Как показывают исследования, после каждого включения катод работает значительное время (до одного часа) при более высокой температуре, чем в стационарных условиях, что приводит к более активному испарению эмиттера, поскольку увеличение температуры на 70К увеличивает скорость испарения на порядок [2].

В ряде работ, например [3] доказано, что минимальной работой выхода обладают кристаллы эмиссионно-активного вещества, расположенные в порах эмиттера, поскольку они в наименьшей степени подвергаются внешним воздействиям и сохраняют в течение всего времени эксплуатации заданную структуру эмиссионной поверхности.

Проведенные исследования подтвердили решающее значение пористости спеченной массы для достижения максимальной долговечности разрядных осветительных ламп. При этом установлен тот факт, что для

ламп, в которых существенным является величина напряжения зажигания (лампы типа ДРЛ), следует применять электроды с максимальной пористостью.

Граничные значения пористости спеченной части электродов, определенные экспериментально, показали: при увеличении ее значения более 35% эффективность увеличивается незначительно, но при этом снижается механическая прочность электрода, а при уменьшении значения меньше 5% наблюдается значительное падение эффективности электродов и большой разброс эмиссионных характеристик электродов в различных партиях.

Долговечность натриевых ламп высокого давления типа ДНаТ250, оснащенных предлагаемыми электродами, увеличилась с 18 до 24 тысяч часов, что позволило сэкономить материальные и трудовые ресурсы при изготовлении ламп и снизить отрицательное влияние на экологию при их утилизации.

Список литературы

[1] John F. Waymouth. Electric discharge lamps// The Massachusetts and London. England. 1971. P. 436.

[2] Кудинцева Г.А., Мельников А.И., Морозов А.В., Никонов Б.П. Термоэлектронные катоды// М.: Энергия, 1966, с. 470.

[3] R. Loosjes and H.J. Vink. Appl. Phys. 1949, Vol. 20.

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

Чжо Зай, В.В. Прасицкий

ЭЛЕКТРОД ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ЛАМПЫ

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

Натриевые лампы высокого давления в настоящее время являются наиболее экономичным источником искусственного освещения. Их эксплуатационные параметры в решающей степени определяются типом применяемых электродов. Наиболее распространен электрод газоразрядной лампы, содержащий стержень (кern) из тугоплавкого металла с надетой на него спиралью также из тугоплавкого металла с нанесенным на спираль эмиттером [1].

Недостатком описанной конструкции электрода является высокая себестоимость его изготовления в связи с необходимостью применения керн и спирали из тугоплавкого металла, а также сложностью технологического процесса навивки спирали и приготовления и нанесения эмиттера.

Более прогрессивным является электрод газоразрядной лампы, содержащий стержень (кern) из тугоплавкого металла с надетой на него спеченной массой, представляющей собой прессованную и спеченную смесь порошков тугоплавкого металла и эмиссионных добавок [2].

Конструкция электрода обеспечивает приемлемую себестоимость технологического процесса изготовления эмиссионного материала при обеспечении хорошей электронной эмиссии.

Основной недостаток электрода – уменьшение срока службы, обусловленное ускоренным испарением эмиссионного вещества с участков спеченной массы, расположенной вблизи торца керн, обращенного к разряду.

В работе предлагается конструкция электрода, обеспечивающая повышение его срока службы при одновременном снижении его себестоимости.

Поставленная цель достигается тем, что в конструкции электрода газоразрядной лампы, содержащего kern с надетой на него в виде коаксиального цилиндра спеченной массой, представляющей собой прессованную и спеченную смесь порошков тугоплавкого металла и эмиссионных добавок, на участке спеченной массы, обращенном в сторону разряда, она представляет собой прессованный и спеченный порошок тугоплавкого металла без эмиссионных добавок, причем длина спеченной массы без эмиссионных добавок составляет от 30% до 50% общей длины спеченной части электрода.

Сущность предлагаемого технического решения заключается в следующем: известно, что повышение температуры спеченной массы на 70К приводит к увеличению скорости испарения эмиссионного вещества с ее поверхности на порядок [3].

Кинетическая энергия положительных ионов в катодный полупериод и электронов в анодный полупериод разогревает торец керн, на который горит разряд, до высокой температуры. За счет теплопередачи значительное количество тепла передается спеченной массе, служащей как резервуаром для эмиссионных добавок, так и радиатором охлаждения. При этом температура спеченной массы снижается в направлении от торца керн, на который горит разряд, к противоположному торцу. Расположенный вблизи разогретого торца керн участок спеченной массы без эмиссионных добавок экранирует от воздействия максимально высокой температуры спеченную массу с эмиссионными добавками, снижая скорость и интенсивность ее распыления, увеличивая тем самым долговечность электрода и разрядной лампы в целом.

Конструкция предлагаемого электрода приведена на рис.1. Электрод содержит стержень-кern (4) из тугоплавкого материала с надетой на него цилиндрической спеченной массой (2 и 3). Спеченная масса включает в себя два участка. Участок (3) представляет собой спеченную смесь порошков тугоплавкого металла и эмиссионных добавок, а участок (2) – спеченную массу из тугоплавкого металла. Участок (2) располагается на крайнем участке спеченной массы электрода, обращенном в сторону разряда (1). Общая длина спеченной части электрода обозначена как «Н», а участок спеченной массы без эмиссионных добавок – «h».

На рис.1 также приведены усредненные значения температур различных участков предлагаемого электрода для натриевой лампы высокого давления мощностью 250Вт.

В качестве порошка тугоплавкого металла могут применяться порошки вольфрама, молибдена, тантала, рения и порошки других металлов. В качестве эмиссионных добавок используются оксиды бария, кальция, иттрия, скандия, тория, самария, стронция, а также соединения перечисленных материалов. В частности, в конструкции электродов ламп, рабочая температура которых находится на уровне 1600К, в качестве эмиссионных добавок применяется вольфрамат типа Ba_2CaWO_6 , который обуславливает работу выхода электронов на уровне от 2,1 до 2,5 эВ.

Важным является протяженность участка спеченного порошка тугоплавкого металла без эмиссионных добавок. Границы его протяженности определены экспериментально и составляют от 30% до 50% общей протяженности спеченной массы.

При протяженности участка спеченного порошка тугоплавкого металла без эмиссионных добавок меньшей, чем 30% общей протяженности спеченной массы, электрод в значительной мере приобретает недостатки существующего спеченного электрода, т.е., электрод в целом становится недостаточно температуростойким и распыляется в процессе работы газоразрядной лампы.

При протяженности участка спеченного порошка тугоплавкого металла большей, чем 50% общей протяженности спеченной массы, электрод не обеспечивает необходимую эмиссию электронов в процессе всего срока службы газоразрядной лампы, т.к. запасов эмиссионного вещества становится мало.

Испытания изготовленных в соответствии с предлагаемым техническим решением натриевых ламп высокого давления типа ДНаТ-250 показали, что срок службы ламп увеличился с 12000 ч до 20000 ч.

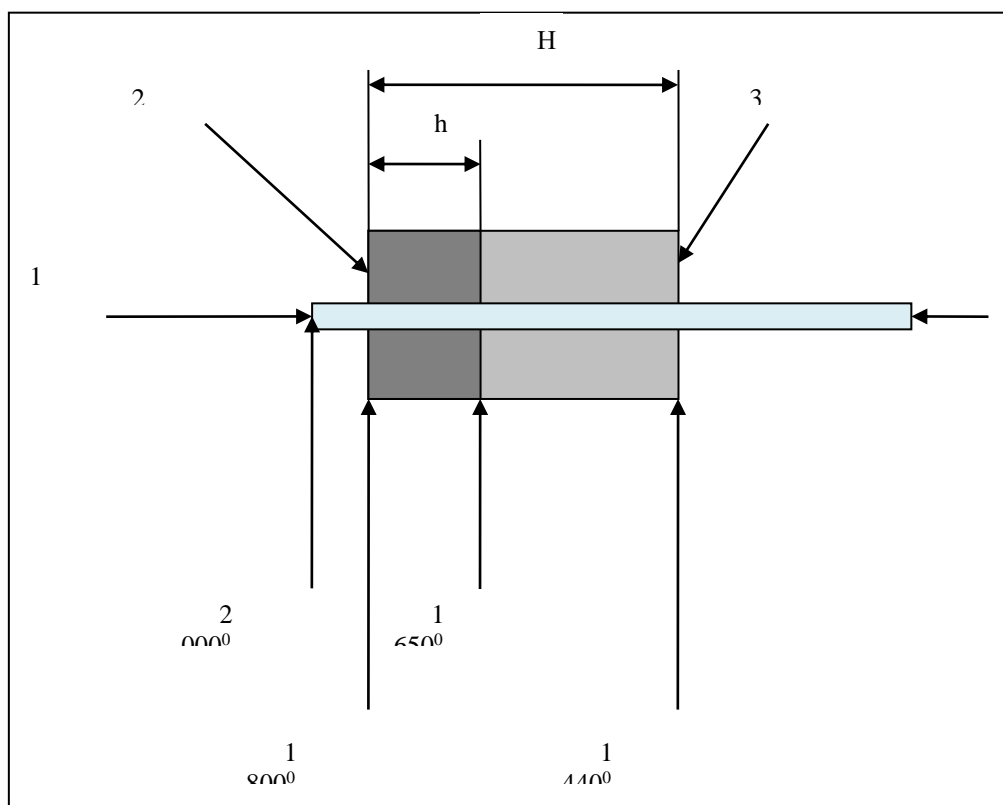


Рис. 1. Электрод газоразрядной лампы

В настоящее время натриевые лампы высокого давления (ДНаТ) являются наиболее эффективными источниками искусственного освещения. Благодаря их высокой светоотдаче, достигающей 150лм/Вт, и спектру мощностей от 50Вт до 3кВт, они применяются для освещения складских помещений, автомагистралей и карьеров, парников и теплиц.

В мировой практике доля ламп типа ДНаТ превышает половину всех источников наружного освещения и составляет почти 100% тепличного искусственного освещения. В связи с этим остается актуальным вопрос совершенствования этого типа ламп по пути увеличения их долговечности и снижения отрицательного воздействия на экологию: увеличение срока службы уменьшает количество утилизируемых ламп и, соответственно, снижает выбросы в окружающую среду продуктов их переработки.

Список литературы

[1] Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. Москва: “Энергоатомиздат”, 1991, с. 720.

[2] Решенов С.П. Катодные процессы в дуговых источниках излучения. Москва: Издательство МЭИ, 1991, с. 245.

[3] Кудинцева Г.А., Мельников А.И., Морозов А.В., Никонов Б.П. Термоэлектронные катоды. М.: Энергия, 1966, с. 347.

Чжо Зай - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kuawzay49@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

УДК 621.438

Е.Г. Липихин, Д.В. Шевелев

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ПОНИЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА НА ОБЛИК ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ МИКРОТУРБИНЫ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

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

Когенерацией называется процесс совместной выработки тепловой и электрической энергии. Когенерационные установки включают в себя, как правило, двигатель – тепловую машину, преобразующую энергию топлива в механическую работу идущую на привод электрогенератора, и теплообменный аппарат, утилизирующий тепло выхлопных газов двигателя путем нагрева воды системы отопления или горячего водоснабжения. Использование когенерации позволяет повысить коэффициент полезного использования тепла топлива $\eta_{\text{ПИТ}}$ до 90...92%, что значительно выше КПД установок по выработке электрической энергии который не превышает 36...40%.

Когенерационные установки представляют большой интерес для нужд обособленных потребителей, к которым относятся частные домохозяйства, малые торговые и производственные помещения, объекты спортивной инфраструктуры [1]. Использование газовых микротурбин (микроГТД) для привода электрогенератора в таких установках имеет ряд преимуществ, к которым, прежде всего, относятся их компактность, высокая экологичность, низкий уровень шума и вибраций, устойчивость к изменению нагрузки, надежность.

Особый интерес представляют когенерационные установки электрической мощностью 3...5 кВт (микро-ТЭЦ). В данном диапазоне изменения мощности, микроГТД может быть создан на основе отработанной технологии автомобильных турбокомпрессоров [2]. Основными недостатками микроГТД такой мощности являются высокие потребные обороты ротора, достигающие 200000 об/мин, трудности организации надежного и эффективного процесса сжигания топлива при высоком давлении в камере сгорания, низкий КПД основных элементов проточной части – компрессора и турбины. Указанных недостатков лишены микроГТД измененной очередности процессов.

Схема микро-ТЭЦ с микроГТД измененной очередности процессов представлена на Рис. 1.

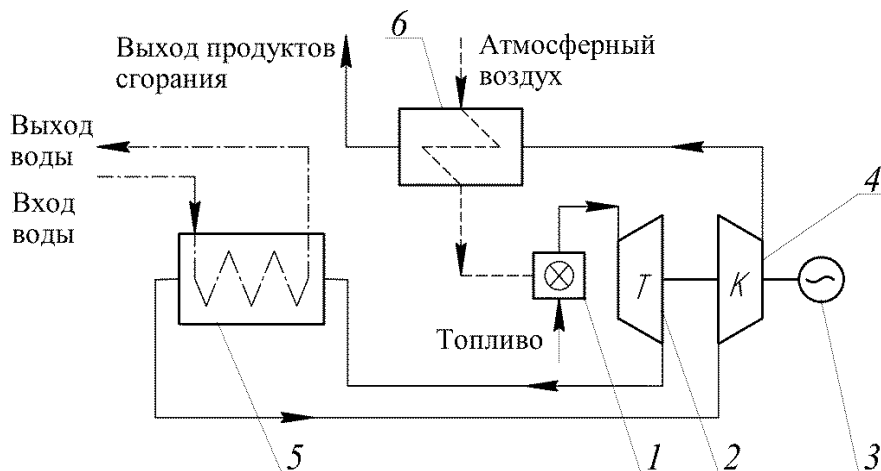


Рис.1. Когенерационная установка с микротурбиной измененной очередности процессов: 1 – атмосферная горелка; 2 – турбина; 3 – электрогенератор; 4 – компрессор; 5 – газо-водяной теплообменник; 6 –воздушный экономайзер

Когенерационная установка работает следующим образом – атмосферный воздух подогревается в экономайзере 6 продуктами сгорания, выходящими из компрессора 4, и, далее, поступает в горелку 1, в которой сжигается топливо при атмосферном давлении. Продукты сгорания из горелки поступают в турбину 2, где расширяются до давления ниже атмосферного. Турбина передает крутящий момент электрогенератору 3 и компрессору 4. Выходящие из турбины продукты сгорания поступают в газо-водяной теплообменный аппарат 5, где нагревают теплоноситель системы отопления. Далее продукты сгорания поступают в компрессор 4, где повышается их давление до атмосферного. Часть теплоты уходящих газов возвращается в цикл за счет нагрева свежего воздуха в экономайзере 6, после которого продукты сгорания выбрасываются в атмосферу.

Газовая микротурбина, в этой схеме является важным элементом, который определяет во многом параметры микро-ТЭЦ, в целом. К микроГТД, как элементу микро-ТЭЦ, предъявляются такие требования как надежность, компактность, эффективность, высокий ресурс, при этом она должна быть по возможности максимально простой по конструкции и дешевой.

Одним из ключевых вопросов при проектировании микротурбины измененной очередности процессов является выбор оптимальных значений степени понижения давления газа в турбине π_T . Данный параметр во многом определяет конструктивный облик микротурбины в целом, а так же потребный расход воздуха, число оборотов ротора и коэффициент полезного использования тепла топлива.

Проведенный в работе [3] термодинамический расчет микро-ТЭЦ с газовой микротурбиной измененной очередности процессов мощностью $N_e=3$ кВт показал работоспособность предложенной схемы. Исследовалось влияние степени понижения давления газа π_T на показатели микротурби-

ны. Было определено, что эффективный КПД микротурбины имеет максимум при $\pi_T = 2,2$. Однако, так как для микро-ТЭЦ первостепенной является тепловая мощность, а электрическая энергия является побочным продуктом, то возможно выбирать значения π_T , отличные от оптимального по КПД цикла. Например, можно руководствоваться получением минимальных габаритов проточной части, минимальным числом оборотов ротора или наибольшей тепловой мощностью.

Целью данной работы являлось определение влияния степени понижения давления газа в турбине на облик проточной части микроГТД и важнейший его кинематический показатель – частоту вращения ротора.

Для решения поставленной задачи были произведены вариантыные термогазодинамические расчеты проточной части микротурбины по средней линии тока для диапазона изменения π_T от 1,3 до 2,5. В качестве основных исходных данных были приняты: мощность микротурбины $N_e = 3$ кВт, адиабатный КПД турбины $\eta_T^* = 0,74$ и компрессора $\eta_K^* = 0,75$, которые характерны для серийных ТКР. Расход газа определялся по удельной работе установки, полученной в результате термодинамического расчета. График изменения потребного расхода газа от степени понижения давления в турбине приведен на Рис. 2.

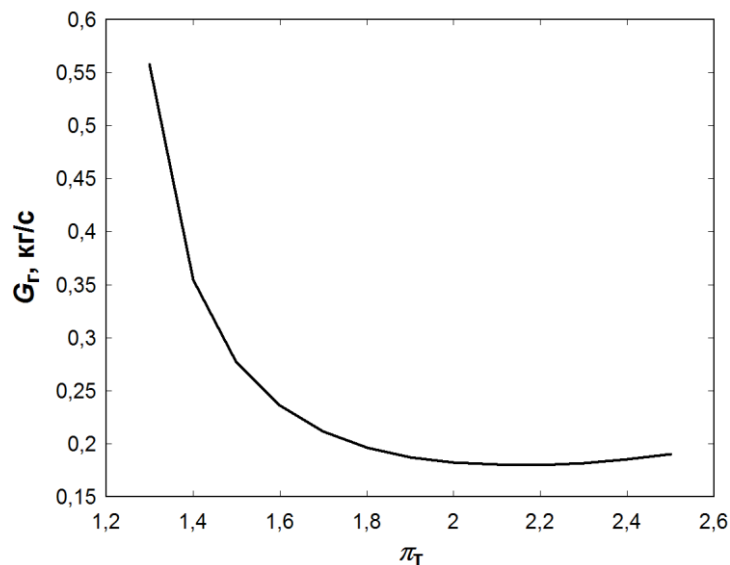


Рис. 2. Зависимость потребного расхода газа через турбину микроГТД мощностью 3 кВт от степени понижения давления

При расчете турбины дополнительно задавались термодинамические параметры: температура и давление газа на входе в турбину – $T_T^* = 950$ К и $p_T^* = 98300$ Па соответственно; геометрические параметры: степень радиальности рабочего колеса турбины $\mu = 0,5$, угол потока в абсолютном движении на входе в рабочее колесо турбины $\alpha_1 = 20^\circ$, угол потока в относительном движении на выходе из рабочего колеса турбины $\beta_2 = 25^\circ$.

Для расчета компрессора задавалась температура газа на входе – $T_{\text{вх}}^* = 343\text{К}$. Степень повышения давления компрессора $\pi_{\text{к}}$ определялась как функция степени понижения давления газа в турбине и коэффициентов характеризующих потери полного давления в газовой теплообменном аппарате и экономайзере:

$$\pi_{\text{к}} = \frac{\pi_{\text{т}}}{\sigma_{\text{гвта}} \sigma_{\text{эк}}},$$

где $\sigma_{\text{гвта}}$ – коэффициент восстановления полного давления в газо-водяном теплообменном аппарате, $\sigma_{\text{эк}}$ – коэффициент восстановления полного давления в воздушном экономайзере.

Дополнительно, для компрессора, задавались геометрические параметры: лопаточный угол на выходе из рабочего колеса $\beta_{2,л} = 90^\circ$, отсутствие предварительной закрутки воздуха на входе в рабочее колесо компрессора.

Расчет ступени турбины выполнялся по методике, изложенной в [4]. Газодинамический расчет компрессора выполнялся в соответствии с методиками [5, 6].

Результаты расчета проточной части приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Результаты газодинамического расчета турбины

№ п/п	Степень понижения давления $\pi_{\text{т}}$	Диаметр колеса на входе $D_{1\text{т}}$, мм	Диаметр колеса на выходе, $D_{2\text{т}}$, мм	Высота сопловой лопатки l_c , мм	Высота лопатки на выходе из РК l_2 , мм	Число оборотов ротора n , об/мин
1	1,3	295	227	20	79,4	16600
2	1,7	172	132	11	46,2	39500
3	2,2	160	123	9,1	43,1	50900
4	2,5	167	129	9	45	51900

Таблица 2. Результаты газодинамического расчета компрессора

№ п/п	Степень повышения давления $\pi_{\text{к}}$	Высота лопатки на входе в РК, b_1 , мм	Высота лопатки на выходе из РК b_2 , мм	Диаметр колеса на выходе, $D_{2\text{к}}$, мм	Диаметр колеса на входе, $D_{1\text{к}}$, мм
1	1,40	35	13,7	249	145
2	1,82	19,7	7,3	142	82
3	2,36	18,7	6,2	133	77
4	2,68	19,7	6,1	141	82

На Рис. 3 показаны эскизы проточной части микротурбины выполненные в одном масштабе.

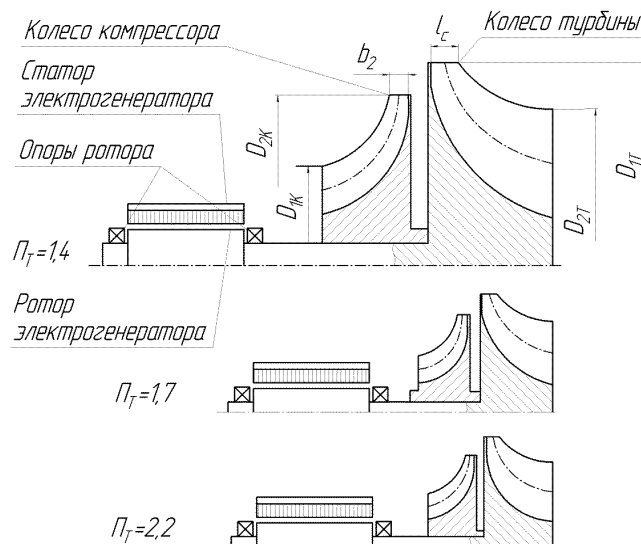


Рис. 3. Эскизы проточной части микротурбины при $\pi_T=1,3; 1,7; 2,2;$

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что степень понижения давления газа в турбине оказывает значительное влияние на размеры проточной части микротурбины. Так, например, при переходе от $\pi_T=1,3$ к $\pi_T=2,2$ диаметральный габарит микротурбины уменьшается почти в 2 раза и, соответственно, масса рабочих колес. Уменьшение массы рабочих колес благоприятно сказывается на прочностных характеристиках ротора, что особенно важно при их консольном расположении. Однако, при этом число оборотов ротора увеличивается в 3 раза – с 16600 до 50900 об/мин, уменьшая ресурс и надежность опор ротора микротурбины. Также, к отрицательным моментам следует отнести уменьшение абсолютных размеров проточной части при высоких π_T , что влечет за собой увеличение доли концевых потерь и, соответственно, снижение КПД компрессора и турбины.

С другой стороны, при низких π_T , большой потребный расход газа, увеличивая размеры проточной части, позволяет сделать процесс расширения в турбине и компрессоре более эффективным, а низкая частота вращения дает основания предполагать работу ротора в докритической области.

Следует отметить и влияние π_T на температуру газа на выходе из турбины T_T^* . При фиксированной начальной температуре газа T_T^* , T_T^* будет тем меньше, чем выше π_T , а это, при одновременно снижающемся расходе газа, снижает тепловую мощность микроТЭЦ.

Выводы:

- Степень понижения давления в турбине оказывает значительное влияние на размеры проточной части микротурбины;
- Влияние степени повышения давления на прочностные характеристики ротора неоднозначно и требует проведения прочностных расчетов: определения напряженного состояния рабочих колес и вала микротурбины, расчет критических частот;

- Малые значения π_T приводят к увеличению расхода газа и размеров проточной части микротурбины. При этом ожидается повышение эффективности элементов компрессора и турбины, из-за уменьшения относительных зазоров между ротором и статором;
- При фиксированной температуре газа перед турбиной, величина π_T оказывает влияние на температуру и давление газа на выходе из турбины, что будет сказываться на характеристиках газо-водяного теплообменника, а именно на его тепловую мощность и габариты;
- Для указанной мощности микротурбины, можно дать предварительную рекомендацию о выборе $\pi_T=1,7$, при котором достигаются приемлемые габариты проточной части, сравнительно низкая частота вращения.

Дальнейшая оптимизация параметров микротурбины, для достижения оптимальных показателей работы микро-ТЭЦ и ее габаритных размеров, должна учитывать совместную работу теплообменников и двигателя.

Пристатейный библиографический список

[1] Аметистов Е.В., Клименко А.В., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Фаворский О.Н., Федоров В.А. и др. Приоритетные направления перехода муниципальных образований на самообеспечение тепловой и электрической энергией. М.: Наука, Известия РАН, Энергетика №1, 2003г. с. 107-117.

[2] ГОСТ Р 53637-2009 Турбокомпрессоры автотракторные. Общие технические требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ., 2010.

[3] Липихин Е.Г., Шевелев Д.В., Когенерационная установка с газовой микротурбиной измененной очередности процессов // Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 24–26 ноября 2015 г. Т. 1. – Калуга: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. с. 190-194.

[4] Митрохин В. Т. Выбор параметров и расчет центростремительной турбины на стационарных и переходных режимах / В. Т. Митрохин. – М.: Машиностроение, 1974.

[5] Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М., Кузьмичев В.С. Проектный термогазодинамический расчет основных параметров авиационных лопаточных машин; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2006. с. 316.

[6] Ладощин А.М. Яковлев В.М. Расчет и проектирование центробежного компрессора ГТД. Методические указания по курсовому и дипломному проектированию под ред. Землянского А.В. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 2004, 26 с.

Липихин Евгений Геннадьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Evgeny.Lipihin@yandex.ru

Шевелев Денис Владимирович - канд. техн. наук, доцент кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

УДК 621.184.4

Е.В. Тарасов, А.А. Жинов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕЗДЕАЭРАТОРНЫХ СХЕМ ПТУ СО СМЕШИВАЮЩИМИ ПОДОГРЕВАТЕЛЯМИ

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

Основой энергетической системы России являются крупные ТЭС, ГРЭС и АЭС. Традиционно они включают в себя энергоблоки с паротурбинными установками (ПТУ), работающими по циклу Ренкина. Таким образом, повышение экономичности паротурбинных установок является важнейшей задачей. Некоторые наиболее перспективные методы повышения КПД ПТУ описаны в [1,5].

Как правило, мощные паротурбинные установки имеют развитую систему регенерации. Обычно в ее состав входят поверхностные регенеративные подогреватели высокого и низкого давления, деаэрационная установка, эжекционные системы и т.п.

Традиционно, деаэратор располагается по ходу движения питательной воды между поверхностными подогревателями низкого и высокого давления. Конструктивно он представляет из себя смешивающий теплообменник с баком-аккумулятором. Наличие деаэрационной системы в тепловой схеме ПТУ необходимо, но наличие отдельного теплообменника-деаэратора имеет определенные недостатки. Деаэратор имеет сложную и дорогую конструкцию с большой емкостью воды высокой температуры, расположен, как правило, на большой высоте по отношению к питательным насосам, имеет обширную систему трубопроводов, арматуры, отдельные органы регулирования и автоматики. Отказ от отдельного теплообменника-деаэратора существенно упростит тепловую схему.

Возможность применения бездеаэрационных схем рассматривается уже достаточно давно и является одним из перспективных способов оптимизации тепловых схем ПТУ [3]. Такие схемы исключают применение отдельного деаэратора, за счет применения контактной системы регенерации, включающей в себя смешивающие подогреватели (СП) питательной воды, которые одновременно выполняют функции деаэрации.

В смешивающем подогревателе происходит непосредственный контакт между нагреваемой питательной водой и греющим ее паром из отбора турбины. Вследствие этого существенно упрощается конструкция и стоимость их изготовления, в виду отсутствия трубчатых поверхностей нагрева. Также, с их применением, практически отсутствует недогрев основного конденсата до температуры насыщения греющего пара [2,3,4].

При реализации бездеаэрационных схем, также возможно внедрение нейтрально-кислородного водного режима (НКВР), предложенного ЦКТИ, с дозированием в тракт основного конденсата избыточного количества кислорода. При оптимальной концентрации НКВР улучшается коррозионное состояние питательного тракта, а при избыточной концентрации происходит образование защитных пленок сталей, что в свою очередь значительно подавляет коррозию.

Так как обязательной частью бездеаэрационной тепловой схемы ПТУ является наличие смешивающих подогревателей, при проектировании и внедрении систем контактной регенерации необходимо обратить основное внимание на исключение возможности попадания воды из них в проточную часть турбины. Заброс воды из подогревателя в турбину возможен вследствие его переполнения из-за нарушения баланса подвода и отвода основного конденсата и при возникновении положительного перепада давления между давлением в подогревателе и в отборе турбины в результате изменения режима работы турбины и т.п. Переполнение смешивающего подогревателя возможно также и при отказе откачивающих насосов, наличие которых необходимо за каждым подогревателем, что снижает надежность всей системы регенерации и работы паротурбинной установки в целом. Рассмотренные аспекты являются недостатками применения смешивающих подогревателей.

Для оценки эффективности применения бездеаэрационных тепловых схем были рассмотрены и рассчитаны варианты компоновки системы регенерации с СП, на примере паротурбинной установки с турбиной ПТ-40/50-8.8/1.3 производства ОАО «Калужский турбинный завод». Моделирование было произведено с помощью специализированного программного обеспечения.

Во всех рассмотренных вариантах, основным принимался конденсационный режим работы ПТУ, при этом мощность паротурбинной установки составляла 50 МВт.

Рассмотрен штатный для этой ПТУ вариант тепловой схемы 2ПВД+Д+3ПНД (Рисунок 1) исследующие варианты компоновки системы контактной регенерацией:

- 1ПВД+2СП (Рисунок 2)
- 1ПВД+3СП (Рисунок 3)
- 1ПВД+2СП+1ПНД (Рисунок 4).

Для вариантов схемы с СП проведена оптимизация по параметрам элементов.

В таблице 1 приведены результаты расчета относительного КПД по отпуску электроэнергии для традиционной и оптимизированных вариантов бездеаэрационной тепловой схемы ПТУ.

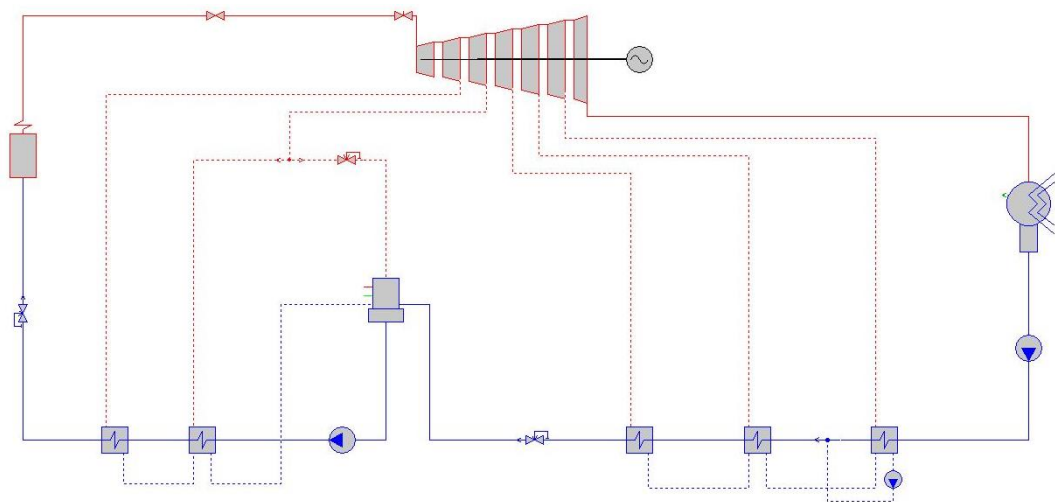


Рис. 1. Традиционная тепловая схема ПТУ с турбиной ПТ-40/50-8.8/1.3

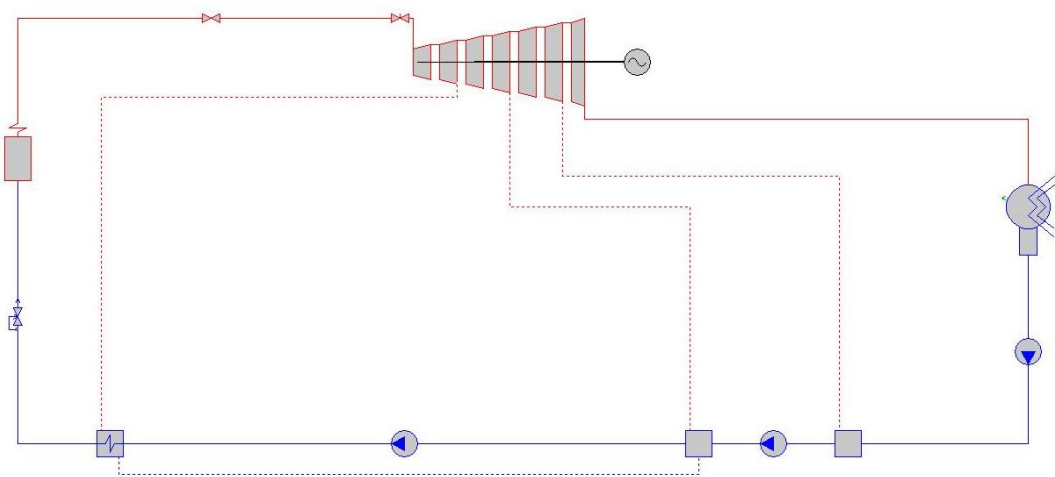


Рис. 2. Вариант бездеаэрационной тепловой схемы ПТУ с компоновкой системы регенерации 1ПВД+2СП

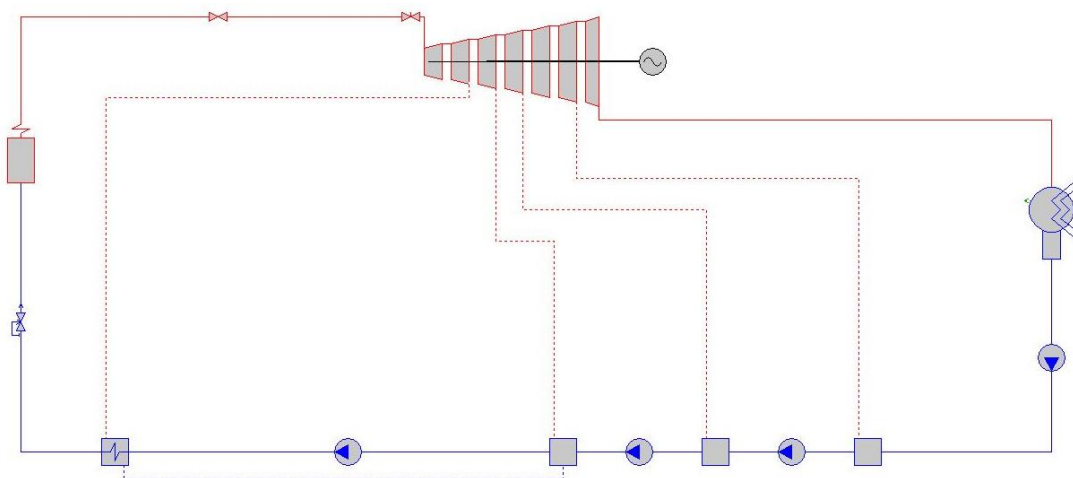


Рис. 3. Вариант бездеаэрационной тепловой схемы ПТУ с компоновкой системы регенерации 1ПВД+3СП

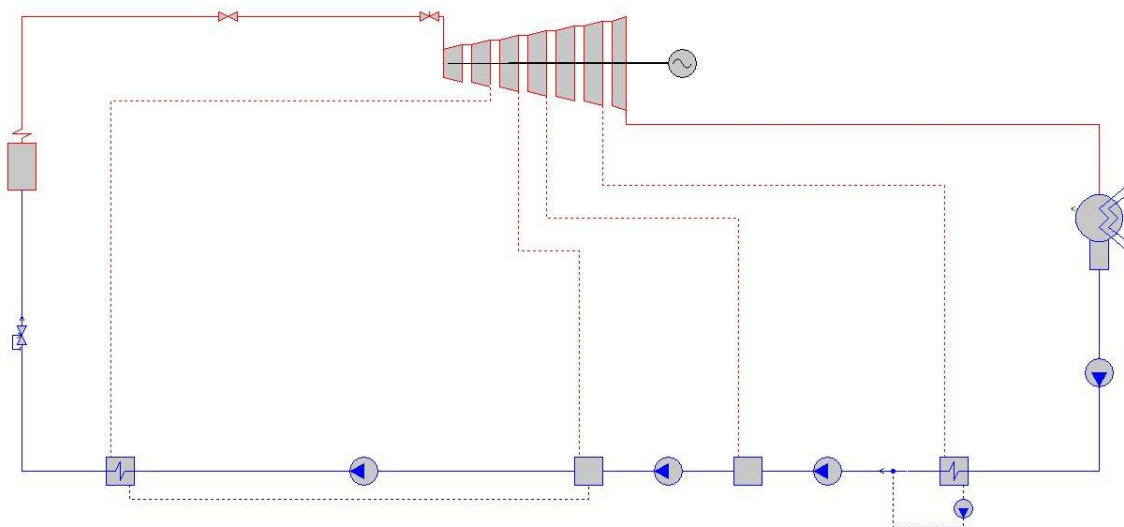


Рис. 4. Вариант бездеаэраторной тепловой схемы ПТУ с компоновкой системы регенерации 1ПВД+2СП+1ПНД

Таблица 1

Вариант тепловой схемы	$\bar{\eta}_e = \eta_e / \eta_{e0}$
2ПВД+Д+3ПНД	1
1ПВД+2СП	0,994
1ПВД+2СП+1ПНД	1,004
1ПВД+3СП	1,005

Результаты моделирования показывают, что КПД по отпуску электрической энергии у рассмотренных схем близки. Наиболее выгодной схемой, по этому критерию, является 1ПВД+3СП, а по числу элементов системы регенерации – схема 1ПВД+2СП. По сравнению с традиционной тепловой схемой, имеющей в составе системы регенерации 6 элементов, данная схема имеет всего 3.

Полученные в работе результаты показывают, что применение бездеаэраторных контактных тепловых схем паротурбинных установок существенно снижает затраты на строительство ПТУ, а также исключает необходимость отдельного теплообменника-деаэратора как элемента тепловой схемы. Применение бездеаэраторных схем исключает необходимость предпусковой деаэрации воды и, как правило, повышает общую экономичность паротурбинной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

[1] Тарасов Е.В., Жинов А.А. Перспективные способы повышения КПД паротурбинных установок // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материа-

лы всероссийской научно-технической конференции, 24-26 ноября 2015 г. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.

[2] *Мороков В.Ф.* Тепловой расчет систем контактной регенерации паровых турбин. –М.: Энергоатомиздат, 1990.–136 с.

[3] *Ефимочкин Г.И.* Бездеаэрационные схемы паротурбинных установок. –М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.

[4] *Ермолов В.Ф, Пермяков В.А., Ефимочкин Г.И., Вербицкий В.Л.* Смешивающие подогреватели паровых турбин. –М.: Энергоиздат, 1982. – 208 с.

[5] *Трухний А.Д., Макаров А.А., Клименко В.В.* Современная теплоэнергетика. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 376 с.

Тарасов Евгений Витальевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: tarasovevgeniy@outlook.com

Жинов Андрей Александрович - д-р техн. наук, зав. каф. "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru

Н.Э. Емельянов, А.К. Карышев

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО СОПЛОВОГО АППАРАТА (РСА) В СИЛОВОЙ ТУРБИНЕ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

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

Газотурбинные установки газоперекачивающих агрегатов практически не работают на расчетном режиме. Параметры рабочего процесса ГТУ (давления, температуры, расходы и т.д.) и как следствие их основные характеристики (мощность и КПД) изменяются в широких пределах при изменении внешних условий (температуры и влажности наружного воздуха, барометрического давления), и начальной температуры газа (перед турбиной).

Приводные установки для газоперекачивающих станций обладают следующими особенностями [2]:

1. Затраты энергии на нагнетание газа от одной станции до другой в основном зависят от давления перекачиваемого газа. То есть, чем выше давление, тем меньше удельные затраты на перекачку. Одна из задач регулирования таких установок состоит в поддержании на предельном уровне давления за компрессорной станцией.

2. Нагнетатели газоперекачивающих станций работают на участок газопровода относительно большой протяженности (около 150 км), который обладает большой аккумулялирующей способностью. Вследствие этого изменение расхода газа за счет потребителей вызывает плавные во времени изменения давления газа за станцией. Для компенсации таких возмущений нужно эффективно управлять частотой вращения нагнетателей, а, следовательно, и мощностью агрегатов.

3. 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 [1]. 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 [3].

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 [4]. 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 рассматривать влияние поворота лопаток в диапазоне изменения углов установки $\gamma_{уст.} = \pm 10^\circ$, что соответствует изменению площади проходного сечения $\pm 20\%$. Изменение углов установки лопаток характеризует изменение угла α_1 , что достаточно близко к изменению лопаточного угла $\alpha_{1л.}$. На Рисунке 1 представлено изменение треугольника скоростей ступени силовой турбины при повороте лопаток СА.

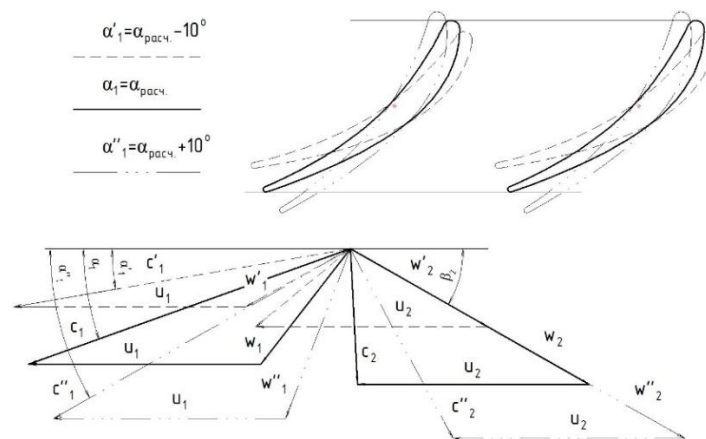


Рис. 1. Изменение треугольника скоростей турбины с РСА

При уменьшении угла выхода потока из СА ($\alpha_1 < \alpha_{1расч.}$) проходное сечение уменьшается, уменьшается и расход газа. При $\alpha_1 > \alpha_{1расч.}$ расход газа увеличивается. Описанный эффект наглядно можно проследить на Рисунке 2.

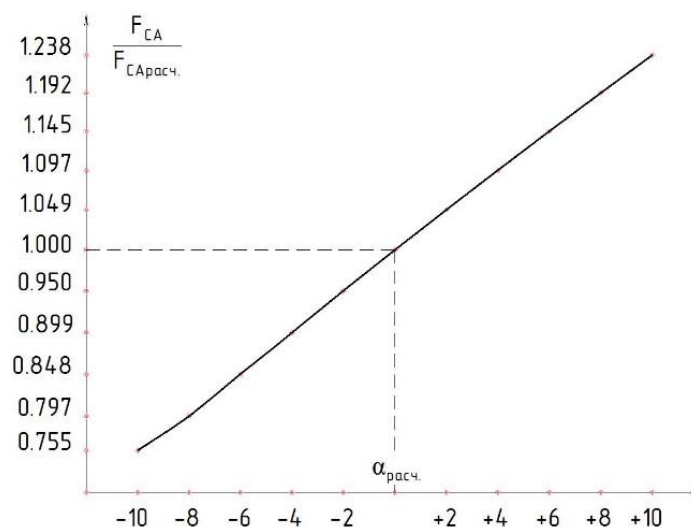


Рис. 2. Зависимость площади проходного сечения турбины от угла поворота лопаток

Когда α_1 уменьшается, окружная работа турбины L_u – возрастает. На величину L_u при фиксированной окружной скорости определяющее влияние оказывает скорость C_{1u} , которая растет при уменьшении угла α_1 . К обратному эффекту приводит увеличение α_1 . Изменение работы турбины L_T в основном следует за изменением L_u .

При проектировании силовой турбины для привода нагнетателя природного газа интересно изменение мощности с изменением угла установки сопел. Известно, что

$$N_e = L_T \cdot G_c. \quad (1)$$

Тогда отношение мощности при повернутых лопатках РСА к мощности на расчетных углах приближенно можно представить в виде

$$\frac{N_e}{N_{расч.}} = \frac{C_{1u} \cdot F_{СА}}{C_{1u расч.} \cdot F_{СА расч.}} = \frac{C_1 \cdot \cos(\alpha_1) \cdot F_{СА}}{C_1 \cdot \cos(\alpha_{1 расч.}) \cdot F_{СА расч.}} = \frac{\cos(\alpha_1)}{\cos(\alpha_{1 расч.})} \cdot \frac{F_{СА}}{F_{СА расч.}}. \quad (2)$$

Очевидно, что изменение мощности соответствует изменению расхода, который зависит от $\sin(\alpha_1)$. Некоторое отставание значений мощности от значений расхода при $\alpha_1 > \alpha_{1расч.}$ объясняется некоторым уменьшением работы. Рисунок 3 наглядно демонстрирует зависимость полезной мощности установки от изменения угла выхода потока из соплового аппарата силовой турбины.

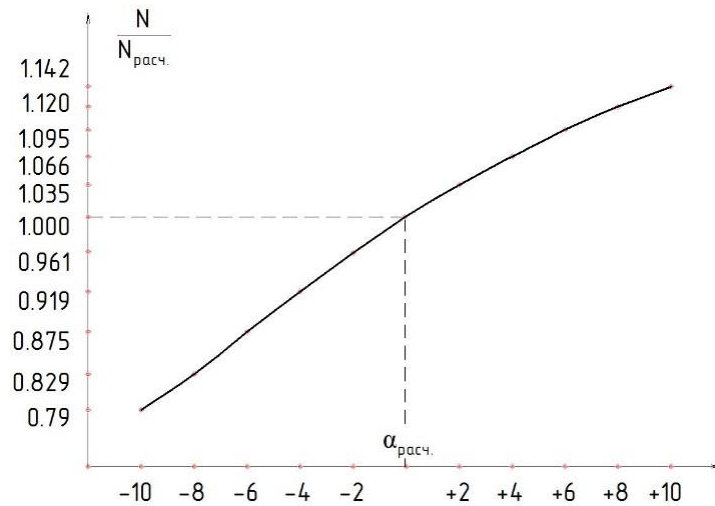


Рис. 3. Изменение мощности установки при повороте лопаток СА

В [1] приводятся результаты расчета частичных режимов установки с неподвижными и поворотными сопловыми лопатками при наличии регенерации и без нее. Для варианта с поворотными сопловыми лопатками принят закон регулирования $t_2 = const$.

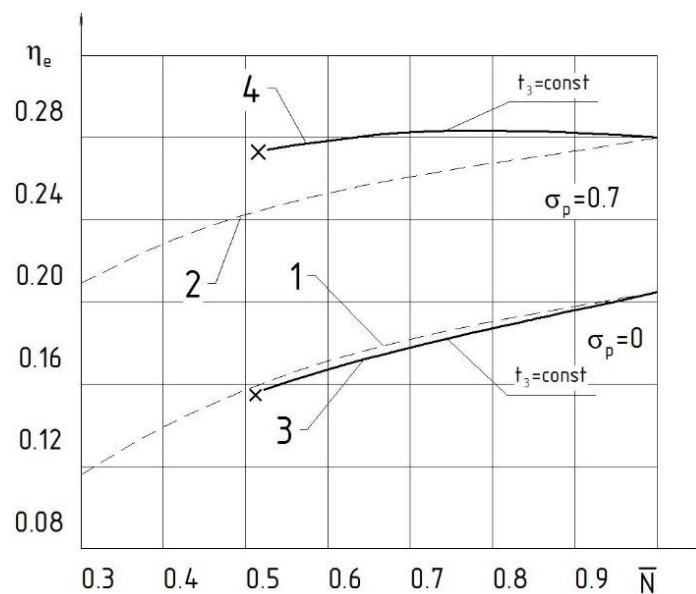


Рис. 4. Сравнение КПД установки при частичных нагрузках в случае неподвижных (кривые 1, 2) и поворотных (кривые 3, 4) сопловых лопаток (X – граница устойчивой работы компрессора)

Из Рисунка 4 видно, что в случае отсутствия регенерации применение поворотных сопловых лопаток не может дать при частичных нагрузках выигрыша в КПД. При наличии регенерации, напротив, применение РСА позволяет значительно повысить экономичность установки, притом тем больше, чем выше степень регенерации.

Выигрыш в экономичности для регенеративной ГТУ от применения регулируемого соплового аппарата силовой турбины при работе по программе $t_m=const$ особенно велик в зимнее время при работе с нагрузкой, близкой к номинальной.

В настоящее время в России не выпускается ни одного ГПА с поворотными лопатками соплового аппарата силовой турбины. Причинами этому являются сложность и недостаточная надежность самого РСА и всех элементов конструкции, необходимость непрерывного регулирования поворотными направляющими аппаратами компрессора. Создание надежного органа управления силовой турбиной требует конструкции, способной работать в условиях повышенных температур и сухого трения.

Несмотря на указанные трудности, в настоящее время ведутся научные исследования и конструктивные проработки по вопросам использования РСА в силовой турбине газоперекачивающих агрегатов.

Список использованных источников

[1] Котляр И.В. Частичные и переходные режимы работы судовых газотурбинных установок. Ленинград, Судостроение, 1966. 294 с.

[2] Ольховский Г.Г. Энергетические газотурбинные установки. Москва, Энергоатомиздат, 1985. 304с.

[3] Ревзин Б.С. Газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2002. 269 с.

[4] Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. Москва, Машиностроение, 1970. 610 с.

Емельянов Николай Эдуардович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: emelyanov92-mail@yandex.ru

Карышев Анатолий Константинович - канд. техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: k1kf@bmstu-kaluga.ru

Г.М. Калюжный, Е.А. Юрик

КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

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

Камера сгорания газотурбинного двигателя – устройство, в котором в результате сгорания топлива осуществляется подвод тепла к рабочему телу. От того, насколько удачной будет конструкция камеры сгорания, зависит ряд параметров, таких как: надежность, КПД, экономичность и экологическая безопасность двигателя, его ремонтпригодность и т.д. Камеры сгорания ГТД(газотурбинный двигатель) подразделяются:

- по конструкции: на трубчатую, трубчато-кольцевую, кольцевую
- по направлению потока воздуха и продуктов сгорания: прямоточные и противоточные;
- по способу подачи топлива в зону горения: на камеры с подачей топлива в паровой фазе и камеры с подачей топлива в жидкой фазе (в распыленном виде).

Основные преимущества и недостатки КС (камер сгорания) ГТД (газотурбинного двигателя). Основными преимуществами трубчатых (или индивидуальных) камер сгорания (на двигателе их устанавливается 7-11 штук) являются:

- относительная легкость экспериментальной доводки при конструировании; малые размеры; простота замены при повреждении.

Недостатками трубчатых камер сгорания, приведшими к их постепенному вытеснению, являются:

- необходимость для обеспечения жесткости иметь силовые элементы, соединяющие корпуса компрессора и турбины между собой;
- значительное неравномерное поле температур газа перед турбиной в окружном направлении.

Преимуществами кольцевых камер сгорания являются:

- компактность; малая масса; меньшие гидравлические потери; возможность получения лучшей окружной неравномерности поля температур; лучшие характеристики запуска (пламя быстро распространяется по всему объему); лучшие условия для обеспечения устойчивости процесса горения.

К недостаткам кольцевых камер сгорания относят:

- трудность осмотра и замены в эксплуатации; сложность производства и ремонта; малая жесткость жаровой трубы (имеется возможность коробления). [1]

Типы камер сгорания и их сравнительная оценка. Прямоточные камеры получили в современных двигателях наибольшее распространение, так как отсутствие двукратного поворота потока воздуха на 180° , харак-

терного для противоточных камер, позволяет выполнить камеры с наименьшими гидравлическими потерями и с небольшим диаметральной габаритным размером.

Недостатком камер этого типа является увеличение расстояния между турбиной и компрессором, что приводит к увеличению общей длины двигателя, а главное, к увеличению расстояния между передней и задней опорами ротора двигателя и соответствующему усложнению конструкции и увеличению веса ротора и двигателя в целом.

Противоточные камеры позволяют уменьшить длину двигателя и его ротора, так как элементы камеры могут быть расположены над турбиной и выходной трубой. В отдельных случаях камера сгорания размещается между турбиной и компрессором. При этом жаровой трубе придается такая форма, что расстояние между компрессором и турбиной сокращается почти в два раза по сравнению с двигателем, имеющим прямоточную камеру.

Противоточные камеры сгорания целесообразно применять в том случае, когда решающим является требование уменьшения веса и габаритов по длине двигателя. К числу таких двигателей нужно отнести в первую очередь газотурбинные стартеры. Требование упрощения конструкции двигателей для летательных аппаратов одноразового действия с небольшой продолжительностью полета, а также для самолетов вертикального взлета и посадки может также привести к целесообразности применения противоточных камер. [2]

Основными требованиями, предъявляемыми к камерам сгорания, являются:

- высокая полнота сгорания топлива;
- низкие потери полного давления;
- устойчивое горение в широком диапазоне по составу смеси;
- устойчивый розжиг камеры сгорания на земле и в полете;
- эмиссия вредных веществ в пределах норм ИКАО(Международная организация гражданской авиации);
- высокая надежность;
- технологическое совершенство;
- минимальные габариты и масса.

Однако даже самые современные конструкции камер сгорания далеки от совершенства. И речь идет не только о применяемых при изготовлении материалов и передовых технологий. На данном этапе развития имеется возможность существенно улучшить экономичность двигателя путем переработки или модернизации конструкции камер сгорания.

Как известно, для обеспечения устойчивого процесса горения на всех режимах работы двигателя в первичную зону подается только часть воздуха. В среднем в камере сгорания лишь 20 % воздуха, нагнетаемого компрессором, поступает в зону горения, остальные 80 % – в зону смешения и

охлаждения стенок . И это обусловлено не только жаропрочностью стенок жаровых труб. На данном этапе развития человечество располагает материалами, способными выдерживать высокие тепловые нагрузки ($T_2 \geq 2000^\circ K$) без необходимости охлаждения.

Одним из вариантов решения этой проблемы является изменение/модернизация конструкции жаровых труб путем размещения в них ряда специальных устройств, обеспечивающих торможение потока. Это могут быть как уголкового стабилизаторы, так и завихрители, которые расширяют зону обратных токов, тем самым обеспечивая наиболее оптимальный и экономичный режим горения, при котором вещества реагируют друг с другом в определенных пропорциях для полного сгорания (стехиометрическое горение). Путем применения такого конструктивного решения в сочетании с современными жаропрочными материалами, количество воздуха, отводимое на охлаждение стенок жаровых труб и в зону смешения, можно свести к минимуму, тем самым увеличив экономичность двигателя.

Помимо экономичности, немалое внимание уделяется обеспечению низкого уровня выброса вредных веществ.

Для обеспечения минимального уровня эмиссии вредных веществ при организации процесса горения в камере сгорания любого типа необходимо обеспечить следующие условия:

- качественную мелкодисперсионную ТВС с высокой однородностью;
- максимально возможную скорость реакции горения;
- температуры в зоне горения 700... 1500 °С;
- отсутствие локальных высокотемпературных зон;
- постоянного во всем диапазоне работы двигателя состава смеси в зоне горения;
- оптимальное распределение вторичного воздуха;
- оптимальный состав смеси в смесительных устройствах или в первичной зоне камеры сгорания.

К основным конструктивным схемам низкоэмиссионных камер сгорания можно отнести следующие схемы:

- двухзонные;
- изменяемой геометрии;
- многофорсуночные;
- с гомогенизацией ТВС(топливовоздушной смеси);
- каталитические.

Принцип действия всех низкоэмиссионных камер сгорания, так или иначе, основан на поддержании температуры в зоне (зонах) горения в достаточно узком интервале на всех эксплуатационных режимах двигателя. [3]

В заключении можно отметить, что конструкция КС должна быть модульной, легко диагностируемой и недорогой.

Разнообразие и противоречивость требований, предъявляемых к КС, обычно удовлетворяется опытным путем - доводкой на специальных стендах и в процессе летных испытаний.

Совершенствование и перспективы развития ГТД связаны с повышением параметров газа, ростом теплонапряженности КС, улучшением их аэродинамики, снижением токсичности. Создание конструкций новых КС невозможно без знания основных принципов организации рабочего процесса в КС.[4]

ЛИТЕРАТУРА

[1] Основные типы камер сгорания и их технико-экономические показатели. URL: [<http://www.helpiks.org/4-42184.html>] (дата обращения 20.03.16).

[2] Москаленко Л.В. Умушкин Б.П. Пособие к лабораторным занятиям по теме «КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ»/ г.Москва, 2007/[Электронный ресурс].–Режим доступа: [<http://www.storage.mstuca.ru/handle/123456789/2718>] (дата обращения 27.03.16).

[3] Бобарика И.О., Скоробогатов С.В. Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет/ Перспективы развития камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей/[Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.istu.edu/docs/science_periodical/mvestnik/2_12/Vobarika%20,%20Skorobogotov.docx] (дата обращения 27.03.16).

[4] Чигрин В.С., Белова С.Е. Конструкция камер сгорания газотурбинных двигателей . Издательство: РГАТА г.Рыбинск ,2004/[Электронный ресурс]. – Режим доступа: [<http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/951/76951/58099>] (дата обращения 27.03.16).

Калюжный Григорий Матвеевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kaluzhniygrisha@hotmail.com

Юрик Елена Алексеевна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: eaYurik@gmail.ru

П.М. Сидоров, П.М. Сидоров, Д.В. Шевелев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ РАБОЧЕГО ТЕЛА ГТУ ПРИ ПОМОЩИ OPEN SOURCE ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПРОГРАММ SCILAB

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

При выполнении термодинамического расчета тепловой схемы ГТУ, термогазодинамического расчета компрессора, турбины необходимо определение средней и истинной теплоемкости воздуха и продуктов сгорания различного состава. Так, в методиках расчета [1,2] нахождение теплоемкости рабочего тела, в зависимости от его температуры и коэффициента избытка воздуха, осуществляется с помощью графических зависимостей вида представленного на Рис. 1.

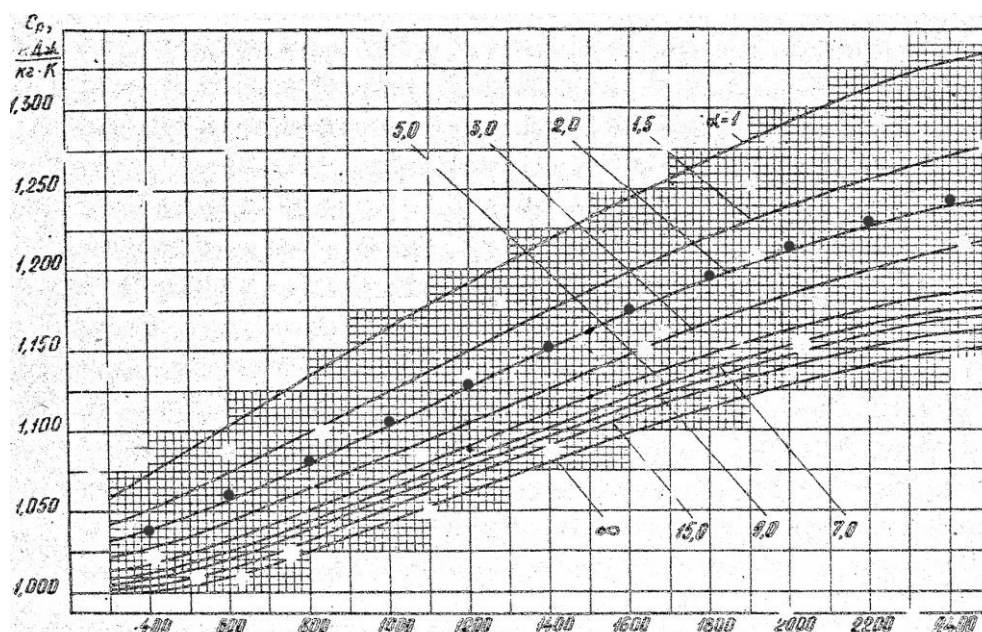


Рис. 1. Зависимость средней массовой теплоемкости продуктов сгорания Саратовского газа от температуры

Необходимость снимать значения теплоемкости с графиков усложняет выполнение указанных расчетов при помощи компьютера. Эта проблема была решена описанным ниже способом.

Значения теплоемкости при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$ («чистые» продукты сгорания) и $\alpha=\infty$ («чистый» воздух) были сняты с графиков с шагом 100 К. С помощью программы Advanced Grapher [3] была проведена аппроксимация полученных значений в полином третьей степени, т.е. получены зависимости $C_p=f(T)$. Графики этих функций для средней массовой теплоемкости приведены на Рис. 2.

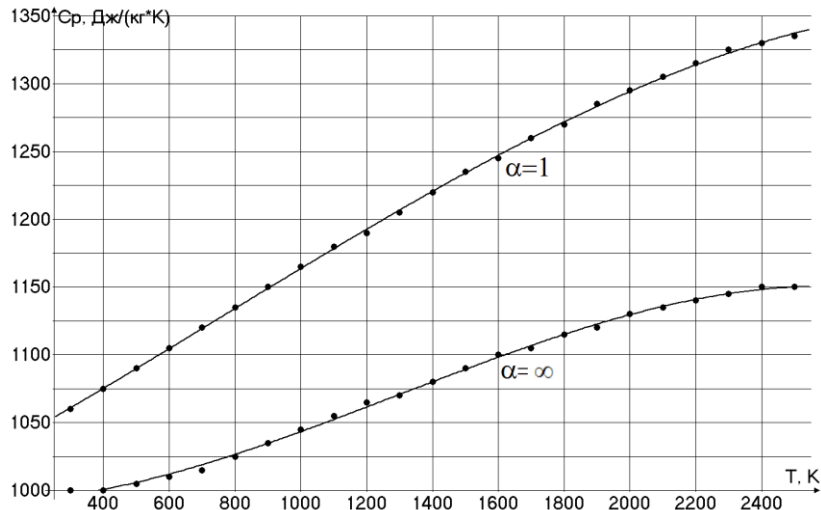


Рис. 2. Аппроксимационные зависимости средней массовой теплоемкости продуктов сгорания от температуры

Аналитические выражения полученных полиномов:

$$\alpha=1: c_p = -9,1 \cdot 10^{-9} x^3 + 2,1 \cdot 10^{-5} x^2 + 0,13x + 1019,5;$$

$$\alpha= \infty : c_p = -1,9 \cdot 10^{-8} x^3 + 7,4 \cdot 10^{-5} x^2 - 0,0029x + 991,2.$$

Горение топлива в камере сгорания ГТУ происходит с избытком воздуха, поэтому не весь воздух участвует в процессе горения. Отсюда следует, что продукты сгорания природного газа можно условно рассматривать как собственно «чистые» продукты сгорания образованные при сгорании топлива в стехиометрическом количестве воздуха, и не участвующий в горении избыточный воздух.

На основании этого запишем уравнение материального баланса для камеры сгорания:

$$G_{\text{пс}} = G_{\text{т}} + G_{\text{в}} = G_{\text{чпс}} + G_{\text{в изб}} \quad (1)$$

где $G_{\text{т}}$ – массовый расход топлива, $G_{\text{в}}$ – массовый расход воздуха, $G_{\text{пс}}$ – массовый расход продуктов сгорания, $G_{\text{чпс}}$ – массовый расход «чистых» продуктов сгорания, $G_{\text{в изб}}$ – массовый расход избыточного воздуха.

Используя известные соотношения термодинамики, теплоемкость продуктов сгорания можно определить следующим образом [4]:

$$c_{p \text{ пс}} = c_{p \text{ чпс}} g_{\text{чпс}} + c_{p \text{ в}} g_{\text{в изб}} \quad (2)$$

Удельные расходы чистых продуктов сгорания и избыточного воздуха:

$$g_{\text{чпс}} = \frac{G_{\text{чпс}}}{G_{\text{чпс}} + G_{\text{в}}}} \quad (3)$$

$$g_{\text{в}} = \frac{G_{\text{в}}}{G_{\text{чпс}} + G_{\text{в}}} \quad (4)$$

Приняв во внимание выражение коэффициента избытка воздуха $\alpha = G_{\text{в}} / (G_{\text{т}} L_0)$ и уравнение (1), выражения (3) и (4) можно привести к виду:

$$g_{\text{чпс}} = \frac{1 + L_0}{1 + \alpha L_0} \quad (3)$$

$$g_{\epsilon} = \frac{L_0(\alpha - 1)}{1 + \alpha L_0} \quad (4)$$

где L_0 – стехиометрический коэффициент, определяемый видом топлива.

Вычисление теплоемкости по формуле (2) с помощью аппроксимационных зависимостей возможно осуществлять в пакете прикладных математических программ с открытым исходным кодом Scilab [5], представляющему собой общедоступную альтернативу коммерческому пакету MATLAB со схожим языком программирования.

Листинг программного кода вычисляющего теплоемкость рабочего тела ГТУ представлен на Рис. 3.

```
T=input('Температура, К: ');
a=input(' Коэффициент избытка воздуха : ');
l0=16.34;
gps=(l0+1)/(1+l0*a);
gw=l0*(a-1)/(1+l0*a);
CpPs=-(9.1213135*10^(-9))*T^3+(2.0494723*10^(-5))*T^2+0.1329006*T+1019.4630152;
CpW=-(1.8977399*10^(-8))*T^3+(7.4016201*10^(-5))*T^2-0.0029487*T+991.242236;
CpPs=gps*CpPs+gw*CpW;
disp(CpPs,'Теплоёмкость продуктов сгорания: ');
```

Рис. 3. Фрагмент программного кода Scilab

На Рис. 1 точками показаны значения теплоемкостей при $\alpha=2$ полученных с помощью представленной методики. Видно, что эти значения полностью согласуются с графической зависимостью теплоемкости от температуры.

Таким образом, описанная методика позволяет определять теплоемкость рабочего тела ГТУ заданных параметров без использования графических зависимостей и может быть использована в программной реализации расчета тепловой схемы газотурбинных и парогазовых установок, расчета проточной части ГТУ.

ПРИСТАТЕЙНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

[1] Михальцев В.Е., Моляков В.Д. Теория и проектирование газовой турбины. – Ч.1:Теория и проектирование ступени газовой турбины.– М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. – 104 с.

[2] Лапин Ю. Д., Карышев А. К. Расчет тепловой схемы газотурбинной установки для привода нагнетателя. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1983. –24 с.

[3] <http://www.alentum.com/agrapher/>

[4] Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.:Высшая школа. 1975.

[5] <http://www.scilab.org/>

Сидоров Павел Михайлович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: SidorowPawel95@yandex.ru

Сидоров Петр Михайлович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: SidorowPM@yandex.ru

Шевелев Денис Владимирович - канд. техн. наук, доцент кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

Ф.Г. Завальный, Н.В. Гридчин

ОХЛАЖДЕНИЕ ЛОПАТОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

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

Развитие современных ГТД характеризуется быстрым (на 20-30 °С в год) увеличением температуры газов перед турбиной, которая на настоящий момент достигает у серийных двигателей 1700-1800 К. Ее рост ограничивается жаропрочностью материалов рабочих лопаток. В конструкции современных газовых турбин применяются сплавы на никелевой основе, не позволяющие заметно повысить ее рабочую температуру без сокращения срока службы. Использование монокристаллической структуры и направленной кристаллизации этих сплавов несколько увеличивает ресурс лопаток, но при условии неизменной рабочей температуры. Сплавы на основе тугоплавких элементов (ниобий, вольфрам, молибден) оказались подверженными окислению при воздействии повышенной температуры. Надеяться на создание в ближайшее время материала с более высокой жаропрочностью не приходится.

Следовательно, одним из основных путей создания высокотемпературных турбин является интенсивное охлаждение сопловых и рабочих лопаток. Системы охлаждения турбинных лопаток могут быть подразделены на замкнутые и открытые. В замкнутых системах жидкий или газообразный теплоноситель циркулирует в замкнутом контуре, включающем в себя внутренние полости лопаток и теплообменник, в котором нагретый в лопатках теплоноситель охлаждается воздухом или топливом. В открытых системах воздушного охлаждения лопаток воздух, отбираемый от компрессора, используется непосредственно для охлаждения лопаток и выпускается затем в проточную часть турбины. Такие системы благодаря своей простоте получили широкое распространение.

В зависимости от уровня начальной температуры газа и степени понижения давления в каждой ступени турбины охлаждаемыми могут быть от двух-трех до пяти-шести венцов лопаток. Чем ниже температура, тем менее сложная система охлаждения может быть реализована. По принципу действия их можно разделить на системы [1,2]:

- с внутренним конвективным охлаждением;
- с комбинированным конвективно-пленочным охлаждением;
- с пленочным (заградительным, пористым) охлаждением.

На рис. 1 представлены лопатки с внутренним конвективным охлаждением, когда воздух подается в каналы внутри лопатки и за счет конвективного теплообмена со стенкой происходит их охлаждение. Различают лопатки с продольным, продольно-петлевым и продольно-поперечным

движением охладителя. Достоинством лопаток с продольным течением теплоносителя является простота их изготовления; недостатками – низкая эффективность охлаждения и большая неравномерность температур по радиусу. Повысить интенсивность теплообмена и снизить температурную неравномерность возможно при реализации более сложной схемы течения воздуха в полости лопатки (рис. 1, б и в) и установки разнообразных турбулизаторов (стержней, перегородок и т.п). В среднем применение таких систем позволяет снизить температуру внешней поверхности по сравнению с начальной температурой потока на 120...160 °С при расходе воздуха 1,5...2 % от суммарного расхода воздуха в компрессоре.

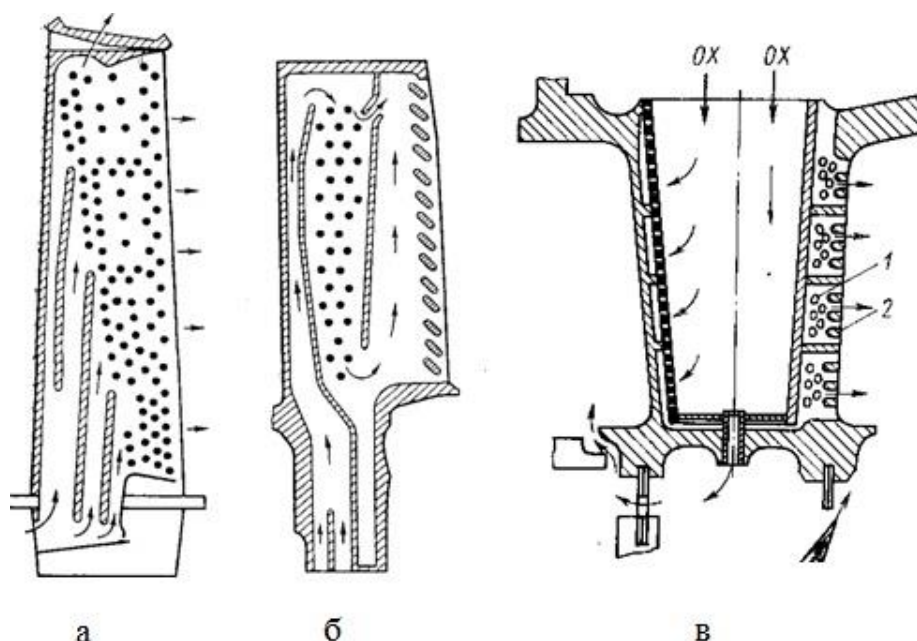


Рис. 1. Лопатки внутреннего конвективного охлаждения: с продольным (а), продольно-петлевым (б) и продольно-поперечным (в) движением охлаждающего воздуха

Поскольку перо сопловых лопаток обычно слабо закручено, то для них возможно выполнить самые сложные системы охлаждения (рис. 2), в том числе использовать лопатки с внутренним дефлектором, когда наружная поверхность СЛ является силовой оболочкой, а во внутреннюю полость вставляется профилированный дефлектор. Воздух подается во внутреннюю полость дефлектора, откуда через щели и отверстия – к внутренней поверхности оболочки. Обычно в лопатках дефлекторного типа реализуется конвективно-пленочное охлаждение, т.е. производится дополнительный выпуск части воздуха на наружную поверхность лопатки с созданием заградительной воздушной пленки (рис. 3, а).

Преимущества систем охлаждения с лопатками дефлекторного типа следующие:

- происходит сближение коэффициентов теплоотдачи по воздуху и продуктам сгорания, что позволяет иметь равномерное температурное поле по сечению лопатки;
- появляется возможность организации дифференцированного охлаждения отдельных частей лопатки по радиусу и сечению (например, входной и выходной кромки) за счет количества и места расположения отверстий в дефлекторе;
- возможность управления глубиной охлаждения лопатки;
- глубина охлаждения увеличивается до 200...250 °С.

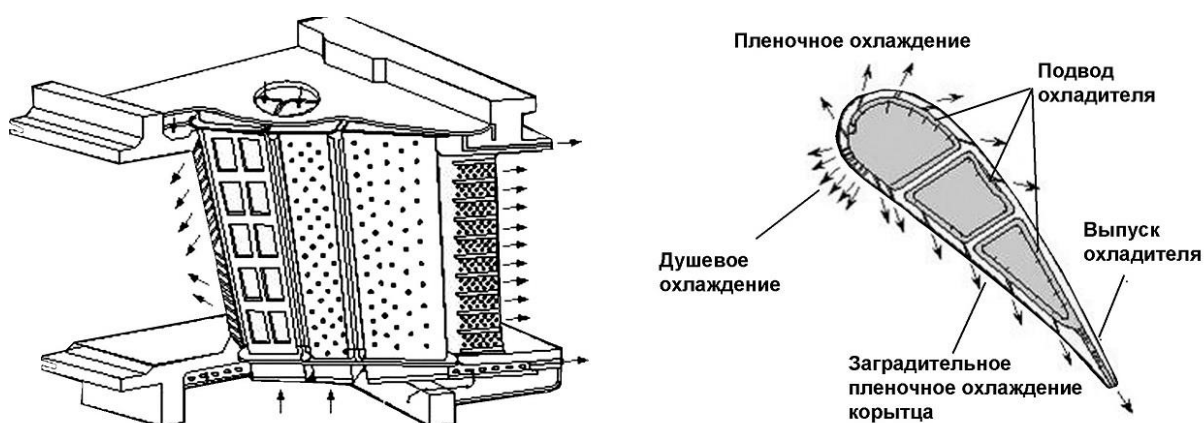


Рис. 2. Сопловая лопатки первой ступени ГТУ серии M501G/M701G фирмы Mitsubishi

Вследствие того, что воздушная пленка быстро размывается потоком газа, количество выпускных отверстий должно быть большим, а расход воздуха на охлаждение возрастает до 3%.

Наибольшей глубиной охлаждения характеризуются системы охлаждения с пористой структурой наружной оболочки (рис. 3, б). Внутри такой оболочки, изготавливаемой либо с использованием порошковой металлургии, либо в виде проволочной многослойной сетки, располагается жесткий профилированный сердечник, образующий с оболочкой большое число продольных каналов, по которым может осуществляться подача (в том числе, дифференцированная) воздуха. Охладитель через пористую структуру выдувается в пограничный слой по всему контуру на поверхности лопатки, снижая ее температуру. Дополнительными сложностями при реализации пористого охлаждения являются: повышенные требования к чистоте охладителя и продуктов сгорания; неотработанная технология получения материала оболочки. Кроме того, наблюдается значительный рост профильных потерь, вследствие повышенной шероховатости поверхности лопаток. Поэтому на практике такие лопатки применения не нашли.

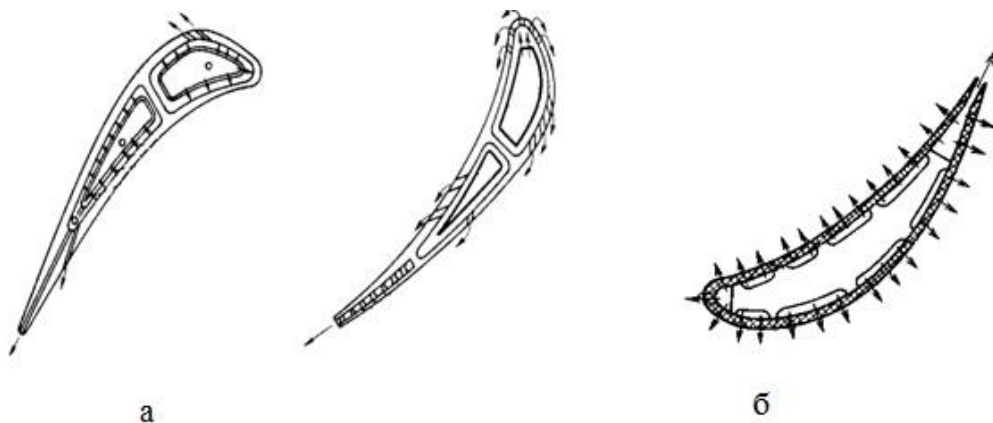


Рис. 3. Сопловые лопатки с системой открытого воздушного охлаждения:
 а – дефлекторного типа; б – с пористым охлаждением

Охлаждение рабочих лопаток представляет собой более сложную задачу, нежели сопловых, поскольку: на РЛ дополнительно действуют центробежные силы, значит – они более нагружены; к периферии лопатки происходит значительное уменьшение площади поперечного сечения профиля; из-за вращения ротора возникают дополнительные сложности, связанные с герметичным подводом теплоносителя к охлаждаемой детали. Однако по характеру теплообмена и способу его реализации системы охлаждения СЛ и РЛ схожи.

На рисунке 4 представлена сравнительная характеристика различных систем воздушного охлаждения [1].

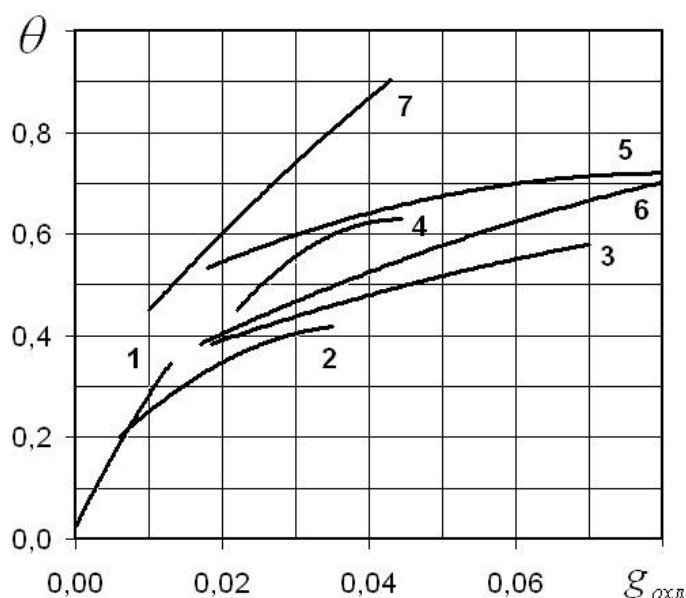


Рис. 4. Сравнительная характеристика различных систем воздушного охлаждения: 1 – прямые радиальные каналы; 2 – лопатка дефлекторного типа; 3 – продольно-петлевое движение воздуха; 4 – конвективно-пленочное охлаждение; 5, 6, 7 – проникающее (пористое) охлаждение

На рисунке: θ - это относительная глубина охлаждения лопатки, характеризующая эффективность системы охлаждения; $g_{\text{охл}}$ - относительное количество охлаждающего воздуха.

Осуществление охлаждения турбины является дорогостоящей вынужденной мерой, приводящей не только к усложнению ее конструкции, но и к затратам энергии на функционирование системы. Использование жаропрочных материалов и повышение эффективности процесса охлаждения лопаток способствуют уменьшению потребного расхода воздуха для охлаждения турбины. Но есть и конструктивные пути снижения этого расхода:

1. Охлаждение воздуха, отбираемого из компрессора, может быть произведено в специальном теплообменнике, устанавливаемом в наружном контуре. Такое конструктивное решение реализуется в конструкции авиационного турбореактивного двигателя АЛ-31Ф. Поскольку величина температуры воздуха в наружном контуре ТРДД на несколько сотен градусов меньше чем за компрессором, то в таких теплообменниках удается понизить температуру отбираемого воздуха на 100...150 К. Предпочтение отдают теплообменникам трубчатого типа, состоящим из множества трубок, равномерно расположенных по окружности. При этом к каждой лопатке должна быть предусмотрена своя трубка для подвода воздуха.

2. Охлаждение воздуха, отбираемого из компрессора путем впрыска в него воды. Снижение температуры воздуха при впрыске воды происходит за счет ее испарения (у воды высокая теплоемкость и скрытая теплота парообразования). Воздух можно охладить не менее чем на 25...30 °С на каждый процент впрыскиваемой воды относительно расхода охлаждающего воздуха [3].

3. Теплозащитные покрытия, наносимые толщиной от 30 до 100 мкм на поверхность лопаток, позволяют повысить ресурс их работы и дают возможность повысить жаростойкость лопаток.

Список литературы

[1] Особенности конструкции узлов и систем авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. пособие / А.Е. Трянов.- Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 202 с.

[2] Лукачев В.П., Данильченко В.П., Резник В.Е. Выбор параметров и инженерные основы проектирования систем охлаждения высокотемпературных турбин авиационных ГТД. – Куйбышев: КуАИ, 1983 г. – 120 с.

[3] Гридчин Н.В., Землянский А.В., Жинов А.А. Исследование испарительного охлаждения рабочего тела в проточной части когенерационной газотурбинной установки. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, №1, с. 81-87.

Завальный Федор Геннадьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fedor.zavalnyj1995@gmail.com

Гридчин Николай Викторович - старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gridchin2610@gmail.com

А.В. Няшин, Е.А. Юрик

ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

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

В последнее время арктической зоне уделяется повышенное внимание. Российское военное ведомство определило тактико-технические требования к перспективной БМП (боевая машина пехоты), для оснащения мотострелковых бригад в арктической зоне. Перспективная БМП пока известна под шифром опытно-конструкторской работы «Рыцарь».

Боевая машина пехоты, БМП — широкий класс бронированных боевых машин, основным назначением которых является транспортировка личного состава к месту выполнения поставленной боевой задачи, повышение его мобильности, вооруженности и защищенности на поле боя в условиях применения ядерного оружия и совместных действий с танками в бою. Отсюда следуют требования к БМП- высокой маневренности, скорость, но при этом достаточная бронированность и вооружение. А самое главное требование к двигателю БМП- работа, в условиях низких температур. [1]

Опыты показали, что при таких требованиях лучше всего себя показывает газотурбинный двигатель.

В газотурбинном двигателе продукты сгорания топлива вращают турбину, а не поршень, что увеличивает мощность, снижает шумность и вибрацию, а заодно повышает расход топлива из-за низкого по сравнению с поршневыми двигателями коэффициента полезного действия. Но высокий расход топлива таких двигателей может быть компенсирован применением электрической трансмиссии.

Газотурбинными двигателями оснащаются отечественные танки Т-80. Т-80 - основной боевой танк, производившийся в СССР. История создания танка Т-80 началась в июле 1967 года с совещания у секретаря ЦК КПСС Дмитрия Федоровича Устинова, на котором было принято решение о разработке для танка Т-64 газотурбинной силовой установки. Двигатель мощностью 1000 л.с. должен был обеспечивать запас хода по шоссе не менее 450 км при гарантийном сроке работы – 500 ч. Причина принятия такого решения, а также создания резервной силовой установки с дизельным двигателем 8-46 заключалась в том, что двухтактный двигатель танка 64 работал очень ненадежно. Кроме того, среди военного руководства существовало мнение, что применение газотурбинный двигатель в танках позволит существенно поднять боевые и эксплуатационные характеристики, в том числе средние скорости движения и боеготовность (особенно в зимнее время), а также повысить энерговоору-

женность танка. Кроме того, применение газотурбинного двигателя, не требовавшего разогрева перед запуском, должно было повысить боеготовность танка в зимних условиях и сократить время на его подготовку к выходу до 2–3 мин при -18°C и до 25–32 мин – при более низких (до -45°C) температурах. [2]

В 1974 – 1975 годах в Приволжском военном округе проводилась опытная войсковая эксплуатация батальона танков в объеме 10 – 11 тыс. км. В ее начале имел место массовый выход из строя газотурбинного двигателя, в основном из-за разрушения третьей опоры турбокомпрессора. [3] Были приняты срочные меры по устранению этого недостатка и уже к 15 декабря 1974 года в батальон поступили 10 доработанных двигателей так называемой 8-й серии. В связи с этим программу опытной войсковой эксплуатации уточнили и для 10 танков с усовершенствованными двигателями добавили этап испытаний в условиях лесовой запыленности воздуха в Туркестанском военном округе.

Машины там заправлялись как авиационным керосином, так и дизельным топливом. Правда, расход топлива на 100 км пути при движении колонны по снежной целине не обеспечивал суточный переход танков в 300 – 400 км без дозаправки. Не обеспечивалась и безотказная работа двигателей в пределах гарантийного срока службы.

Зато боеготовность объекта при низких температурах в 1,5 – 2 раза превышала таковую у танков с дизельными двигателями. Он обладал высокой маневренностью, был способен во взаимодействии с БМП стремительно выдвигаться к переднему краю со скоростью 20 – 30 км/ч и более, атаковать противника, находясь меньшее время под воздействием его огневых средств, и обеспечивать ведение стрельбы на скоростях движения 20 – 25 км/ч.

В зависимости от дорожных и климатических условий средняя скорость движения находилась в пределах 18 – 32 км/ч (тактическая) и 20 – 40 км/ч (техническая). И хотя расход топлива на 100 км составлял 453 – 838 л; расход масла практически отсутствовал.

6 августа 1976 года, вскоре после назначения Д.Ф.Устинова министром обороны, объект 219 приняли на вооружение под индексом Т-80. «Восьмидесятка» стала первым в мире серийным танком с газотурбинным двигателем (серийное производство танка М1 «Абрамс» началось в 1980 году).

Но для БМП такие двигатели просто не подходят, из-за их габаритов. БМП меньше размерами и легче танков, много места под двигатель и трансмиссию выделить нельзя, так как основное внимание уделяется отделению для перевозки личного состава. У калужских конструкторов есть определенные успехи, разглашать которые рано. [4]

Известно, что базовый двигатель уже готов, но мощность ниже проектной. Для 20-тонного «Рыцаря» необходим мотор как минимум 400 л.с., согласно отечественному нормативу 22 л.с. на тонну веса. В Калуге обе-

щают создать двигатель в ближайшие годы, и ему найдется применение и в гражданской промышленности.

У газотурбинных двигателей есть достаточно весомый недостаток. «Рыцарь» со своей электрической трансмиссией, генератором, электродвигателями, турбиной является очень сложной в эксплуатации машиной. Отсюда может возникнуть вопрос: «Кто и где подготовит специалистов для нее, как ремонтировать в полевых условиях?». На Т-80 турбинами занимаются специальные заводские бригады и с «Рыцарем» будет даже ситуация. В этом плане газотурбинный двигатель заметно проигрывает дизельному. Если машина на дизеле будет обслуживаться как положено, то она легко запускается в любой мороз.

Но не смотря на этот минус, все же газотурбинный двигатель выглядит предпочтительней. В поршневых бензиновых и дизельных двигателях при температурах ниже минус 10 начинают замерзать расходные жидкости. При минус 40 они работают нестабильно. [5]

Второй довод: приполярный регион слабо заселен, между военными базами и населенными пунктами большие расстояния. Боевые машины должны быть более автономными, чем в южных широтах, со всеми признаками «дома на гусеницах» с просторным десантным отделением. Одновременно необходимо учитывать возросшую мощь современных противотанковых средства, а значит, машина должна иметь усиленное бронирование и активные системы защиты.

Повышение интереса Министерства обороны России к Арктике неслучайно. Данный регион имеет для России стратегическое значение. Здесь находятся огромные природные богатства, от разумного использования которых зависит будущее всего человечества. Согласно имеющимся прогнозам в Арктике находится порядка 90 млрд. баррелей нефти, практически 47,3 трлн. кубометров природного газа и 44 млрд. баррелей газового конденсата. По оценкам экспертов это составляет порядка 25% от неразведанных запасов углеводородного топлива на планете. Поэтому БМП с газотурбинным двигателем является перспективным при работе в условиях низких температур.

ЛИТЕРАТУРА

[1] БМП "Рыцарь" для Арктики / [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://pro-tank.ru/blog/977-infantry-fighting-vehicle-rytsar-for-arctic> (дата обращения: 17.01.13).

[2] Газотурбинная БМП "Рыцарь" для Арктики / [Электронный ресурс]. – Режим доступа:http://gurkhan.blogspot.ru/2013/01/blog-post_7875.html(дата обращения: 16.01.13).

[3] Тракторные заводы» пообещали к весне 2016 года БМП с электротрансмиссией/ [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<https://lenta.ru/news/2015/12/26/bmp/>(дата обращения: 26.12.15).

[4] Россия создаст боевые машины пехоты для Арктики/ [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<https://lenta.ru/news/2013/01/16/polar/>(дата обращения: 16.01.13).

[5] В Арктике появится БМП «Рыцарь» с газотурбинным двигателем/ [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://topwar.ru/23113-v-arktike-rovavitsya-bmp-rycar-s-gazoturbinnym-dvigatелеm.html>(дата обращения: 17.01.13).

Няшин Александр Владимирович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nyashin1996@mail.ru

Юрик Елена Алексеевна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ea Yuri k@gmail.ru

Я.В. Афанасов, Н.В. Гридчин

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ГТД ПУТЕМ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

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

Основная особенность газотурбинных установок – интенсивное охлаждение проточной части турбины с целью максимального повышения начальной температуры газа. Для охлаждения газовых турбин обычно используется цикловой воздух ГТУ, который отбирается после компрессора или из его проточной части. Такие системы отличаются относительной простотой, но отборы воздуха на охлаждение отрицательно сказываются на показателях ГТУ. Исследования показывают, что отбор 1% воздуха после компрессора на охлаждение турбины уменьшает полезную работу ГТУ на 1,3...1,5 % . В случае отбора 12...14 % воздуха (при температуре газа 1400...1500 К) потери составят 18...20 % . Отбор 1 % воздуха после компрессора на 0,4...0,6% повышает расход топлива, что составит почти 10 % при начальной температуре газа 1400...1500 К. Эти цифры приводят к выводу, что при температуре газа на уровне 1500 К рост начальной температуры вызывает лишь незначительное повышение термической эффективности ГТУ, имеющих воздушное охлаждение турбины [1,2].

Осуществление охлаждения турбины является дорогостоящей вынужденной мерой, приводящей не только к усложнению ее конструкции, но и к затратам энергии на функционирование системы. Использование жаропрочных материалов и повышение эффективности процесса охлаждения лопаток способствуют уменьшению потребного расхода воздуха для охлаждения турбины. Но есть и конструктивные пути снижения этого расхода:

1. Охлаждение воздуха, отбираемого из компрессора, может быть произведено в специальном теплообменнике, устанавливаемом в наружном контуре. Такое конструктивное решение реализуется в конструкции авиационного турбореактивного двигателя АЛ-31Ф и разработанного на его базе стационарного двигателя АЛ-31СТ (рисунок 1). Поскольку величина температуры воздуха в наружном контуре ТРДД на несколько сотен градусов меньше чем за компрессором, то в таких теплообменниках удастся понизить температуру отбираемого воздуха на 100...150К. Предпочтение отдают теплообменникам трубчатого типа, состоящим из множества трубок, равномерно расположенных по окружности. При этом к каждой лопатке должна быть предусмотрена своя трубка для подвода воздуха.

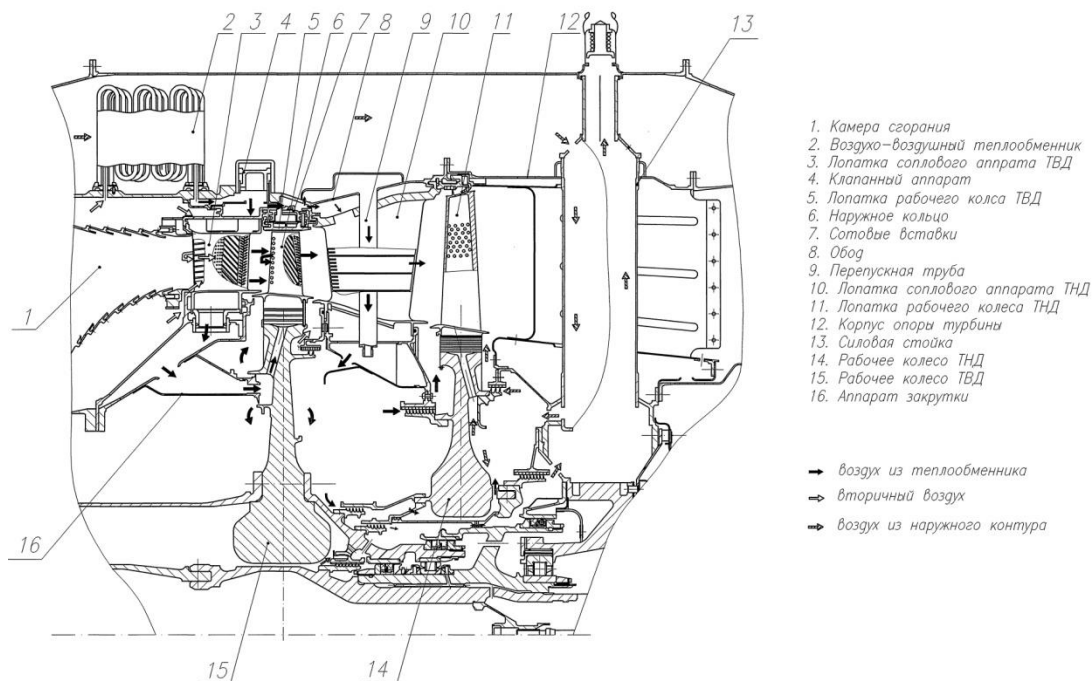


Рис. 1. Схема охлаждения турбины АЛ-31Ф (АЛ-31СТ)

2. Испарительное охлаждение воздуха, отбираемого из компрессора путем впрыска в него воды. Снижение температуры воздуха при впрыске воды происходит за счет ее испарения (у воды высокая теплоемкость и скрытая теплота парообразования). Воздух можно охладить не менее чем на 25...30 °С на каждый процент впрыскиваемой воды относительно расхода охлаждающего воздуха [3].

Впрыск воды в поток воздуха, подаваемого в систему охлаждения газовой турбины, осуществляется с целью интенсификации теплоотдачи к воздуху от охлаждаемых элементов турбины: при впрыске происходит, во-первых, испарение жидкости и снижение благодаря этому температуры охлаждающего воздуха; во-вторых, турбулизация потока частицами впрыскиваемой жидкости; в-третьих, увеличение массового расхода охлаждающего воздуха.

Впрыск воды позволяет в широких пределах изменять значение исходной относительной глубины охлаждения лопатки [3,4]:

$$\theta_{\text{исх}} = \frac{T_{\Gamma}^* - T_{\text{л}}}{T_{\Gamma}^* - T_{\text{охл}}^*},$$

где T_{Γ}^* – температура торможения газа, омывающего лопатку; $T_{\text{л}}$ – температура лопатки; $T_{\text{охл}}^*$ – начальная температура охлаждающего воздуха.

Наряду с общепринятым понятием глубины охлаждения лопаток, можно использовать также понятие эквивалентной глубины охлаждения $\theta_{\text{экр}}$, которое удобно применять для сравнения одних и тех же конструкций лопаток в составе различных систем охлаждения:

$$\theta_{\text{экр}} = \theta_{\text{исх}} \cdot \left[1 + \frac{|\Delta t_{0,01}| \cdot g_{\text{вод}}}{T_{\Gamma}^* - T_{\text{охл}}^*} \right],$$

где $|\Delta t_{0,01}|$ – понижение температуры смеси при впрыске 1% воды в охлаждающий воздух с исходной температурой $T_{\text{охл}}^*$; $g_{\text{вод}}$ – расход впрыскиваемой воды, отнесенный к расходу охлаждающего воздуха.

Выполненные расчеты (рисунок 2) показали, что впрыск 1 гр_{вод}/кг_{возд} охлаждает воздух на 1,5...3 градуса (в зависимости от параметров воды и охлаждающего воздуха).

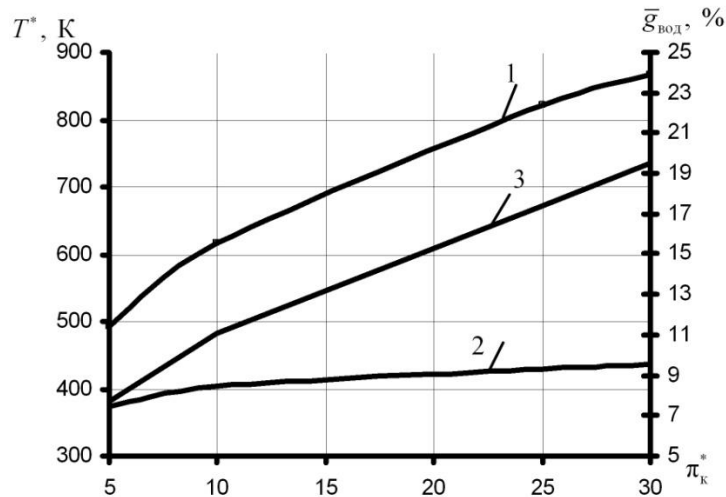


Рис. 2. Зависимость температуры охлаждающего воздуха от степени повышения давления в компрессоре: 1 - температура охлаждающего воздуха ГТУ простого цикла; 2 - температура охлаждающего воздуха при впрыске воды в систему охлаждения; 3 – относительный расход воды, впрыскиваемой в охлаждающий воздух

Подача воды в охлаждающий воздух позволяет в широких пределах изменять значение исходной глубины охлаждения (рисунок 3). Например, для исходной относительной глубины охлаждения $\theta_{\text{исх}} = 0,45$ при относительном расходе впрыскиваемой воды $g = 0 \dots 0,10$ значение $\theta_{\text{эkv}}$ возрастает от 0,45 до 0,625. Такая глубина охлаждения обеспечивает возможность повышения температуры газа перед турбиной на 150...200 К при той же степени повышения давления в цикле, напряжении в рабочих лопатках и ресурсе.

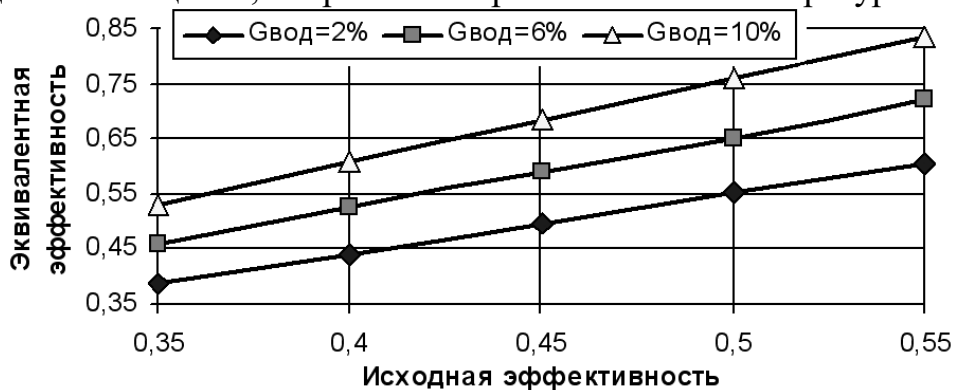


Рис. 3. Повышение эффективности охлаждения лопатки турбины в результате впрыска воды в охлаждающий воздух

Снижение температуры лопатки при впрыске воды в количестве до 10% от расхода охлаждающего воздуха составляет 135...150 К в зависимости от исходной эффективности охлаждения $\theta_{исх}$, что позволит снизить расход отбираемого воздуха в систему охлаждения на 50% при неизменном ресурсе.

Для оценки эффективности внедрения испарительного охлаждения в системе охлаждения газотурбинного двигателя, проведен сравнительный анализ тепловой схемы газотурбинной установки для привода нагнетателя природного газа АЛ-31СТ с воздухо-воздушным теплообменным аппаратом (ВВТ) с установкой на базе двигателя АЛ-31СТ с альтернативной схемой установки на базе двигателя АЛ-31СТ с применением впрыска воды в охлаждающий воздух.

При расчете впрыск воды в охлаждающий воздух производился до состояния насыщения. В случае с впрыском воды расход охлаждающего воздуха изменялся эквивалентно изменению глубины охлаждения, чтобы обеспечить равный ресурс и температуру материала лопаток относительно исходной схемы.

Результаты сравнительного анализа представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета

Параметр	Тепловая схема	
	АЛ-31СТ с воздухо-воздушным теплообменным аппаратом	АЛ-31СТ с впрыском воды в охлаждающий воздух
Мощность на валу силовой турбины N_e , кВт	16013	17526
Эффективный КПД, %	37,11	37,32
Температура воздуха, отбираемого за КВД, К	760	760
Температура охлаждающего воздуха $T_{охл}^*$, К	615,6	419

Таким образом, охлаждение воздуха, отбираемого за компрессором путем впрыска в него воды позволит значительно повысить эффективность охлаждения элементов высокотемпературных газотурбинных двигателей. Это делает такую схему охлаждения конкурентоспособной на фоне использования воздухо-воздушных теплообменных аппаратов в системе охлаждения ГТД. Однако, необходимы даль-

нейшие исследования вопросов влияния изменения свойств хладагента на коэффициенты теплоотдачи охлаждаемых лопаток, а также влияние данной системы на структуру потока обтекающего лопатку, то есть на ее аэродинамические качества.

Список литературы

[1] Особенности конструкции узлов и систем авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. пособие / А.Е. Трянов.- Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 202 с.

[2] Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок: Учебник для вузов / В.Л. Иванов, А.И. Леонтьев, Э.А. Манушин, М.И. Осипов; под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 592 с.

[3] Лукачев В.П., Данильченко В.П., Резник В.Е. Выбор параметров и инженерные основы проектирования систем охлаждения высокотемпературных турбин авиационных ГТД. – Куйбышев: КуАИ, 1983 г. – 120 с.

[4] Гридчин Н.В., Землянский А.В., Жинов А.А. Исследование испарительного охлаждения рабочего тела в проточной части когенерационной газотурбинной установки. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2012, №1, с. 81-87.

Афанасов Ян Валерьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: Хонсу@yandex.ru

Гридчин Николай Викторович - старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gridchin2610@gmail.com

УДК 629.7.021

Е.В.Тарасов

ПРИМЕНЕНИЕ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ОРБИТАЛЬНОГО КОРАБЛЯ МНОГОРАЗОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

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

Освоение космоса является перспективной задачей современного человечества. Во все времена развития космонавтики перед конструкторами стояла проблема выведения грузов в орбитальное пространство Земли. Самой известной ракетой-носителем в России, разработанной еще в 1965 году, является «Протон-М», который используется и поныне для выведения различных грузов на орбиту.

15 ноября 1988 года состоялся уникальный, и, единственный в истории СССР и России, запуск многоразовой космической системы «Энергия-Буран» (Рисунок 1), в состав которой входил орбитальный корабль многоразового использования «Буран» (Изделие 11Ф351К1). Грузоподъемность орбитального корабля, при выведении груза на орбиту, составляет 30 тн, а при возвращении 15 тн. Главной особенностью «Бурана», является его многоразовое использование[1].

Разработка орбитального корабля началась в 1976 году (Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР №132-51). Генеральный конструктор - Доктор технических наук, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской и Сталинских премий, Глеб Евгеньевич Лозинский (НПО «Молния») [2].



Рис. 1. Многоразовая космическая система «Энергия-Буран»

В ходе конструирования на первых этапах предполагалось использование в изделии 11Ф35 турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой (ТРДДФ) марки АЛ-31Ф, в количестве двух единиц, со стендовой тягой 12500 кГс на режиме «полный форсаж». Однако в последствии от конфигурации с воздушно-реактивными двигательными установками отказались, но заместитель Главного конструктора НПО «Энергия» И.Н. Садовский не исключил их появления вновь. На рисунке 2 представлена конфигурация орбитального корабля, совершившего полет в космос 15 ноября 1988 года.



Рис. 2. Конфигурация орбитального корабля «Буран» совершившего полет в космос 15 ноября 1988 года

Применение ТРДД и ТРДДФ было реализовано на летающем самолете-аналоге БТС-002 ОК-ГЛИ (Большой Транспортный Самолет – Орбитальный Корабль для Горизонтальных Летных Испытаний, рисунок 3), построенном в 1984 году. Самолет-аналог был предназначен для отработки посадки на взлетно-посадочную полосу в ручном и автоматическом режимах управления, а также проверки и подтверждения аэродинамических и других характеристик планера и систем орбитального корабля во взаимодействии с системой управления на участке захода на посадку и посадки. На рисунке 4 показано размещение ТРДД и ТРДДФ на самолете-аналоге.



Рис. 3. Самолет-аналог БТС-002 ОК-ГЛИ

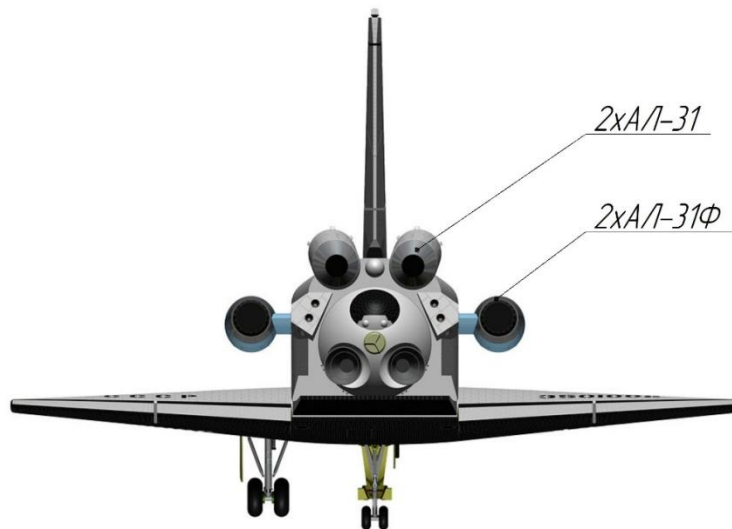


Рис. 4. Размещение турбореактивных двигателей на самолете-аналоге БТС-002 ОК-ГЛИ

Автором предлагается конфигурация орбитального корабля, имеющая в области основания киля ТРДДФ, в количестве двух единиц, на базе турбореактивного двигателя АЛ-41Ф (Изделие 20, НПО «Сатурн»). Совпадение присоединительных размеров АЛ-31 и АЛ-41Ф упрощает установку двигателя и не требует изменения технологии изготовления фюзеляжа орбитального корабля.

Предполагается, что необходимая тяга одного турбореактивного двигателя, для взлета орбитального корабля со взлетно-посадочной полосы, должна составлять не менее 20200 кГс. Стендовая тяга двигателя АЛ-41Ф в режиме «полный форсаж» составляет 18000 кГс, однако этого недостаточно для взлета орбитального корабля в качестве самолета. Таким образом необходимый прирост тяги должен составлять не менее 12%.

Одним из главных параметров авиационных двигателей является их удельная масса. Для уменьшения массы двигателя необходимо применение новейших материалов, в том числе углерод-углеродных конструктивных материалов(С-С)[3]. За счет совершенствования проточной части двигателя при использовании современных технологий проектирования возможно повышение его КПД. Например, в[4] описаны современные методики профилирования лопаточного аппарата двигателей. Немаловажным для реализации предлагаемой конфигурации орбитального корабля, является максимально возможная высота его полета. Достичь большой высоты полета возможно при применении современных систем зажигания в камере сгорания.

Установка двух ТРДДФ, с тягой 20200 кГс каждый, на орбитальный корабль «Буран» позволит:

- Упростить транспортировку орбитального корабля, за счет его собственного перемещения в качестве атмосферного самолета;

- Значительно увеличить располагаемую боковую дальность при спуске с орбиты:
- Упростить управляемую посадку.

На рисунке 5 показана предлагаемая конфигурация орбитального корабля с двумя модернизированными ТРДДФ на базе двигателя АЛ-41Ф.



Рис. 5 Конфигурация орбитального корабля «Буран» с двумя модернизированными ТРДДФ на базе двигателя АЛ-41Ф

Таким образом предлагаемая конфигурация с двумя турбореактивными двигателями позволяет расширить маневренные возможности на участке атмосферного спуска орбитального корабля «Буран», а также дает возможность использования орбитального корабля в качестве атмосферного самолета, что существенно упростит его транспортировку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- [1] Семенов Ю.П., Лапыгин В.Л., Лозино-Лозинский Г.Е., Тимченко В.А. Многоходовый орбитальный корабль «Буран». – М.: Машиностроение, 1995. – 448 с.
- [2] Лозино-Лозинский Г.Е. Полет «Бурана». Материалы XIX Гагаринских научных чтений. – М.: Наука, 1990.
- [3] Лозино-Лозинский Г.Е. Симпозиум «Взгляд в 2020 год», Аэрошоу "Канада-89". – Ванкувер, Канада, 1989.
- [4] Тарасов Е.В., Жинов А.А. Проектирование и применение лопаток сложной формы в паровых турбинах // Научно-технические разработки в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, 25–27 ноября 2014 г. Т.1. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. — 216 с.

Тарасов Евгений Витальевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: tarasovevgeniy@outlook.com

Д.А. Седов, Е.А. Юрик

ПРОБЛЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

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

Повышение начальной температуры газа, вытекающего из камер сгорания, приводит к увеличению мощности а также экономичности газотурбинных установок [1].

Газовая турбина является наиболее сложным элементом газотурбинной установки, что обусловлено в первую очередь очень высокой температурой рабочих газов, протекающих через ее проточную часть. Температура газов перед турбиной 1350 °С в настоящее время считается «стандартной», и ведущие фирмы работают над освоением начальной температуры 1500 °С [3].

Стремление повысить начальную температуру связано, прежде всего, с выигрышем в экономичности, который она дает. Это хорошо видно из рис. 1, обобщающего достигнутый уровень газотурбостроения. Повышение начальной температуры с 1150 до 1500 °С дает увеличение абсолютного КПД с 35 до 40 %, т.е. приводит к экономии топлива в 20-25 %. Конечно, часть этой экономии связана не только с повышением температуры, но и с совершенствованием других элементов газотурбинных установок, а определяющим фактором все-таки является начальная температура [2].

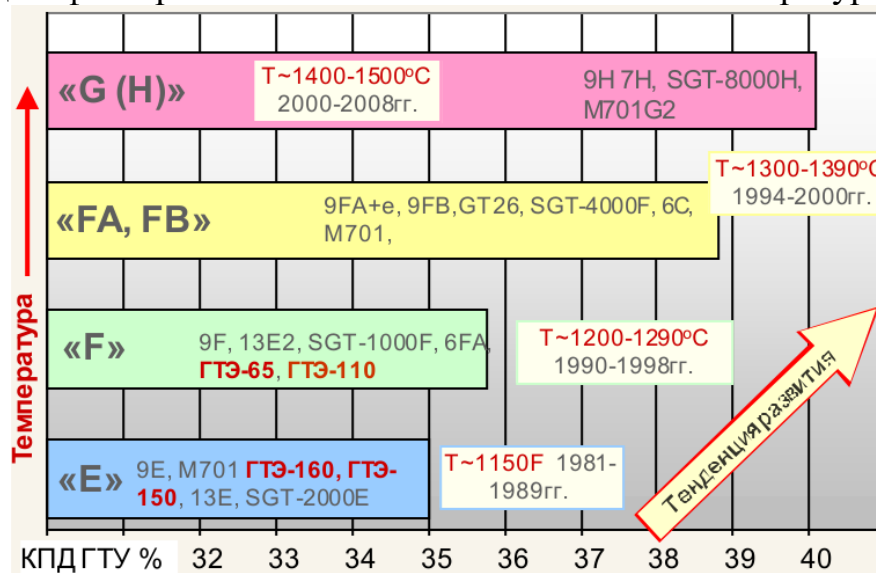


Рис. 1. Повышение КПД реальных газотурбинных установок в связи с ростом температуры перед газовой турбиной

Система охлаждения является в настоящее время неотъемлемой частью конструкции любой современной турбины. В газотурбинном двигателе охлаждаются сопловые и рабочие лопатки первых ступеней, ротор, корпус. Непрерывное совершенствование и усложнение технологий охла-

ждения является обязательным условием реализации конкурентоспособной конструкции турбины – конструкции, в которой при увеличении температуры перед турбиной расход воздуха на охлаждение не перекрывает выигрыш в удельных параметрах двигателя, а ресурс деталей турбины соответствует требованиям заказчиков.

Для обеспечения длительной работы газовой турбины используют сочетание двух средств. Первое средство — применение для наиболее нагруженных деталей жаропрочных материалов, способных сопротивляться действию высоких механических нагрузок и температур (в первую очередь для сопловых и рабочих лопаток). Если для лопаток паровых турбин и некоторых других элементов применяются стали (т.е. сплавы на основе железа) с содержанием хрома 12—13 %, то для лопаток газовых турбин используют сплавы на никелевой основе (*нимоники*), которые способны при реально действующих механических нагрузках и необходимом сроке службы выдерживать температуру 800—850 °С. Поэтому вместе с первым используют второе средство — охлаждение наиболее горячих деталей [1-3].

Среди всех деталей газовых турбин, требующих охлаждения, наиболее нагретыми и нагруженными являются лопатки, в первую очередь рабочие лопатки. Способы охлаждения лопаток постоянно совершенствуются. Для оценки их эффективности используют понятие интенсивности охлаждения (безразмерной глубины охлаждения):

$$\theta = \frac{T_z^* - T_m}{T_z^* - T_{охл.в}^*},$$

где $T_z^*, T_{охл.в}^*$ - соответственно температуры полного торможения газа и охлаждающего воздуха; T_m - температура металла охлаждаемых лопаток.

На рис. 2 показаны профили лопаток газовой турбины с использованием различных способов их охлаждения.

Интенсивность охлаждения возрастает с увеличением безразмерного параметра охлаждения:

$$\beta_{охл} = \frac{G_{охл.в} c_{р.в}}{k F_{\Pi}}, \text{ где } G_{охл.в} - \text{ количество охлаждающего воздуха, кг/с;}$$

$c_{р.в}$ - удельная теплоемкость охлаждающего воздуха, кДж/(кг·К);

k - коэффициент теплоотдачи по профилю лопатки (среднее значение);

F_{Π} - площадь поверхности лопатки газовой стороны, м² [2].

Из рис. 2. видно, что наибольшее значение интенсивности охлаждения, достигается при охлаждении конвекцией.

Классификация газовых турбин по системе GE (General Electric) (факторы: температура на входе в турбину и КПД), представлена на рис. 3. Из рисунка видно, что использование лабиринтного, пленочного охлаждения позволяет повысить КПД газотурбинных установок свыше 40% [1,4].

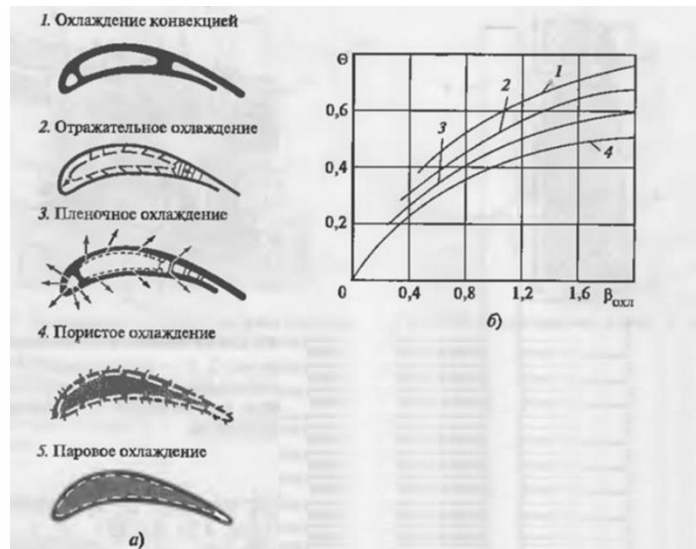


Рис. 2. Охлаждение лопаток проточной части газовой турбины и оценка его эффективности с помощью безразмерного параметра охлаждения $\beta_{охл}$
 а) — методы охлаждения лопаток газовых турбин; б) — зависимость интенсивности охлаждения от $\beta_{охл}$



Рис. 3. Классификатор газовых турбин по системе GE (General Electric)

Система охлаждения газовой турбины должна отвечать ряду требований, среди которых можно выделить следующие:

- охлаждение деталей газовой турбины должно происходить до температуры, при которой их прочность обеспечивает необходимую продолжительность работы;
- увеличение полезной работы вследствие роста начальной температуры газа должно обеспечивать экономический эффект больший, чем затраты, связанные с применением системы охлаждения;
- градиенты температур охлажденных деталей газовой турбины не должны приводить к опасным значениям температурных напряжений;
- усложнение тепловой схемы газотурбинной установки, ее конструкции и режимов эксплуатации из-за появления системы охлаждения не должно приводить к ее значительному удорожанию и снижению надежно-

сти. Система охлаждения должна одинаково эффективно действовать на всех режимах работы установки.

Система охлаждения газовой турбины выполняет две основные функции: непосредственное охлаждение элементов, подверженных воздействию температуры потока газов, и обеспечение экологической чистоты газотурбинной установки. В разные критические точки газовой турбины подается воздух нужного давления и температуры [2-3].

Используются несколько типов систем охлаждения:

а) *система воздушного охлаждения*, в которой применяется цикловой воздух компрессора, отбираемый из различных отсеков его проточной части. Если после охлаждения этот воздух выводится в проточную часть газовой турбины, такую систему называют открытой. В закрытых воздушных системах охлаждающий воздух возвращается обратно для дожатия в компрессор. Такое техническое решение возможно, если охлаждающий тракт выполнен герметичным;

б) *система парового охлаждения*, в которой для охлаждения используется водяной пар. Он обладает лучшими теплофизическими свойствами, чем воздух. Его применение связано со значительно меньшими потерями работы сжатия (повышение давления осуществляется в жидкой фазе). Такие системы охлаждения могут быть открытыми и закрытыми, где пар после охлаждения вводится в камеру сгорания газотурбинной установки;

в) *комбинированная система охлаждения*, в которой переходная секция, соединяющая камеру сгорания и вход газов в газовую турбину, а также первая ступень лопаток (преимущественно сопловых) охлаждаются паром, отводимым обратно в тепловую схему парогазовой установки. Остальные элементы проточной части газовой турбины охлаждаются цикловым воздухом по открытой схеме.

Организация охлаждения ротора газовой турбины зависит от размеров установленных дисков. Продувка воздуха через хвостовые крепления рабочих лопаток оказывается достаточной для охлаждения в тех случаях, когда размеры полотна дисков относительно невелики. Если ротор газовой турбины имеет диски с большим полотном, то применяют другие схемы их охлаждения: устанавливают специальные покрывные диски – дефлекторы, используют струйное охлаждение поверхностей диска. Сочетание в конструктивной схеме газовой турбины перечисленных способов охлаждения обеспечивает отбор основного количества теплоты от рабочих дисков в наиболее нагретой их части – в креплении хвостовиков рабочих лопаток.

Охлаждение корпуса газовой турбины позволяет снизить температуру и изготовить его из более дешевого материала. Для этого применяются специальные ребра, устанавливается дополнительная теплоизоляция, предусматриваются отверстия для прохода охлаждающего воздуха, который по трубопроводам подводится к отдельным частям корпуса газовой турбины.

В охлаждаемых газовых турбинах по сравнению с неохлаждаемыми *возникают дополнительные потери*, которые можно классифицировать следующим образом:

1. *потери на прокачку охлаждающего воздуха*, обусловленные затратой энергии на повышение скорости охлаждающего воздуха до значения окружающей, соответствующей месту его выхода из рабочей лопатки.

2. *термодинамические потери*, вызванные тем, что в процессе охлаждения сопловых и рабочих лопаток происходит отвод части теплоты от потока газа при смешении его с охлаждающим воздухом, вытекающим из лопаток в проточную часть газовой турбины.

3. *газодинамические потери*, обусловленные необходимостью отступать от обычных аэродинамически совершенных профилей, чтобы расположить внутри лопаток каналы для подвода охлаждающего воздуха. Кромки лопаток выполняют более толстыми, углы заострения большими. Увеличивается относительная толщина профиля лопатки, утолщаются выходные кромки сопловых лопаток;

4. *потери при смешении охлаждающего воздуха с основным потоком газа*, неизбежные в открытой системе охлаждения. Они тем больше, чем больше разность скоростей смешивающихся потоков и больше отклонение направления вдуваемого воздуха от направления основного потока газа;

5. *потери от перетекания* воздуха в поток газа через лабиринтные уплотнения и зазоры в неподвижных элементах конструкции газовой турбины [2].

В настоящее время предварительные расчеты параметров охлаждения газовых турбин, которые осуществляются при помощи современных компьютерных технологий, позволяют заметно улучшить параметры работы газотурбинных установок.

Список литературы

[1] Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок: Учебник для вузов /В.Л.Иванов, А.И.Леонтьев, Э.А.Манушин, М.И.Осипов; Под ред. А.И.Леонтьева. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 592с.

[2] Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учебное пособие для вузов / Под ред. С.В.Цанева – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 584с.

[3] Зысин Л.В. Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции: учеб. пособие . – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 368 с.

[4] Устройство современных стационарных ГТУ [<http://lib.rosenergосervis.ru/sovremennaya-teploenergetika?start=34>], Электрон. журн., 2010 , – режим доступа к журналу: [<http://lib.rosenergосervis.ru>]

Седов Даниил Александрович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: danil.sidor972021@gmail.com

Юрик Елена Алексеевна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: eaYurik@gmail.ru

А.Ф. Заричный, В.Ю. Ильичев

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КОЛЕБАНИЙ РОТОРОВ, СОЕДИНЕННЫХ МУФТАМИ

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

Роторы являются неотъемлемыми элементами большинства энергетических установок, где служат для передачи крутящего момента для привода основного или вспомогательного оборудования.

Вместе с тем роторы являются основным источником вибрации, причинами которой являются дисбаланс, конструктивные несовершенства и дефекты, возникшие в процессе монтажа и эксплуатации, а также специфические для роторных систем неконсервативные силы, приводящие к автоколебаниям.

Роторы соединяют в валопроводы с помощью двух типов муфт: жесткие и подвижные. Как показывает практика работы валопроводов, муфты являются интенсивным источником вибрации. Однако, механизм возникновения вибраций в соединительных муфтах на данный момент исследован недостаточно: не существует методики расчета роторных систем, соединенных подвижными муфтами, а методика расчета валопроводов с жесткими муфтами не учитывают несоосности (расцентровки) валов.

При исследовании вибраций валопровода решаются следующие задачи:

- расчет критических скоростей;
- определение границ устойчивой работы;
- расчет вынужденных колебаний (расчет амплитуд колебаний различных частей ротора под действием внешних нагрузок).

Целью данной работы является разработка доступной методики расчета вынужденных колебаний валопроводов, соединенных различными типами муфт при наличии расцентровки.

Задачи вычисления параметров вынужденных колебаний роторных систем вначале решались приближенными методами (методы Рэлея, Ритца, Бубнова-Галеркина и др.). Использование ЭВМ позволило применять более точные численные методы – например, метод динамических жесткостей, метод начальных параметров [1]. Эти методы основаны на составлении и решении матричных уравнений, включающих в себя характеристики роторов, разбитых на участки.

Метод динамических жесткостей применяют в том случае, когда система валопровода может быть легко разбита на подсистемы, поведение которых известно при задании гармонических перемещений. Суть метода состоит в том, что систему условно расчленяют на достаточно простые части. В местах расчленения системы снимают условия сопряжения обобщенных динамических сил.

Рассматриваемый валопровод расчленяется на ряд элементов, границами которых являются сечения расположения дисков, сечения опор, пояса жесткости и т.п. В сечениях сопряжения рассматриваемого и смежного элементов прикладывают единичные возбуждающие силы с частотой ω и направлением вращения как у базового ротора, а затем определяют перемещения сечений. Эти перемещения называют динамическими податливостями. Таким образом, в каждой m -й подсистеме становятся известны реакции $r_{jk}^{(m)}(\omega)$ по направлениям j -го обобщенного перемещения от k -го единичного гармонического перемещения $1 \cdot \cos(\omega t)$.

Действительные обобщенные перемещения $Z_k \cos(\omega t)$ определяются из условий сопряжения динамических обобщенных сил:

$$\sum_{k=1}^n Z_k r_{jk}(\omega) = 0 \quad \left(j = 1, 2, \dots, n; r_{jk} = \sum_m r_{jk}^{(m)} \right), \quad (1)$$

где n – число условий сопряжения; $r_{jk}(\omega)$ – динамические жесткости, которые определяют суммированием по всем подсистемам, реагирующим на обобщенное перемещение.

Метод начальных параметров сводится к определению линейных и угловых перемещений под действием системы приложенных сил и моментов и далее – к определению изгибной (поперечной) жесткости ротора, что позволяет найти его критическую частоту.

Валопровод представляется в виде связанных элементов: стержней, точечных масс, дисков, шарниров, опор [2]. Каждый элемент характеризуется четырьмя величинами: прогибом y , углом поворота сечения φ , изгибающим моментом M , перерезывающей силой Q . Амплитуды этих величин составляют четырехмерный вектор

$$X = (y, \varphi, M, Q). \quad (2)$$

Матричное уравнение перехода от одного элемента (i) к следующему ($i+1$) имеет вид:

$$X_{i+1} = NX_i, \quad (3)$$

где N – матрица перехода (включает в определенные физические свойства элемента – податливости, массы, размеры и др. – в зависимости от вида элемента [2, табл. на стр. 296]).

Начальные условия в нулевом сечении первого элемента находят из условий закрепления и нагружения. Два параметра четырехмерного вектора каждого элемента являются неизвестными (как правило, это прогибы и углы поворота), оставшиеся два либо известны, либо равны нулю.

Неизвестные параметры находят из решения матричного уравнения, составленного по всем элементам.

В настоящее время вычислительная техника располагает возможностями расчета колебаний очень сложных систем методом конечных элементов (МКЭ). Примеры таких вычислительных программных комплексов – SolidWorks, Ansys, Nastran.

МКЭ основан на следующих принципах [3]. Деталь разбивают на элементы простой формы: призмы, тетраэдры и другие многогранники. Смещения в некоторых точках элементов (узлах) принимают в качестве искомым величин. В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями ЭВМ.

Цель описываемой научной работы – применить описанные выше методы к расчету валопроводов, роторы которых соединены муфтами, являющихся источником колебаний из-за наличия в них расцентровок.

Суть предлагаемой методики заключается в следующем. Валопровод разделяется на отдельные роторы, а их взаимное влияние учитывается силами и моментами, действующими на концы валов в месте их соединения. Выражения для этих сил и моментов выведены в [4] для различных типов соединительных муфт.

Выражения для сил и моментов, возникающих в муфтах при расцентровках осей валов, содержат значения податливостей концов валов при действии на них единичных вращающихся сил и моментов. Податливости реальных валов можно найти описанными выше методами.

Таким образом, можно решить задачу вынужденных колебаний роторов, возникающих при расцентровках соединяемых валов, для любой энергомашины. Для апробации методики предполагается произвести расчет валопровода силовой части установки ГТН-25, роторы которой соединены подвижной муфтой.

Список литературы

[1] Заляев Р.Р. *Повышение вибрационной надежности двухконсольных роторов турбомашин*. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Казань, 2007, 170 с.

[2] Диментберг Ф.М., Колесников К.С. *Вибрации в технике. Т. 3: Колебания машин, конструкций и их элементов*. Москва, Машиностроение, 1980, 544 с.

[3] Костюк А.Г. *Динамика и прочность турбомашин*. 3-е изд. Москва, Издательский дом МЭИ, 2007, 467 с.

[4] Ильичев В.Ю. *Исследование влияния конструкции соединительных муфт на динамику роторных систем турбоагрегатов*. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Калуга, 2002, 160 с.

Заричный Александр Федорович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sefan@bk.ru

Ильичев Владимир Юрьевич - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: patrol8@yandex.ru

Ф.Г. Завальный, Н.В. Гридчин

ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ ЛОПАТОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

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

Основной тенденцией развития двигателестроения является непрерывное увеличение температуры газов перед турбиной, что ведет к дальнейшему усложнению конструкции, увеличению термомеханической напряженности лопаток газовых турбин, надежность которых оказывает большое влияние на надежность и ресурс газотурбинных двигателей в целом.

В этой связи, разработка и внедрение высокоэффективных методов увеличения прочностных свойств, коррозионной стойкости сплавов, защитных покрытий и изделий являются важнейшими в решении проблемы долговечности газовых турбин.

Рабочие лопатки турбинных ступеней изготавливают из никелевых жаропрочных сплавов, которые в сочетании с конструктивным исполнением определяют допустимую температуру рабочего газа перед турбиной, влияющую на основные характеристики двигателя: тягу, экономичность, ресурс. Однако эти сплавы не обеспечивают достаточной стойкости к воздействию агрессивной среды газового потока двигателя. В газовой среде содержатся агрессивные компоненты, вызывающие образование на поверхности лопаток солевого осадка и резкое увеличение скорости разрушения поверхностного слоя металла из-за сульфидной коррозии.

Для надежной защиты от высокотемпературной газовой коррозии лопаток в современном двигателестроении используют жаро- и коррозионно-стойкие покрытия, которые наносят на наружную и внутреннюю поверхности охлаждаемых лопаток. Эффект достигается правильным выбором технологии и химического состава покрытий применительно к конкретным условиям эксплуатации газовых турбин.

В современных ГТД для защиты охлаждаемых лопаток от воздействия теплового потока необходимо, чтобы жаростойкие защитные покрытия обладали не только высокой стойкостью к высокотемпературной газовой коррозии и эрозии в агрессивной среде продуктов сгорания топлива, но и служили термическим барьером по отношению к тепловому излучению газового потока (рисунок 1). Для этого необходимо разработать новые многослойные покрытия, которые обеспечат мультипликацию необходимых свойств.

На лопатках газовых турбин широко применяют две группы теплозащитных покрытий (ТЗП) - диффузионные и конденсационные.

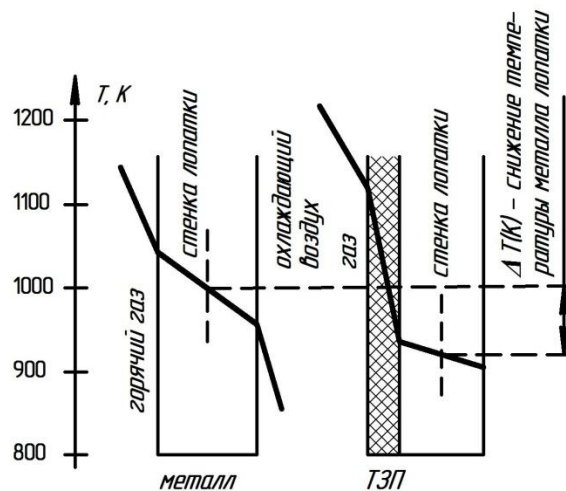


Рис.1. Схема, иллюстрирующая влияние теплозащитного покрытия на снижение средней температуры стенки турбинной лопатки

Диффузионные покрытия получают контактным или бесконтактным способами в порошковых смесях с помощью шликеров или в газовой среде, содержащей насыщающие элементы (алитирование, хромирование, кобальтирование, хромоалитирование и др.). Положительный эффект дает использование двухстадийных технологий, когда на первой стадии осаждают никель, кобальт, хром, а затем проводят алитирование или хромоалитирование. Такие технологии обеспечивают реализацию комплексного легирования поверхностного слоя лопаток насыщающими элементами. Важнейшим преимуществом диффузионных покрытий является возможность защиты от газовой коррозии труднодоступных поверхностей охлаждаемых лопаток газовых турбин (полости, щели, каналы отверстия перфорации) [1, 2].

Конденсационные покрытия получают способами плазменного, вакуумно-плазменного, магнетронного или электронно-лучевого напыления из слитков или брикетов, представляющих собой металлические сплавы для покрытий, например, сплавы систем Ni-Cr-Al-Y (СДП-2), Al-Si-Y (ВСДП-11), Ni-Cr-Al-Ta-W-Hf-Y (СДП-ТВГ) и др.

Поиски новых высокотемпературных покрытий связаны прежде всего с оптимизацией химического состава новых композиций, с разработкой и освоением новых технологических процессов, основанных на использовании принципиально новых физических эффектов, а также с применением вновь создаваемых покрытий. Базовой системой жаростойких покрытий является Me-Cr-Al, где в качестве Me выступают Fe, Co, Ni. В авиадвигателестроении наиболее широко применяется система Ni-Cr-Al. Несмотря на то, что сплавы системы Ni-Cr-Al обладают высокой жаростойкостью, этого, однако, недостаточно. Для турбинных лопаток требуются покрытия, которые способны длительно работать под нагрузкой при температуре металла вплоть до 1150-1200°C.

Один из способов решения данной проблемы – создание комбинированных металлических и металлокерамических высокотемпературных покрытий. Для защиты внешней трактовой поверхности лопаток турбин перспективных ГТД рассматриваются теплозащитные покрытия в виде жаростойкого соеди-

нительного (ЖСС) и внешнего керамического (КС) слоев на основе стабилизированной керамики, имеющего столбчатую, слоисто-пористую или трещиноватую (фрагментированную) структуры. Такие структуры керамических слоев обладают податливостью и обеспечивают необходимый уровень термической стойкости этого слоя в контакте с ЖСС при быстрых изменениях температуры на поверхности рабочих лопаток турбины [3,4].

Керамический слой ТЗП имеет низкий коэффициент теплопроводности. Для керамики на основе стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония $ZrO_2Y_2O_3$, широко используемой в качестве КС на лопатках турбин, коэффициент теплопроводности в области рабочих температур изменяется в диапазоне 2,5...3 Вт/(мК). Керамический слой при тепловых потоках порядка $10^6...10^7$ Вт/м² в условиях эксплуатации рабочих лопаток современных ГТД обеспечивает либо снижение температуры тела лопатки на 100°С при толщине КС 150мкм, либо повышение на те же 100°С температуры поверхности лопатки, что эквивалентно повышению температуры рабочих газов двигателя и его удельных характеристик. При этом снижение температуры поверхности ЖСС на лопатке приводит к существенному (в 2 раза и более) росту ее ресурса, а повышение температуры на поверхности КС ТЗП лопатки обеспечивает повышение удельных характеристик ГТД при сохранении начального ресурса лопаток.

Жаростойкий соединительный слой ТЗП для лопаток турбин из безуглеродистых жаропрочных никелевых сплавов должен содержать барьерный слой, препятствующий образованию ВРЗ (вторичная реакционная зона), и внешний жаростойкий слой, обеспечивающий работу лопаток при максимальной рабочей температуре.

Таким образом, применение теплозащитных многослойных покрытий позволит решить проблему снижения температуры деталей ГТД в условиях высоких температур, что существенно повысит работоспособность и эффективность газотурбинного двигателя, увеличит межремонтные сроки его работы.

Список литературы

[1] Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) – М.: МИСИС, 2001.– 632 с.

[2] Симс Ч., Столлов Н., Хагель В. Суперсплавы II / Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / пер. с англ. / Под ред. Р. Е. Шалина. – М.: Металлургия, 1995. – 384с.

[3] Каблов Е.Н. Защитные покрытия лопаток турбин перспективных ГТД / Е.Н. Каблов, С.А. Мубояджян//ГТТ. 2001. №3 (12). С.30-32.

[4] Каблов Е.Н., Мабуюджан С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД//Металлы. 2012. № 1. С. 5-13.

Завальный Федор Геннадьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fedor.zavalnyj1995@gmail.com

Гридчин Николай Викторович - старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gridchin2610@gmail.com

П.М. Сидоров, П.М. Сидоров, Д.В. Шевелев

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЦИКЛА ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ПОМОЩИ OPEN SOURCE ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПРОГРАММ SCILAB

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

Тепловой, или термодинамический, расчет цикла газотурбинной установки (ГТУ) выполняется с целью определения удельных параметров характеризующих рабочий процесс двигателя: удельной работы цикла l_e , удельного расхода топлива c_e , эффективного КПД двигателя η_e . Полученные в результате термодинамического расчета параметры рабочего процесса ГТУ являются исходными данными для термогазодинамического расчета ее элементов – компрессора, турбины, камеры сгорания.

При проведении термодинамического расчета цикла ГТУ необходимо выбрать целый ряд параметров и коэффициентов, характеризующих совершенство процессов в элементах установки – параметров воздуха на входе p_n^* , T_n^* ; температуры газа перед турбиной T_3^* ; коэффициентов потерь полного давления во входном и выходном устройствах, камере сгорания; КПД компрессора и турбины и т.д. Расчет производится при различных значениях степени повышения давления в компрессоре π_k^* в заданном интервале, а как результат, строятся графики зависимостей l_e , c_e и η_e от π_k^* , пример которых приведен на Рис. 1.

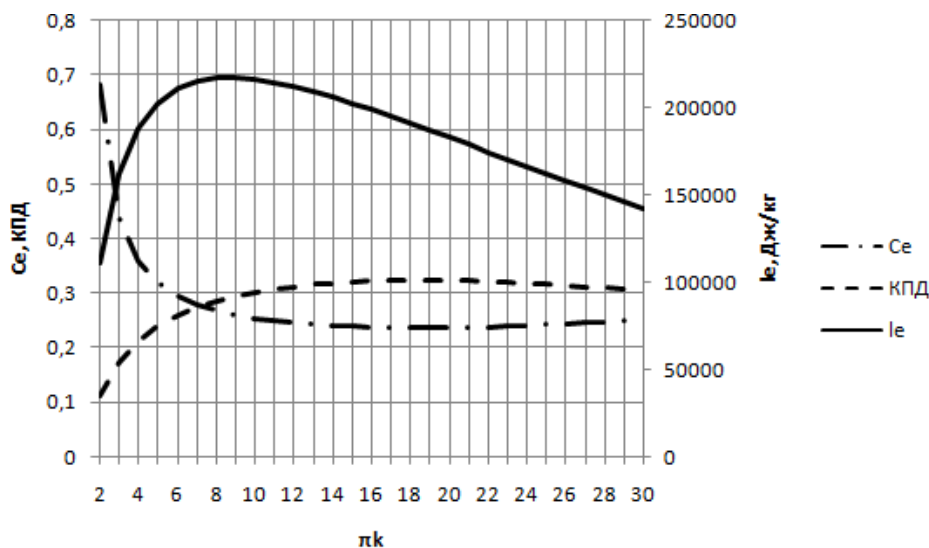


Рис. 1. Зависимость эффективных показателей цикла ГТУ от степени повышения давления в компрессоре

Анализ данных графических зависимостей позволяет определить оптимальную (с точки зрения удельных параметров цикла) степень повышения давления в компрессоре ГТУ в зависимости от π_k^* , T_3^* .

Проведение термодинамического расчета тепловой схемы ГТУ можно значительно ускорить при помощи пакета прикладных математических программ с открытым исходным кодом Scilab [1].

Scilab – это самая полная общедоступная альтернатива известного коммерческого пакета MATLAB. Scilab использует в работе те же самые алгоритмы, позволяет осуществлять построение 2D и 3D графиков, создавать анимацию, решать задачи линейной алгебры, обрабатывать сигналы, решать дифференциальные уравнения. Также, программа поддерживает полиномиальные и рациональные функции, разреженные матрицы, параллельную работу, дифференциальные и недифференциальные оптимизации, интерполяцию и это еще далеко не все функции.

Алгоритм термогазодинамического расчета простой схемы ГТУ был составлен на основе методик описанных в [2,3]. Структурная схема алгоритма расчета тепловой схемы ГТУ при помощи Scilab-5.5.2 приведена на Рис 2.

Процесс расчета начинается с ввода исходных данных. После этого организуется цикл с изменением π_k^* с шагом равным единице. Интервал изменения π_k^* определяется пользователем. Далее организован цикл по определению средней теплоемкости воздуха в интервале температур $T_n - T_2$, методом последовательных приближений. Затем вычисляются работа компрессора, температура воздуха на выходе из компрессора, средняя теплоемкость воздуха и относительный расход топлива. Для определения, методом последовательных приближений, значения средней теплоемкости газа в турбине в интервале температур $T_3 - T_4$ также организован цикл. Затем вычисляется работа турбины и параметры газа за турбиной. Процесс расчета завершается определением основных выходных данных – удельных параметров цикла, и выводом их на экран в виде графических зависимостей.

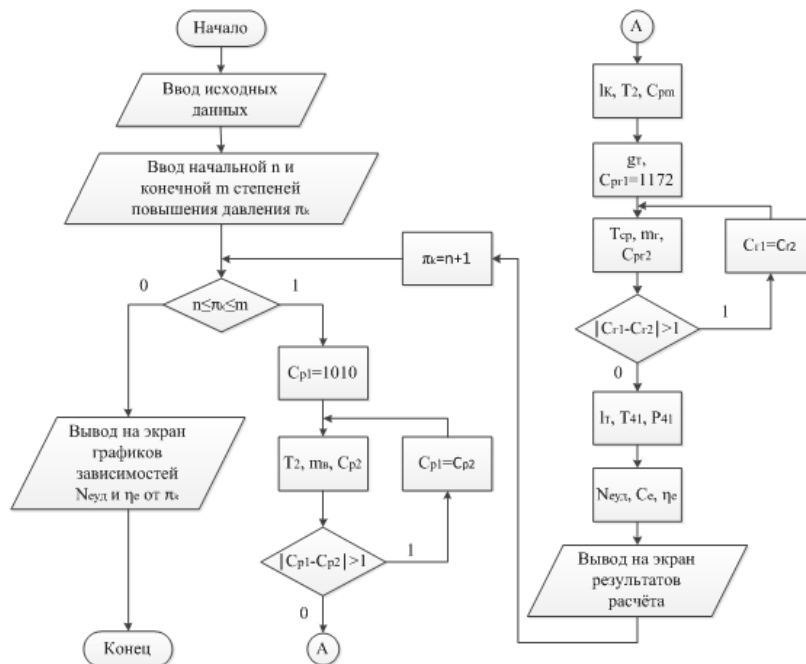


Рис. 2. Структурная схема алгоритма термодинамического расчета цикла ГТУ простой схемы

В языке программирования Scilab возможно создание пользовательских функций, что позволяет существенно упростить и сократить программный код при решении данной задачи. Так, с помощью пользовательских функций был реализован расчет процесса в компрессоре – $l_k, T_3^* = f(\pi_k^*, p_n^*, T_n^*, \eta_k^*)$, турбины – $l_t, T_4^* = f(\pi_t^*, p_3^*, T_3^*, \eta_t^*)$, расчета теплоемкости рабочего тела. Такая модульная схема расчета позволяет быстро создавать программы термодинамического расчета цикла ГТУ не только простой схемы, но и сложных – с промежуточным охлаждением, промежуточным перегревом, регенерацией и, в дальнейшем, реализовать данную методику в виде блоков в пакете визуального моделирования динамических систем xcos scilab – аналоге simulink MATLAB.

Таким образом, разработанная программа расчета тепловой схемы ГТУ позволяет получить значения эффективного КПД двигателя и график его зависимости от π_k^* (Рис 3), а также работу цикла и график ее зависимости от π_k^* (Рис 4). На основании полученных данных можно определить оптимальное значение π_k^* .

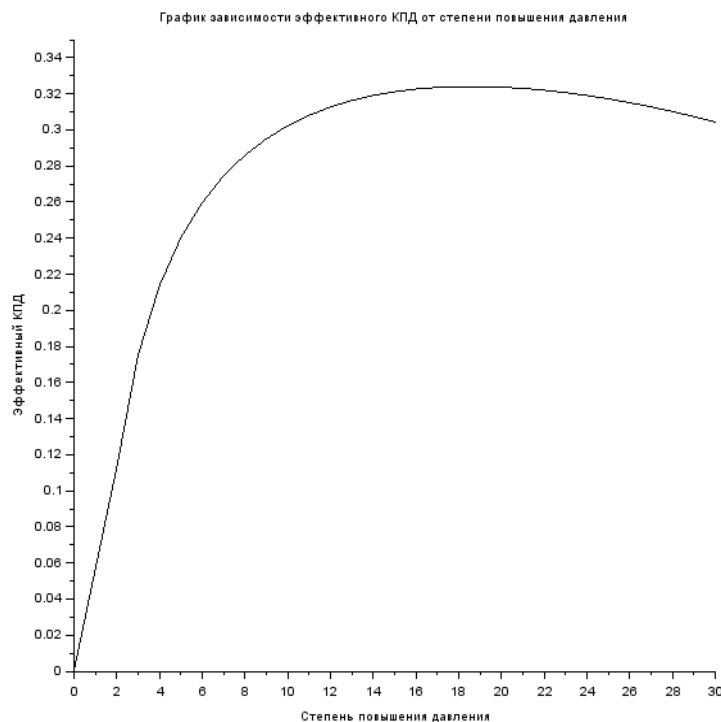


Рис. 3. График зависимости эффективного КПД от π_k^*

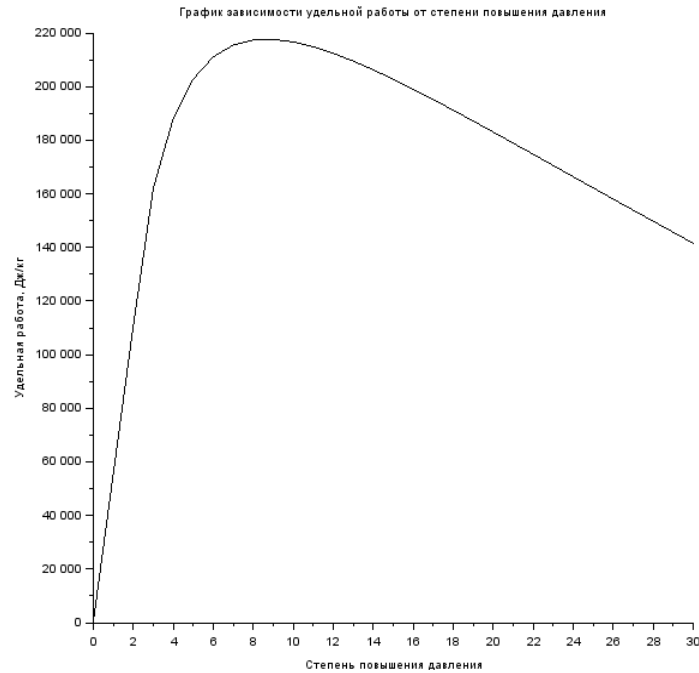


Рис 4. График зависимости удельной работы от π_k^*

ПРИСТАТЕЙНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

- [1] <http://www.scilab.org/>
 [2] Карышев А.К., Жинов А.А., Федоров В.А. Термодинамика. Перспективные циклы и технологии.–Калуга.: Манускрипт, 2015.
 [3] Расчет тепловой схемы газотурбинной установки для привода нагнетателя / Ю.Д. Лапин, А.К. Карышев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1983.

Сидоров Павел Михайлович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
 E-mail: SidorowPawel195@yandex.ru

Сидоров Петр Михайлович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
 E-mail: SidorowPM@yandex.ru

Шевелев Денис Владимирович - канд. техн. наук, доцент кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

А.И. Сафонов, Д.В. Шевелев

УТИЛИЗАЦИОННАЯ ГАЗОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

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

В настоящее время суммарная мощность эксплуатируемых в РФ газотурбинных установок (ГТУ) превышает отметку в 38000 МВт. Крупнейшим эксплуатантом стационарных ГТД в России является газотранспортная система ОАО «Газпром», включающая в себя более 160 тыс. км магистральных газопроводов, с расположенными на них более 200 линейными компрессорными станциями (КС), предназначенных для повышения давления транспортируемого по газопроводам природного газа, которое осуществляется с помощью газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Так же, КС используются в составе 19 управлений подземного хранения газа (УПХГ) для закачки, хранения и транспортировки природного газа потребителю [1]. В связи с таким масштабным использованием стационарных ГТУ в стране, необходимо внедрять перспективные конструкции и технологии для повышения эффективности работы двигателей.

Улучшение эффективности рабочего процесса ГТУ простого цикла (увеличение КПД компрессора, турбины, механического КПД, устранение утечек и т.д.) дает ограниченный прирост КПД. Даже перспективные ГТУ имеют КПД, не превышающий 40...41%, а большая часть энергии в них (59...60%), представляющая собой теплоту выхлопных газов, теряется в атмосфере. Температура выхлопных газов ГПА достигает 750...800 К при температуре газа перед турбиной 1400... 1500 К. Учитывая большой парк ГПА в России, потери тепла с уходящими газами составляют огромную величину – порядка 80 ГВт [2]. Это делает задачу полезного использования теплоты уходящих газов ГПА экономически целесообразной. Для этого разрабатываются различные утилизационные технологии [3].

Для энергетических ГТУ разработана и широко используется технология утилизации теплоты уходящих газов путем создания парогазовых установок (ПГУ), работающих по циклу Брайтона-Ренкина. Создание ПГУ возможно и на базе ГТУ ГПА, так, в работе [4] описывается опыт эксплуатации ПГУ на газокompрессорной станции «Чаплыгин». Сложности, возникшие в связи с эксплуатацией данной ПГУ в условиях компрессорных станций, ограниченных по площади, числу и квалификации обслуживающего персонала, удаленности от ремонтных баз и сервисных центров, показывают, что выбор ПГУ для утилизации теплоты уходящих газов ГПА не всегда бывает оправданным.

Альтернативным вариантом является применение утилизационного газотурбинного контура с реализацией традиционного цикла или цикла с измененной последовательностью процессов [5].

На Рис. 1 представлена схема ГПА с утилизационной газотурбинной установкой (УГТУ) с традиционной последовательностью процессов.

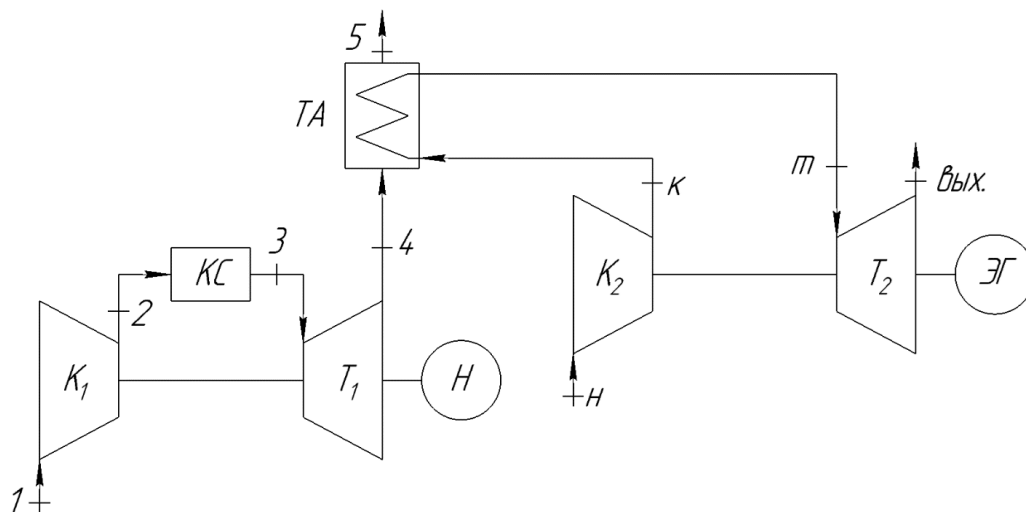


Рис.1. ГПА с УГТУ с традиционной последовательностью процессов

В данной схеме компрессор базового ГТД (K_1) нагнетает воздух в камеру сгорания ($КС$), в которой происходит смешивание топлива с воздухом и горение топливозвоздушной смеси, далее высокотемпературные продукты сгорания поступают в турбину базового ГТД (T_1), которая приводит во вращение компрессор (K_1) и нагнетатель (H). Затем, продукты сгорания, совершив работу в турбине, попадают в рекуперативный теплообменный аппарат ($ТА$), где отдают свое тепло воздуху, который подается в $ТА$ компрессором УГТУ (K_2). После $ТА$ продукты сгорания ГПА выбрасываются в атмосферу, а подогретый воздух УГТУ поступает в турбину (T_2). В турбине T_2 воздух, расширяясь, совершает работу, которая идет на привод компрессора (K_2) и привод полезной нагрузки – электрогенератора ($ЭГ$). Наличие теплообменного аппарата обуславливает повышенное гидравлическое сопротивление выхлопного тракта ГТУ ГПА, что приводит к небольшому снижению мощности основной ГТУ, которое может быть компенсировано небольшим (на $15...20^{\circ}C$) повышением температуры газа перед турбиной.

К числу основных достоинств данной схемы следует отнести: относительную простоту, высокий ресурс УГТУ из-за сравнительно низкой температуры рабочего тела перед турбиной T_2 , отсутствие оборудования незнакомого персоналу газокomppressorной станции. Технология производства и эксплуатации рекуперативных $ТА$ для утилизации тепла выхлопных газов ГТУ известна и хорошо отработана [6].

Параметры, характеризующие эффективность представленной схемы, такие как КПД, мощность, массогабаритные показатели, будут во многом определяться параметрами ТА, основным из которых является степень регенерации σ . С повышением степени регенерации увеличивается температура воздуха перед турбиной T_2 , а, следовательно, мощность и КПД УГТУ, но увеличивается гидравлическое сопротивление и размеры ТА. С понижением степени регенерации, наоборот, теплообменный аппарат получается более компактным, но уменьшается утилизация теплоты уходящих газов.

Целью данной работы является определение влияния степени регенерации ТА σ и степени повышения давления компрессора УГТУ K_2 на параметры, характеризующие эффективность комплекса ГТУ+УГТУ.

В качестве базовой была использована ГТУ мощностью $N_e=16$ МВт и КПД $\eta_e=0,34$ с параметрами, характерными для наиболее массовых серий ГПА [7]. Температура газа на выходе из турбины $T_1 - T_4 = 790$ К, расход продуктов сгорания $G_r=54,3$ кг/с.

Термодинамический расчет цикла УГТУ проводился по методике [8, 9]. Степень регенерации ТА задавалась в диапазоне от $\sigma=0,6$ до $0,9$; степень повышения давления в цикле УГТУ π_k от 2 до 16. Параметры, характеризующие эффективность элементов турбомашин, задавались аналогичными базовой ГТУ.

Температура воздуха перед турбиной УГТУ определялась как:

$$T_T = T_K + \sigma(T_4 - T_K).$$

Температура газа на выходе из теплообменного аппарата T_5 определялась из условия обеспечения постоянной величины теплового напора по длине поверхности ТА, что обеспечивает максимальную компактность теплообменника:

$$T_5 = T_4 - (T_T - T_K).$$

Расход воздуха через УГТУ G_B определялся решением уравнения теплового баланса:

$$G_r c_{p_r} (T_5 - T_4) = G_B c_{p_g} (T_T - T_K),$$

где c_{p_r} и c_{p_g} – теплоемкость продуктов сгорания ГТУ и воздуха УГТУ соответственно.

Мощность УГТУ находилась как:

$$N_{e_{УГТУ}} = G_g (l_T - l_K).$$

Эффективный КПД энергетического комплекса ГТУ+УГТУ:

$$\eta_{e_{\Sigma}} = \frac{N_{e_{ГТУ}} + N_{e_{УГТУ}}}{G_{топл} Q_H^p},$$

где $G_{топл}$ – секундный расход топлива ГТУ, Q_H^p – низшая удельная теплота сгорания топлива.

Результаты расчета представлены на Рис. 2 и Рис. 3.

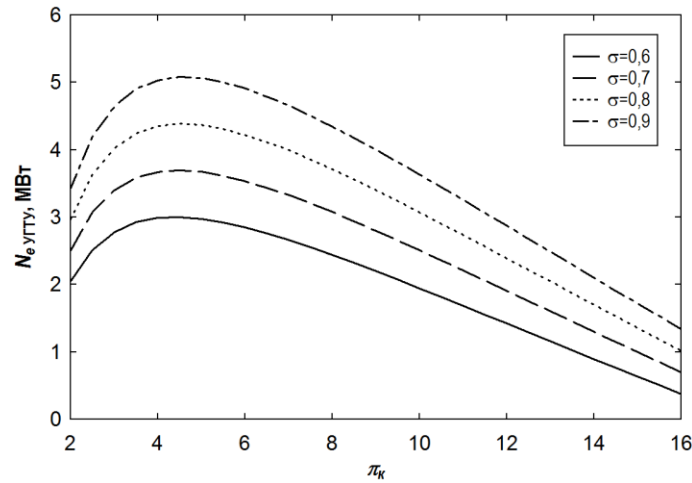


Рис. 2. График зависимости удельной мощности УГТУ от степени повышения давления компрессора при различной степени регенерации ТА

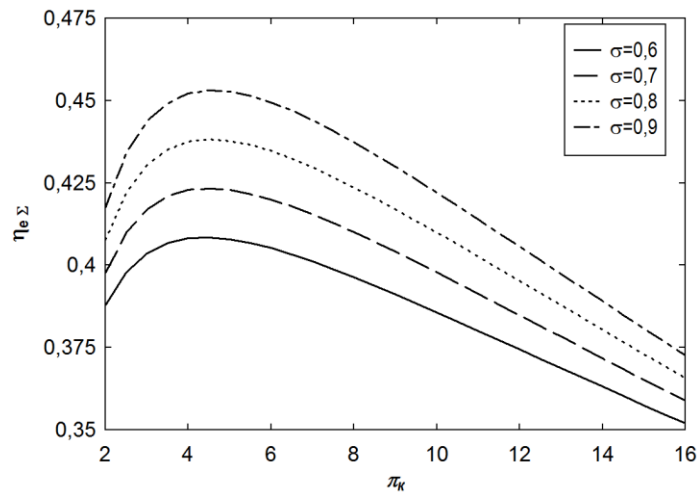


Рис. 3. График зависимости эффективного КПД КУ от степени повышения давления компрессора при различной степени регенерации ТА

Расчеты показали, что при принятых исходных данных, $N_{e_{\text{УГТУ}}}$ и $\eta_{e_{\Sigma}}$ достигают своего максимума при $\pi_k = 4,5 \dots 5,0$. С ростом степени регенерации мощность УГТУ и эффективный КПД энергетического комплекса увеличиваются. При экономически оправданной степени регенерации $\sigma = 0,7 \dots 0,8$ мощность УГТУ составляет величину $N_{e_{\text{УГТУ}}} = 3,5 \dots 4,3$ МВт, а эффективный КПД всего энергетического комплекса $\eta_{e_{\Sigma}} = 42,5 \dots 43,5\%$. Паротурбинная установка (ПТУ) в составе КУ дала бы больший прирост эффективной мощности и КПД чем УГТУ в связи с тем, что в составе парогазовой установки (ПГУ) используется котел – утилизатор, в котором достигается большая степень утилизации теплоты уходящих газов. Однако, для использования ПТУ в составе ГПА требуется большое количество основного и вспомогательного оборудования – паровой турбины, питательного насоса, конденсатора, деаэратора, системы подготовки питательной воды и других комплектующих установки, занимающих дополнительные площади промышленной площадки компрессорной станции,

в отличие от УГТУ, которая менее требовательна к квадратуре места установки, что доказывает низкая оптимальная степень повышения давления.

Выводы:

- Применение утилизационной газотурбинной установки позволяет утилизировать теплоту уходящих газов ГПА, полезная мощность и КПД такого энергетического комплекса увеличивается на 20...25%.
- Оптимальная степень повышения давления в компрессоре УГТУ составляет величину $\pi_k = 4,5 \dots 5,0$.
- Основным преимуществом УГТУ перед ПГУ является простота используемого оборудования, лучшие массогабаритные показатели.
- Низкая температура рабочего тела перед турбиной УГТУ $T_T = 690 \dots 730$ К, позволяет прогнозировать высокий ресурс УГТУ.

Список используемой литературы:

[1] Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов / А. Н. Козаченко . – М. : Нефть и газ, 1999 . – 463 с.

[2] Забелин Н.А., Лыков А.В., Рассохин В.А. Оценка располагаемой тепловой мощности уходящих газов газоперекачивающих агрегатов единой системы газоснабжения России. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 4-1 (183), 2013. С.136-143.

[3] Жинов А.А., Карышев А.К., Шевелев Д.В. Перспективные технологии утилизации тепла выхлопных газов газоперекачивающих агрегатов. Электронный журнал: наука, техника и образование №4, 2015, ISSN 2413-6220, <http://nto-journal.ru/catalog/mashinostroenie/93/>

[4] Данушин Н., Мильман О., Циммерман С., Винниченко Н. Блочный утилизационный энергокомплекс мощностью 500 кВт на КС "Чаплыгин" Газотурбинные технологии, №6, 2003 г.

[5] Тумашев Р.З., Моляков В.Д., Лаврентьев Ю.Л. Повышение эффективности компрессорных станций магистральных газопроводов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение", 2014. №1 с.68-79.

[6] Липихин Е.Г. Высокотемпературные теплообменные аппараты для утилизации бросового тепла газотурбинных установок Молодежный научно-технический вестник №01, январь 2016.

[7] Каталог газотурбинного оборудования: том 1, каталог энергетического оборудования.– М.: Издательский дом "Газотурбинные технологии", 2011. – 392 с.

[8] Карышев А.К., Жинов А.А., Федоров В.А. Термодинамика. Перспективные циклы и технологии.–Калуга.: Манускрипт, 2015.

[9] Расчет тепловой схемы газотурбинной установки для привода нагнетателя / Ю.Д. Лапин, А.К. Карышев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1983.

Сафонов Александр Игоревич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: safonov.k40@yandex.ru

Шевелев Денис Владимирович - канд. техн. наук, доцент кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Denis.V.Shevelev@gmail.com

СЕКЦИЯ 5.

**КЛАССИЧЕСКИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ
ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ;
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
И ПРОИЗВОДСТВОМ**

С.А. Антонов, М.О. Корлякова

АНАЛИЗ ДЕЙСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ СКРИНРИДЕРОВ

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

Адаптация пользователей с ограниченными возможностями требует от интерфейсов человек-ЭВМ решения вопросов специфического взаимодействия при работе в стандартных вычислительных средах. Для слабовидящих пользователей это программы надстройки, которые обеспечивают интерпретацию состояния экрана компьютера и чтение необходимых элементов текста по мере необходимости или по факту обновления. Такие программы носят название скринридеры. Скринридер (*Screenreader*) - программа, позволяющая определять и интерпретировать (обычно в виде звуковых и/или голосовых) оповещений события, происходящие на экране [4]. Рассмотрим несколько вариантов решения задачи чтения экранной информации под ОС windows. К ним относятся следующие приложения: JAWS, Cobra, NVDA [4].

JAWS - самая популярная в мире программа экранного доступа, работающая на PC в среде Windows. Она обеспечивает доступ к системным и офисным приложениям и другому необходимому программному обеспечению, включая интернет обозреватели[2].

COBRA - это скринридер от немецкой компании BaumRetek. Программа, также как и Jaws, имеет функцию видео-перехвата, хорошо увеличивает шрифт на экране, что позволяет пользователям с нарушенным зрением беспрепятственно воспринимать с него информацию. Но данный продукт адаптирован, скорее, для слабовидящих людей, нежели для незрячих [3].

NVDA (NonVisualDesktopAccess) - свободная, с открытым исходным кодом программа для MS Windows, которая позволяет незрячим или людям с ослабленным зрением работать на компьютере без применения зрения, выводя всю необходимую информацию с помощью речи или на брайлевский дисплей [1].

Рассмотрим результаты тестирования этих продуктов на ПК в конфигурации: Windows7, процессор Intel Core i5 3.3 GHz, видеокарта nvidia geforce gtx 560, ОЗУ 8 ГБ. В процессе теста для каждого продукта исследовались следующие особенности: процедура установки программы для работы, работа программы с разными вариантами обработки, характерные особенности функционирования.

В процессе установки программы JAWS не требовалось от пользователя каких-либо дополнительных действий, но устанавливалось длительное время. Для программы Cobra тоже отмечено длительное время установки и дружелюбный интерфейс, не требующий от пользователя дополнительных

усилий. С другой стороны, NVDA продемонстрировала самую высокую скорость установки и отсутствие дополнительных требований к действиям пользователя (см. таблицу 1).

Эксплуатация программ проводилась в среде Windows при работе с браузерами, основными приложениями редактирования текста (NotePad, MSOfficeWord), файловым менеджером. Для текстовых редакторов проверяли режим набора текста и его чтения, при этом оценивали количество ошибок и скорость работы приложения. Все рассмотренные продукты показали высокое качество анализа текста и неплохую скорость обработки (см. таблицу 1).

При работе с браузером отмечена невысокое качества обработки для JAWS, т.к. это приложения работает только со специально подготовленными сайтами для слабовидящих и слепых пользователей. Кроме того, Cobra более предназначена для слабовидящих людей, а не для слепых.

Работа с файловыми менеджерами для всех приложений не представляет проблемы в любом режиме эксплуатации (открытие каталогов, переходы между каталогами, закрытие и т.д.).

В процессе в работе с приложениями были отмечены следующие недостатки:

- JAWS плохо работает с браузером.
- Cobra ориентирована на слабовидящих людей.
- NVDA имеет плохой синтезатор речи (низкое качества синтезатора речи, с точки зрения интонационных окрасок и смысловых пауз).

По итогам экспериментов с JAWS, Cobra, NVDA удалось сформулировать следующие характеристики их основных свойств, которые приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Эксперименты	JAWS	Cobra	NVDA
Установка (мин)	18	12	5
Скорость работы программы	Реальное время	Задержки до 1-2 с.	Реальное время
Распознавание и чтения основными программами Windows	+	+/-	+
Распознавание и чтения браузера	+/-	-	+
Чтение книг	+	-	+/-
Платная	+	+	-

Анализ популярных скринридеров позволил выявить следующие проблемы:

- Нет возможности управлять программой голосовыми командами.

- Высокая стоимость развитых приложений.
- Нет возможности обеспечить активное взаимодействие с интерфейсом (отдавать команды по результатам прослушанной информации).

Это приводит к необходимости разрабатывать открытые, простые и обучаемые скринридеры, которые можно интегрировать в разные ОС и настраивать в соответствии с индивидуальными особенностями пользователя и его вычислительной среды.

Список литературы

[1] NVDA - Работать на компьютере без применения зрения [Электронный ресурс]. – <http://zhit-vmeste.ru/info/nvda> (дата обращения 22.03.2016)

[2] Программа JAWS [Электронный ресурс]. – <http://ivransis.ru/index.php/programma-jaws>(дата обращения 18.03.2016)

[3] Работа незрячих людей с компьютером: правда или ложь? [Электронный ресурс]. – <http://www.skp365.ru/solutions/209> (дата обращения 21.03.2016)

[4] Что такое скринридер[Электронный ресурс]. – <http://sds.ktu10.com/node/62>(дата обращения 18.03.2016)

Антонов Сергей Александрович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: AntonovSA88@Gmail.com

Корлякова Мария Олеговна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

А.А. Брынза, А.В. Ермоленко, М.О. Корлякова

ВОПРОСЫ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ АВТОРА ПОЧЕРКА ПОСРЕДСТВОМ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

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

Компьютерная модель идентификации предполагает наличие базиса уникальных характеристик рукописного текста. В рамках поставленной задачи считаем априорно детерминированными два класса характеристик:

- Общие геометрические характеристики рукописного текста
- Характерные черты написания отдельной буквы.

Функционирование решающего устройства при подобном методе идентификации является синтезом нелинейной математической детерминирующей модели преобразованных посредством кластеризации и фильтрации групп характеристик [1].

Определение каждой группы характеристик позволяет выделить следующие параметры:

- Первая группа - угол наклона букв, средняя высота букв, относительный межстрочный интервал, средняя ширина горизонтального пробела, минимальная ширина пробела, максимальная ширина пробела, средний угол наклона строк, максимальный угол наклона строк, минимальный угол наклона строк, максимальный угол разброса строк;
- Вторая группа – включает в себя различные виды межбуквенного соединения (прямые штрихи, 3-х, 4-х лучевые соединения, петли).

Для определения информативности признаков, содержащихся в нормированной выборке с приведением к единому диапазону величин 0..100, использованы методы представления данных в нечетких множествах. Построены треугольные и гауссовские распределения величин признаков всех параметров для различных авторов одинакового текста. Анализ разделимых множеств показывает принципиальную возможность решения задачи идентификации на основе существующей признаковой базы. Вместе с тем, большая дисперсионность признаков не позволяет использовать линейные методы разделения множеств. Определение информативности различных признаков позволяет поставить для него в соответствие некоторый входной весовой коэффициент, который определит степень влияния признака на выходной результат [2]. В качестве коэффициента, оценивающего информативность признака, предлагается использовать отношение площади общей части графиков к суммарной площади. Тогда коэффициент информативности j -го признака μ_j может быть представлен в следующем виде:

$$\mu_j = \frac{\int_{false_min_j}^{t_per_j} f_false_j(x) dx + \int_{true_max_j}^{t_per_j} f_true_j(x) dx}{\int_{false_min_j}^{false_max_j} f_false_j(x) dx + \int_{true_min_j}^{true_max_j} f_true_j(x) dx},$$

где t_per – точка пересечения графиков; $false_min, false_max, true_min, true_max$ – начальные и конечные точки функций различных и идентичных авторов соответственно.

В работе проведены исследования различных алгоритмов решающих моделей. Изучены возможности применения нечетких моделей, в том числе с выводом по Мамдани. Установлены существенные достоинства данной модели в скорости работы алгоритмов. Вместе с тем, значительная ошибка выхода решателя не позволяет применять данные алгоритмы в условиях поддержки принятия решений при идентификации рукописных документов.

Проведен анализ применимости различных топологий нейронных сетей и методологий их обучения применительно к решению задачи идентификации на основе существующей признаковой базы. Выход нейросети показывает являются ли два введенных образца экземплярами одного и того же автора или нет. Согласно данной постановке задачи уместно рассматривать в качестве обучающей и тестирующей выборки нейросети не матрицу прямых входов параметров образцов, а матрицу разностей значений между образцами. Это позволяет в N раз (где N – число образцов по черка в выборке) увеличить размер обучающей выборки.

В исследовании изучены и опробованы возможности применения различных топологий нейронных сетей, в том числе радиально-базисных и вероятностных, обоснованы нюансы неприменимости нейронных сетей Хопфилда и самоорганизующихся карт Кохонена [3]. Среди различных нейросетевых архитектур наиболее приемлемый результат ожидаемо демонстрируют сети на алгоритмах обратного распространения ошибки с тангенсно-сигмоидной функцией активации с $a = \tan sig(n)$. Выбор итоговой нейросетевой архитектуры проведен на основе экспериментального анализа наиболее распространенных методов оптимизации процедуры обучения многослойного персептрона. В частности путем эмуляции нейросетей рассмотрены результаты обучения и тестирования сетей, основанных на методе наискорейшего спуска, квазиньютоновском методе и методе Левенберга-Маркуа. Меньшую ошибку обобщения при оптимальном времени обучения демонстрирует квазиньютоновская модель обучения синтезированной для двухслойной сети. Первый слой сети представляет пять нейронов с тангенсно-сигмоидной функцией активации. Второй слой состоит из одного нейрона с линейной функцией активации. Предельное количество эпох в цикле обучения было установлено равным 2000. Проведенные испытания готового программного продукта (рис. 1,2) демонстрируют однозначную разделимость на выходе нейросети как по строковым, так и по символьным параметрам.

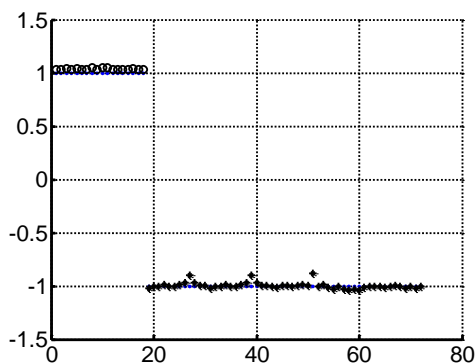


Рис. 1. Результаты тестирования первой группы (общетекстовых)

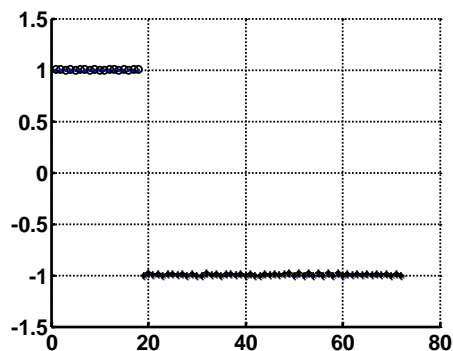


Рис. 2. Результаты тестирования второй группы параметров символьных

В результате исследований сформирована система поддержки принятия решений, способная идентифицировать автора рукописного текста. Проанализированы и изучены свойства различных идентифицирующих моделей в условиях данного входного набора признаков. Синтезирована модель блока принятия решения.

Список литературы:

[1] Горошко И.В. Математическое моделирование в управлении органами внутренних дел. – М.: Акад. управ. МВД России, 2000

[2] Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в пяти тт.; 2-е издание изд., перераб. и доп. Т. 5.: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 744 с.

[3] Комарцова Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004 – 397 с.

Брынза Андрей Андреевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: wolf_93_21@mail.ru

Ермоленко Алексей Владимирович - соискатель, академия управления МВД России. E-mail: ermolenko@rambler.ru

Корлякова Мария Олеговна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Окар Мин, Чжо Ту Аунг

ВЫЧИСЛЕНИЕ МАТРИЧНОГО ОПЕРАТОРА УМНОЖЕНИЯ ДВУХ ПРОЦЕССОВ

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

В проекционно-матричных методах анализа и синтеза систем управления используются матричные операторы сложения, интегрирования, дифференцирования, умножения на известную функцию. Операция умножения двух процессов является нелинейной операцией. Для вычисления матричного оператора этого преобразования можно воспользоваться идеей замены нелинейного звена эквивалентным матричным оператором [1]. В результате построенные алгоритмы анализа и синтеза будут содержать дополнительные итерационные процедуры. В работе показывается, что если нелинейный элемент представляет собой операцию умножения двух сигналов, то можно рассчитать матричный оператор этой операции, тем самым избежать дополнительных итерационных процедур в алгоритмах анализа и синтеза систем управления. Используя матричный оператор умножения двух процессов можно найти спектральную характеристику процесса на выходе нелинейного элемента, который довольно точно аппроксимируется полиномами.

Представим два процесса $x(t)$ и $y(t)$ в виде следующих разложений.

$$x(t) = \sum_{i=1}^l c_i^x \phi_i(t), \quad y(t) = \sum_{j=1}^l c_j^y \phi_j(t), \quad (1)$$

или

$$x(t) = \mathbf{\Phi}^T(t) \mathbf{C}^x, \quad y(t) = \mathbf{\Phi}^T(t) \mathbf{C}^y,$$

где $\mathbf{C}_{l \times 1}^x = [c_1^x \quad c_2^x \quad \dots \quad c_l^x]^T$, $\mathbf{C}_{l \times 1}^y = [c_1^y \quad c_2^y \quad \dots \quad c_l^y]^T$ – вектор-столбец коэффициентов разложения, $\mathbf{\Phi}_{l \times 1}(t) = [\phi_1(t) \quad \phi_2(t) \quad \dots \quad \phi_l(t)]^T$ – вектор-столбец базисных функций с весом $\rho(t)$ (нижний индекс здесь и далее означает размер матрицы или вектора).

Поставив следующую задачу: найти матричный оператор, связывающий спектральные характеристики процессов $x(t)$, $y(t)$, и спектральную характеристику произведения этих процессов (рис.1).

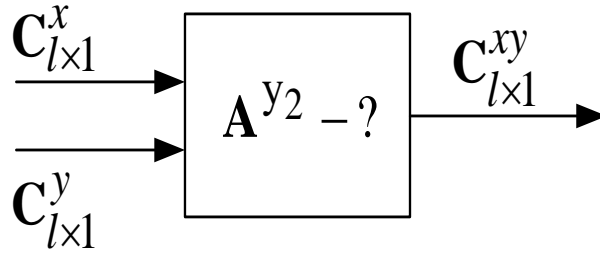


Рис. 1. К постановке задачи вычисления матричного оператора

С учетом (1) имеем

$$\begin{aligned}
 x(t)y(t) &= \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l c_i^x c_j^y \varphi_i(t) \varphi_j(t), \\
 \int_0^T \rho(t)x(t)y(t)\varphi_z(t)dt &= \int_0^T \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l c_i^x c_j^y \varphi_i(t)\rho(t)\varphi_j(t)\varphi_z(t)dt, \quad z = \overline{1, l}, \\
 \mathbf{C}_{l \times 1}^{xy} &= \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l c_i^x c_j^y \int_0^T \varphi_i(t)\varphi_j(t)\varphi_z(t)dt, \quad z = \overline{1, l}, \\
 \mathbf{C}_{l \times 1}^{xy} &= \mathbf{A}_{l \times l^2}^{y2} \cdot \left(\mathbf{C}_{l \times 1}^x \otimes \mathbf{C}_{l \times 1}^y \right)_{l^2 \times 1}, \tag{2}
 \end{aligned}$$

где \otimes – кронекерово произведение двух векторов (матриц), $\mathbf{A}_{l \times l^2}^{y2}$ – матрица умножения двух процессов, элементы которой представляют интегралы

$$I_{ijz} = \int_0^T \rho(t)\varphi_i(t)\varphi_j(t)\varphi_z(t)dt, \quad i = \overline{1, l}, \quad j = \overline{1, l}, \quad z = \overline{1, l}. \tag{3}$$

Структура строки z матрицы $\mathbf{A}_{l \times l^2}^{y2}$ имеет следующий вид:

$$\mathbf{A}_{l \times l^2}^{y2}(z) = \int_0^T \left[\left(\Phi(t)^T \right)_{1 \times l} \otimes \left(\Phi(t)^T \right)_{1 \times l} \right] \rho(t)\varphi_z(t)dt, \quad z = \overline{1, l} \tag{4}$$

Таким, образом заранее рассчитав значения интегралов (3) можно найти матрицу умножения двух процессов.

Далее приведем одну из реализаций вычисления матричного оператора (4) в среде MATLAB, в случае если базис является дискретным:

```

function Ay2=m_ymn2(H)
%Матрица умножения в базисе функций Уолша, упорядоченных по
Адамару
%операция умножения двух процессов
N=length(H);

```

```

Ay2=zeros(N,N^2);
k=0;
for i=1:N
    for j=1:N
        k=k+1;
        HH=H(i,:).*H(j,:);
        Ay2(:,k)=f_yol(HH',H);
    end
end
end

```

Пусть нелинейный элемент аппроксимируется следующим полиномом:

$$F(x) = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x^1 + a_0,$$

тогда используя матричный оператор $\mathbf{A}_{l \times l^2}^{y_2}$, можно вычислить спектральную характеристику сигнала, полученного в результате нелинейного преобразования через спектральную характеристику \mathbf{C}^x :

$$\mathbf{C}^{F(x)} = a_3 \mathbf{A}_{l \times l^2}^{y_2} \left(\mathbf{C}^x \otimes \mathbf{C}^{x^2} \right) + a_2 \underbrace{\mathbf{A}_{l \times l^2}^{y_2} \left(\mathbf{C}^x \otimes \mathbf{C}^x \right)}_{\mathbf{C}^{x^2}} + a_1 \mathbf{C}^x + a_0.$$

Такой прием позволяет при анализе и синтезе систем управления проекционно-матричными методами избежать дополнительных итерационных процедур.

Список литературы

[1] Пупков К.А., Егунов Н.Д., Колесников Л.В., Лукашенко Ю.Л., Мельников Д.В., В.М. Рыбин, Трофимов А.И. Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егунова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 664 с.

Окар Мин – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: okkamin49@gmail.com

Чжо Ту Аунг – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kyawthuaung310@gmail.com

Н.В. Аксенов, Ю.П. Корнюшин

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ МОДУЛЕМ В ПАКЕТЕ MATLAB IDENTIFICATION TOOLBOX

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

Введение. Современной тенденцией в эксплуатации сельскохозяйственных машин является не только повышение качества обработки земли, но и снижение нагрузок на силовые элементы агрегатов. Этого можно достичь различными способами. Существуют разработки по применению упругодемпфирующих устройств, изменяющих характеристики ведущих колес машины. Другим путем решения задачи является использование дополнительного прицепа (транспортно-технологического модуля, ТТМ) с ведущими колесами. Он позволяет повысить тяговую силу агрегата за счет реализации излишка мощности, заложенной в трактор. Исследование упругодемпфирующих свойств ТТМ представляет определенный интерес, поскольку его использование может существенно снизить динамическую нагрузку на трансмиссию и двигатель трактора.

Для оценки демпфирующих свойств ТТМ необходимо иметь математическую модель объекта и экспериментально полученные характеристики нагрузок на различных элементах конструкции. Поскольку нагрузки на ТТМ, действующие через рабочие инструменты (борона, плуг, и т.д.) и через точки контакта с землей (колеса), носят случайный характер, то для идентификации мат. модели необходимо иметь вероятностные характеристики этих нагрузок. В работе [1] выполнена оценка спектральных плотностей нагрузок на крюк ТТМ и крюк трактора.

Структурная схема идентифицируемой системы имеет вид, представленный на рис. 1.

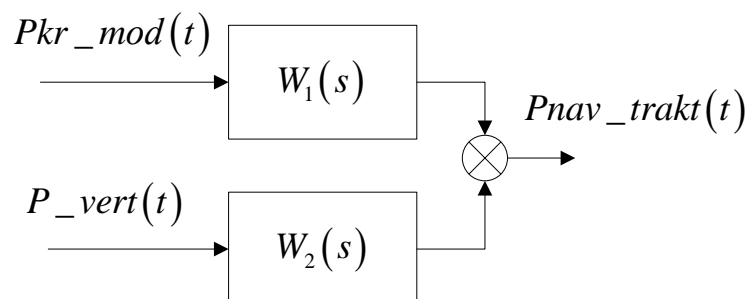


Рис. 1. Структурная схема объекта ТТМ-трактор
 $P_{kr_mod}(t)$ – нагрузка на крюке модуля, $P_{vert}(t)$ – вертикальные нагрузки от неровности поверхности, $P_{nav_trakt}(t)$ – нагрузки на навеске трактора

Для параметрической идентификации целесообразно использовать среду MATLAB с пакетом расширения Identification Toolbox.

Описание программы. Пакет расширения вызывается вводом команды `ident` в командном окне MATLAB. На рис. 2. Представлено главное окно Identification Toolbox.

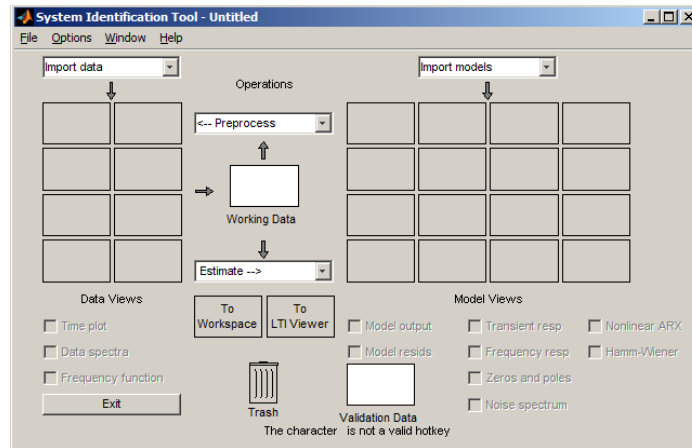


Рис. 2. Главное окно пакета Identification toolbox

С помощью данного инструмента можно проводить идентификацию моделей в различных формах – авторегрессионные модели, пространство состояний и т.д. Входные данные могут быть как временными характеристиками, так и частотными (спектральная плотность). Как входы, так и выходы могут быть векторными величинами.

Данные могут быть подвергнуты предобработке, включающей фильтрацию, удаление тренда, выделение отдельных участков функции, и т.д.

В окне, приведенном на рис. 3, выбираются параметры линейной модели, указывается порядок и тип модели. Так же может быть выбран метод параметрической идентификации, критерий оптимизации и т.д.

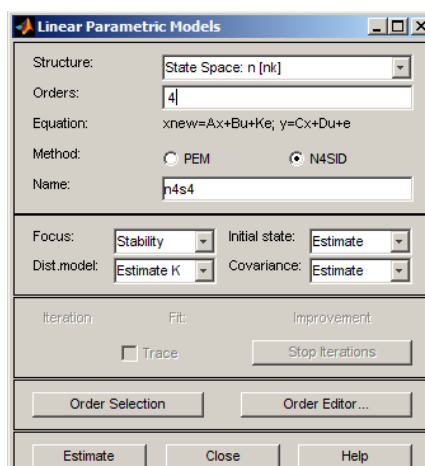


Рис. 3. Окно выбора структуры линейной модели

После выполнения процедуры идентификации можно визуализировать результаты в виде сравнения исходных характеристик и полученных по модели. Критерий Best Fits позволяет количественно оценить близость

полученных выходных наборов данных от 0 до 100%, где 100% означает наиболее близкий результат. На рис. 4 показан пример окна визуализации исходного и полученного сигналов выхода системы [2].

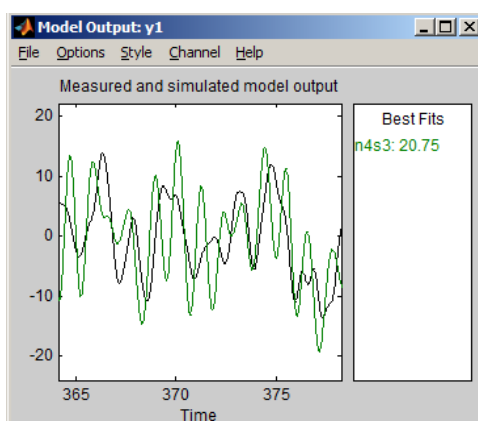


Рис. 4. Сравнение временных характеристик исходного и полученного наборов данных

Результатом работы программы является математическая модель идентифицируемого объекта либо в форме пространства состояний, либо в форме передаточной функции. Коэффициенты передаточной функции могут быть анализированы для получения значений физических параметров модели.

Заключение. Пакет Identification Toolbox является удобным средством для параметрической идентификации систем, что позволит быстро определить физические параметры модели при известной структуре и наличии экспериментальных данных.

Литература

[1] Оценка вероятностных характеристик случайных процессов при исследовании демпфирующих свойств машинно-тракторного агрегата с технологическим модулем. Научно-технические материалы Региональной научно-технической конференции, 19–21 апреля 2016 г. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016

[2] Материалы по продуктам MATLAB & Toolboxes – Identification Toolbox – Математика

[3] <http://matlab.exponenta.ru/systemidentific/index.php> (Дата обращения 29.03.2016)

[4] Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Том 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления – Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 654 с.

Аксенов Никита Владимирович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: n.aksenov2015@yandex.ru

Корнюшин Юрий Петрович - д-р техн. наук, зав. каф. "Системы автоматического управления" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: theroland@yandex.ru

А.В. Аксенов, В.И. Краснощеченко

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА Д-600ТФ

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

Двигатель постоянного тока Д-600ТФ является основной частью механизмов горизонтального и вертикального наведения опорно-поворотного устройства (ОПУ). Для автоматизации работы данного устройства необходимо провести идентификацию параметров двигателя Д-600ТФ, среди которых коэффициент вязкого и момент сухого трения, а также момент инерции якоря двигателя.

В данной статье представлены результаты параметрической идентификации двигателя постоянного тока Д-600ТФ. На первом этапе проводится расчет коэффициента вязкого трения и момента сухого трения. Второй этап включает расчет момента инерции якоря двигателя двумя способами: аналитическим и на основе эксперимента по выбегу.

Идентификация момента сухого трения и коэффициента вязкого трения.

Запишем уравнение динамики двигателя постоянного тока (ДПТ):

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{ep} - M_s - M_v, \quad (1)$$

где $M_{ep} = k_m i$ – момент вращения двигателя (i – ток якоря), M_s – момент сухого трения, $M_v = \nu \omega$ – момент вязкого трения (ν – коэффициент вязкого трения, ω – скорость вращения двигателя).

В уравнении (1) k_m – постоянная момента ДПТ по току ротора. Данный коэффициент рассчитываем по паспорту двигателя Д-600ТФ, в котором указан номинальный момент $M_n = 1 \text{ Нм}$ при номинальной скорости $n_{об} = 6000 \text{ об / мин}$ или $\omega_n = 628 \text{ рад / с}$.

Так как $M_n = M_{ep} = k_m i_n$, необходимо вычислить номинальный ток i_n .

По паспорту номинальная мощность $P_n = 600 \text{ Вт}$ при напряжении якоря $U_n = 27 \text{ В}$. Исходя из этого $i_n = \frac{P_n}{U_n} = \frac{600}{27} \approx 22 \text{ А}$.

Таким образом, $k_m = \frac{M_n}{i_n} = \frac{1}{22} \approx 0.05 \text{ Нм / А}$.

Рассмотрим уравнение (1) в установившемся режиме ($J \frac{d\omega}{dt} = 0$):

$$k_m i_\infty^{(i)} - M_s - \nu \omega_\infty^{(i)} = 0, \quad (2)$$

где $i = 1:N$ – номер эксперимента, индекс ∞ означает установившееся значение соответствующей переменной.

Далее проводим N -экспериментов ($N = 33$) по фиксации значений тока якоря и скорости вращения двигателя в установившемся режиме при различных значениях подаваемого напряжения. Результаты экспериментов сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

№ эксп.	$U_{я}, B$	i_{∞}, A	$\omega_{\infty}, рад / с$	№ эксп.	$U_{я}, B$	i_{∞}, A	$\omega_{\infty}, рад / с$
1	1,7	1,07	6,78	18	5,0	1,18	70,52
2	1,7	1,08	6,78	19	6,0	1,18	89,55
3	1,7	1,08	6,59	20	6,0	1,18	91,69
4	2,0	1,10	11,74	21	6,0	1,18	92,13
5	2,0	1,09	11,74	22	7,0	1,19	111,53
6	2,0	1,10	11,93	23	7,0	1,19	111,78
7	3,0	1,12	30,08	24	7,0	1,20	112,29
8	3,0	1,11	30,65	25	8,0	1,21	131,57
9	3,0	1,11	31,02	26	8,0	1,22	131,57
10	3,5	1,13	40,44	27	8,0	1,22	131,57
11	3,5	1,12	40,57	28	8,5	1,24	141,93
12	3,5	1,12	40,63	29	8,5	1,24	142,49
13	4,0	1,14	50,24	30	8,5	1,24	142,62
14	4,0	1,14	50,37	31	9,0	1,24	152,67
15	4,0	1,15	50,43	32	9,0	1,24	152,92
16	5,0	1,18	70,02	33	9,0	1,24	152,60
17	5,0	1,18	70,15				

Уравнение (2) в матричной форме по всем экспериментам имеет вид:

$$\Phi \theta = \mathbf{b}, \quad (3)$$

где $\Phi = \begin{pmatrix} 1 & \omega_{\infty}^{(1)} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \omega_{\infty}^{(N)} \end{pmatrix}$, $\theta = \begin{pmatrix} M_s \\ \nu \end{pmatrix}$, $\mathbf{b} = \begin{pmatrix} k_m i_{\infty}^{(1)} \\ \vdots \\ k_m i_{\infty}^{(N)} \end{pmatrix}$.

Решение для переопределенной системы (3) найдем по методу наименьших квадратов:

$$\theta^T = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{b}. \quad (4)$$

Таким образом, переопределенная система разрешена относительно идентифицируемых параметров M_s и ν . В результате получаем: $M_s = 0.054 Нм$, $\nu = 6 \cdot 10^{-5} Нм / (рад / с)$.

Аналитический расчет момента инерции якоря.

Так как якорь состоит из стального ротора и медной обмотки, в качестве его плотности возьмем среднее арифметическое стали и меди:

$$\rho = \frac{\rho_c + \rho_m}{2} = \frac{7850 + 8940}{2} \approx 8395 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Считая ротор сплошным цилиндром, определяем его момент инерции по известной формуле[1]:

$$J = \frac{mR^2}{2} = \frac{\rho VR^2}{2} = \frac{\pi \rho R^4 l}{2}, \quad (5)$$

где m – масса ротора, $R = 0.02\text{м}$ – радиус основания цилиндра, $l = 0.15\text{м}$ – длина цилиндра.

В результате, момент инерции равен:

$$J = \frac{\pi \rho R^4 l}{2} = \frac{\pi \cdot 8395 \cdot 0.02^4 \cdot 0.15}{2} \approx 0.00032 \text{кг} \cdot \text{м}^2.$$

Расчет момента инерции якоря на основе эксперимента по выбегу.

Второй способ расчета момента инерции якоря основан на результатах эксперимента по выбегу (неустановившемуся режиму работы двигателя при постепенно уменьшающейся скорости после прекращения подачи напряжения).[2]

Для двигателя постоянного тока уравнение кривой скорости при выбеге имеет вид:

$$\dot{\omega} = -a\omega + c, \quad (6)$$

где $a = \frac{\nu}{J}$, $c = -\frac{M_s}{J}$.

Найдем решение уравнения (6):

$$\omega(t) = e^{-at} \omega_0 + \int_0^t e^{-a(t-\tau)} c d\tau = e^{-at} \omega_0 + e^{-at} c \int_0^t e^{a\tau} d\tau = e^{-at} \omega_0 + \frac{c}{a} (1 - e^{-at}). \quad (7)$$

Далее экспериментально получим кривую выбега двигателя Д-600ТФ и сравним ее с аналогичной кривой, рассчитанной теоретически (рис. 1).

Исходя из экспериментальной кривой выбега, можно предположить, что здесь имеет место линейный закон, где по предположению доминирует момент сухого трения.

В этом случае, считаем $a \approx 0$, соответственно $e^{-at} \approx 1$, тогда инте-

гральная часть уравнения (6) примет вид $\int_0^t e^{a\tau} d\tau = t$.

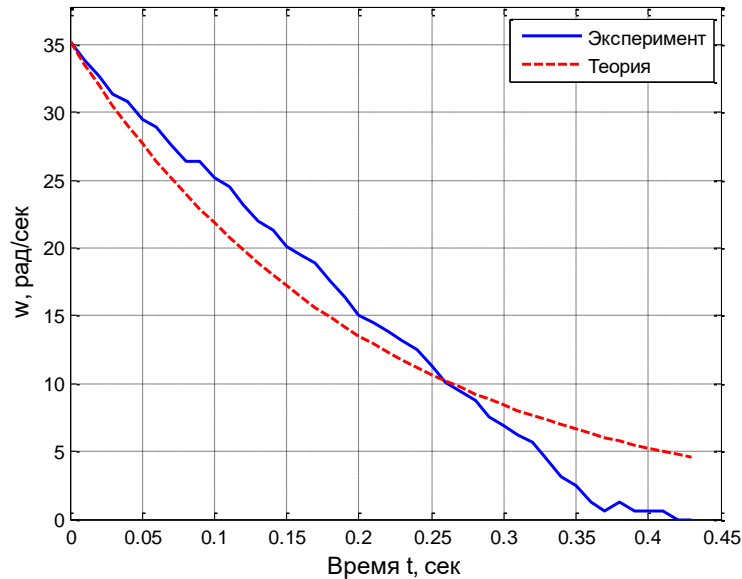


Рис. 1. Теоретическая и экспериментальная кривая выбега двигателя Д-600ТФ

Таким образом, зависимость скорости вращения от времени приближенно представляется в виде уравнения прямой:

$$\omega(t) = \omega_0 - ct, \quad (8)$$

где $c = \frac{M_s}{J}$, ω_0 – скорость при $t = 0$.

После обработки результатов эксперимента в среде Matlab, получено приближенное значение коэффициента $c \approx 90.67$.

$$\text{Таким образом, } J = \frac{M_s}{c} = \frac{0.054}{90.67} \approx 0.000595 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

В результате расчета момента инерции двумя способами были получены близкие (одного порядка) результаты.

По итогам работы проведена оценка момента сухого трения и коэффициента вязкого трения. Кроме того, двумя способами рассчитан момент инерции якоря, что позволило подтвердить корректность оценки момента сухого трения.

Список литературы

[1] Википедия — Электронная энциклопедия [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Момент_инерции (дата обращения: 16.03.2016).

[2] Википедия — Электронная энциклопедия [Электронный ресурс] URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Выбег> (дата обращения: 17.03.2016)

Аксенов Анатолий Валерьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: an.aksionov2014@yandex.ru

Краснощеченко Владимир Иванович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kviip@yandex.ru

Е.Ю. Кочеткова, А.А. Брынза, М.О. Корлякова

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СТЕРЕОПАРЫ КАМЕР И ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

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

Современный мир развивается быстрыми темпами, в особенности это касается цифровых технологий. Задачи, которые невозможно было решить еще 20-30 лет назад, сегодня вычисляются компьютерами за доли секунд. Многие темы, связанные с большими компьютерными вычислениями, становятся все более актуальными, а потому и более примечательными для разработчиков. Таким образом, очень молодая, но от того не менее популярная тема компьютерного (технического) зрения стала основой данной работы.

Рассмотрим одну из важных задач систем технического зрения (СТЗ) – задачу формирования модели камеры в условиях изменяющихся параметров внешней среды, а так же предложим способы ее решения. Так целями представленной работы являются:

- провести внешнюю и внутреннюю калибровку стереопары;
- определить упрощенную модель анализа глубины на основе диспаратитета проекций точек трехмерной сцены в стереопаре;
- оценить изменение параметров стереопары в зависимости от освещенности и температуры.

Целью задачи формирования модели камер СТЗ по паре изображений является вычисление трехмерных координат каждой точки сцены, запечатленной на данных изображениях. Для определения параметров используем теоретическую модель вычисления глубины.

Калибровка камеры – это задача получения внутренних и внешних параметров камеры по имеющимся фотографиям или видео, отснятым этой камерой [1].

Параметры внешней калибровки, определяют преобразование координат, переводящее координаты точек сцены из мировой системы координат в систему координат, связанную с камерой $\mathbf{M} = [\mathbf{R}, \mathbf{T}]$, где \mathbf{R} – матрица 3×3 поворота, \mathbf{T} – вектор 3×1 переноса.

Матрица внутренней калибровки \mathbf{I} содержит 5 значимых параметров.

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Параметры α_x и α_y соответствуют фокусному расстоянию, измеренному в ширинах и высотах пикселей, u_0 и v_0 – координатам принципиальной точки, а $\gamma = \alpha_y * \tan \varphi$, где φ – угол наклона пикселей. Нелинейные

параметры внутренней калибровки, такие как коэффициенты дисторсии, также имеют большое значение, хотя и не могут быть включены в линейную модель, описываемую матрицей внутренней калибровки. Большинство современных алгоритмов калибровки камеры определяет их вместе с параметрами линейной части модели.

Выбор калибровочного шаблона был сделан в пользу рисунка «шахматная доска». Основным аргументом выбора является использование данного шаблона в классическом подходе калибровки камер, также к плюсам следует отнести высокую контрастность изображения и, как следствие, легкое выделение параллельных прямых, образованных гранями черных квадратов. В процессе работы был использован шаблон, изображенный на формате А4, который имел размерность 9x7 клеток с размером клетки 22x22 мм. Пример калибровочного шаблона приведен на Рисунке 1.

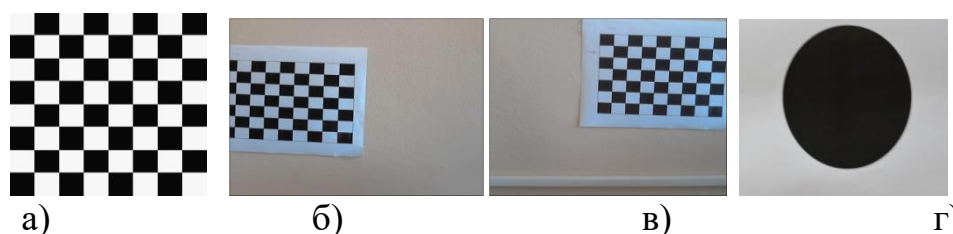


Рис. 1. Пример калибровочного шаблона а) и стереопара кадров (б, в), шаблон для определения освещенности

Для получения калибровочных стереопар следует располагать систему стереозрения на разных расстояниях от плоскости шаблона и угол наклона стереобазы не должен заметно отличаться от горизонтали шаблона.

Иллюстрация изображений приведена на Рисунке 1 (б, в). Для реализации задачи калибровки применялся открытый код «Camera Calibration Toolbox for Matlab® by Jean-Yves Bouguet» являющийся дополнительным пакетом MATLAB[2].

Для калибровки стереопары было использовано 14 фотографий (7 пар изображений). На данном этапе выполняется вычисление x координат сопряженных точек выделенной на изображениях области и вычисление координат шаблона X . Пример изображений приведен на Рисунке 2.

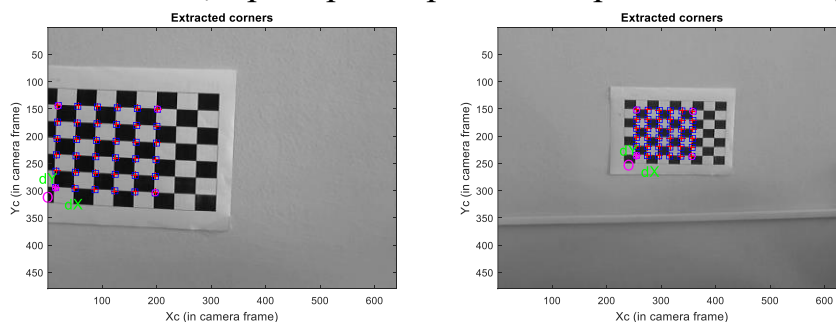


Рис. 2. Координаты выделенной области на изображениях

Результаты внутренней калибровки камеры представлены ниже:

Calibration parameters after initialization:

```
Focal Length:      fc = [ 4921.75774  4921.75774 ]
Principal point:   cc = [ 319.50000  239.50000 ]
Skew:              alpha_c = [ 0.00000 ] => angle of pixel = 90.00000 degrees
Distortion:        kc = [ 0.00000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000 ]
```

На этапе внешней калибровки получены параметры системы двух камер (Таблица 1).

Таблица 1. Параметры системы стереозрения

Параметр	Левая камера	Правая камера
Матрица поворота, R	$\begin{pmatrix} 0.9741 & 0.2212 & -0.0477 \\ 0.2175 & -0.9734 & -0.0712 \\ -0.0622 & -0.0590 & -0.9963 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.9730 & 0.2280 & -0.0362 \\ 0.2280 & -0.9737 & -0.0037 \\ -0.0361 & -0.0046 & -0.9993 \end{pmatrix}$
Вектор перемещения, T	$\begin{pmatrix} -536.9 \\ 65.8 \\ 1063.3 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 49.0 \\ 0.5 \\ 1058.7 \end{pmatrix}$

Рассмотрим влияние температуры и освещенности на результаты калибровки камер.

Для анализа температурных изменений был проведен следующий эксперимент: - фиксируем температуру среды $[22^\circ, 2^\circ, -2^\circ]$, проводим съемку калибровочных стереопар, вычисляем параметры калибровки. Для проверки зависимости результатов калибровки от температуры было использовано 18 фотографий (9 пар изображений).

Следующий эксперимент устанавливает связь освещенности и параметров камер. Для измерения освещенности используем цифровой фотоаппарат и белый лист бумаги с тестовым изображением (в средней части листа размещена окружность радиуса 5-6 см.). Это ориентир, на котором будем фокусировать камеру. Шаблон представлен на Рисунке 1(г).

Далее измеряем освещенность и проводим внутреннюю калибровку (10 фотографий (5 пар изображений)). После выполнения калибровки камер, построим график зависимости R - расстояния, с которого выполнялись

снимки, от a , где $a = j \frac{см}{pix}(R)$ - коэффициент, определяющий отношение

координат в сантиметрах самого шаблона к координатам выделенной прямоугольной области на изображении в пикселях.

В качестве примера приведем один из результатов тестирования модели при разных параметрах окружающей среды на Рисунке 3. Результаты анализа экспериментальной информации показали, что в исследованных диапазонах зафиксировать изменение характеристик камеры представленным методом калибровки невозможно. Таким образом, можно считать, что с точностью калибровки параметры камеры не зависят от внешних условий освещенности и температуры.

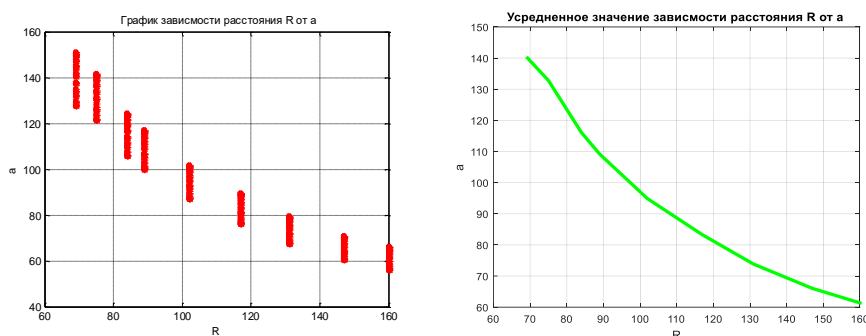


Рис. 3. Графики зависимости R от a для 9-ти пар изображений, снятых при $T = +2^{\circ}\text{C}$ и его усредненное значение

Следующий этап формирования стереосистемы технического зрения – организация эффективного подключения пары камер к вычислительной системе для обработки кадров при решении реальных задач. Рассмотрим вариант использования SCADA системы LabView.

LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) – представляет собой среду разработки прикладных программ. В ней используется интуитивно понятный язык графического программирования. Освоение данного языка не требует знания традиционных языков программирования. Среда LabVIEW предоставляет широкие возможности для проведения вычислений и математического моделирования. В этом отношении среда LabVIEW конкурентоспособна с такими известными вычислительными системами, как MATLAB, MathCAD, Mathematica, MAPLE [3]. Наиболее полно возможности LabVIEW раскрываются при создании приборов и систем предназначенных для измерений физических величин в различного вида экспериментах, лабораторных и промышленных установках. Важным достоинством LabVIEW является возможность управления процессом измерения в автоматическом или интерактивном режиме. Для обработки и анализа данных используется обширный набор функциональных библиотек (общего назначения и специализированных). Взаимодействие с оператором осуществляется с помощью продуманного и простого в программировании графического интерфейса. С помощью программ-драйверов среда LabVIEW эффективно взаимодействует с различными платами ввода/вывода аналоговых и цифровых сигналов, модулями ввода видеосигналов, а также со специализированными модульными приборами (осциллографы, анализаторы спектра, генераторы сигналов и т.д.) [4]. Система позволяет сформировать средства ввода и вывода данных этого виртуального прибора (Рисунок 4) [5].

В качестве основных компонентов при работе с устройством видеозахвата выступают блоки IMAQ USB Enumerate Camera, IMAQ USB Int, IMAQ USB Grab Setup, IMAQ USB Grab Acquire и IMAQ USB Close. Данные компоненты отвечают за подключение устройства, настройку захвата, и получение конечного фрагмента. [6]. Помимо этого, собранная схема позволяет осуществлять запись видеопоследовательности в файл. Для корректной работы необходимо, чтобы были установлены специальные кодеки, и в рабочей версии программы имелась библиотека IMAQ Vision.

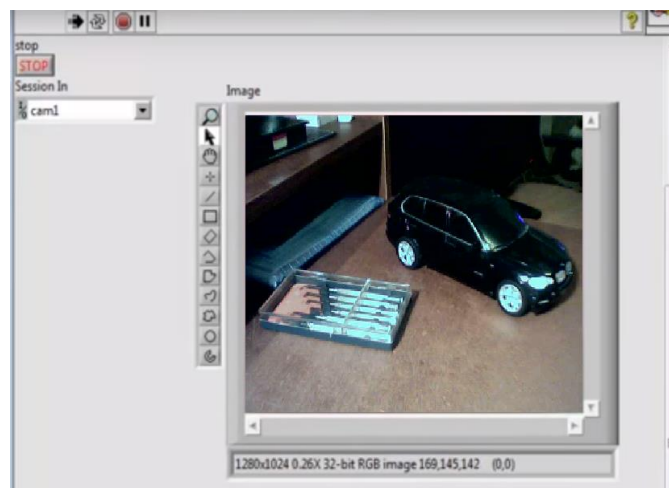


Рис. 4. Лицевая панель, демонстрирующая работу формируемой СТЗ

При работе с несколькими устройствами захвата, можно осуществлять переключение параметра $cam(i)$, находящееся в верхнем левом углу. Удобством использования данной среды является высокое быстродействие, которое значительно превосходит работу в среде Matlab, существующий более простой язык – графического программирования, интуитивно понятный начинающему пользователю.

Список использованных источников

[1] Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.

[2] Консультационный центр MATLAB компании Softline [Электронный ресурс]: И.М. Журавель. Image Processing Toolbox - Обработка сигналов и изображений. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/index.php>

[3] Климентьев Е.К. Основы графического программирования в среде LabVIEW. Учебное пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2002. - 65 с.

[4] USER GUIDE NI-IMAQ for USB Cameras National Instruments Corporation 2005 [Электронный ресурс] (Дата обращения 21.03.2016) URL: http://www.csun.edu/~rd436460/Labview/NIIMAQ_for_USB_Cameras_User_Guide.pdf

[5] Учебный курс LabVIEW. Основы I. National Instruments corp., 2002.

[6] Лупов С.Ю., Муякшин С.И., Шарков В.В., LabVIEW в примерах и задачах Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского // Нижний Новгород, 2007. [Электронный ресурс] (Дата обращения 20.03.2016) URL: <http://www.unn.ru/pages/e-library/aids/2007/87.pdf>

Кочеткова Елена Юрьевна - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: elena_kochetkova06@mail.ru

Брынза Андрей Андреевич - студент 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.А. Кузнецов, Р.А. Жуков, Мьят Мин Ай , М.О. Корлякова

МЕТОД ТРЕКИНГА ОБЪЕКТОВ СРЕДЫ

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

Современные системы технического зрения, с использованием обработки оптического потока набирают все большую и большую популярность. Данные системы могут работать за счет пространственных методов анализа среды, способны решать задачи трекинга и распознавания объектов сцены.

Трекингом называется определение местоположения движущегося объекта (или нескольких объектов) во времени с помощью камеры [1]. Алгоритм трекинга анализирует кадры видеопотока, определяет положение движущихся целевых объектов относительно кадра. Трекинг объектов на видео применяется во многих других сферах 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 [2].

Основная задача алгоритма трекинга – это последовательный анализ кадров видео для оценки параметров движения. Эти параметры характеризуют положение целевого объекта. При сопровождении объектов на видео необходимо извлечь структурированную информацию из видеопотока, учитывать временные и пространственные связи между кадрами, обрабатывать большое количество потоковых данных, что затратно с вычислительной точки зрения, создает сложность получения результатов в режиме реального времени. Для решение этой задачи, рассмотрим метод вычисления оптического потока по алгоритму Лукаса-Канаде [2].

Пусть оптический поток непрерывен во времени и пространстве, локальные изменения функции интенсивности не велики, на основании этого, в соответствии с градиентом во времени и пространстве, вычисляем направление изменения видеопотока.

Для этого используем окрестности пикселя, опираясь на сделанные ранее предположения о слабых изменениях потока в пространстве и во времени. На основании этого утверждения сделаем разложение $I(x, y, t)$ функции интенсивности в ряд Тейлора, где u, v, l -смещение e по пространственным координатам и времени.

$$I(x+u, y+v, t+l) = I(x, y, t) + \frac{dI}{dx}u + \frac{dI}{dy}v + \frac{dI}{dt}l \quad (1)$$

Сделаем допущение, что между кадрами проходит минимальный интервал времени, тогда можно сказать то производная по времени $I(x, y, t) - I(x, y, t + 1)$, следовательно

$$\frac{dI(x, y, t)}{dt} + u_x \frac{dI(x, y, t)}{dx} + u_y \frac{dI(x, y, t)}{dy} = 0 \quad (2)$$

Таким образом, получаем следующее уравнение оптического потока:

$$f(u, v, l) = I_x u + I_y v + I_t l \quad (3)$$

При этом возникает проблема апертуры [3] изображения, из-за того что для уравнение 3 недостаточно для определения неизвестных u и v . Для фрагмента изображения 2×2 пикселя необходимо решить 4 уравнения, т.к. система в общем случае не имеет решения, необходимо найти такие u_x и v , которые минимизируют ошибку. Общепринятая практика построения модели по методу Лукаса-Канады использует область вокруг текущего пикселя для поиска решения уравнения (3). Однако влияние пикселей области неоднородно. Для определения весовых коэффициентов обычно используется двухмерный Гауссиан, который дает наибольший вес центральному пикселю, а по мере удаления от центра – меньший. А для поиска минимума подойдет метод наименьших квадратов. [4]

Тогда на выходе получим уравнение в матричном виде: $M\vec{u} - \vec{b}$, где

$$M = \begin{bmatrix} \sum_{i,j} g(x_i, y_j) \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y}\right)^2 & \sum_{i,j} g(x_i, y_j) \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y} \\ \sum_{i,j} g(x_i, y_j) \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y} & \sum_{i,j} g(x_i, y_j) \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y}\right)^2 \end{bmatrix} \vec{u} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}$$

$$\vec{b} = - \begin{bmatrix} \sum_{i,j} g(x_i, y_j) \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial I}{\partial x} \\ \sum_{i,j} g(x_i, y_j) \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial I}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

В случае, когда матрица M обратима, вычисляем u_x, u_y , которые минимизируют ошибку: $\hat{u} = M^{-1}\vec{b}$.

Алгоритм Lucas-Kanade работает на трех допущениях, которые отрицательно влияют на результат. Протестируем стандартный алгоритм Lucas-Kanadeи модернизированные, а именно: Lucas-Kanadeпо блокам и Lucas-Kanade по особым точкам.

Для тестирования алгоритмов выбрано изображение (рис. 1.а), и сделана копия изображения, сдвинув на пиксель по диагонали, вверх и вниз (рис. 2). Также кадировали изображение на 5 и 10 пикселей.



Рис. 1. Исходное изображение а) и результат анализа по методу ЛК при диагональном смещении на пиксель б)

Сделано это для того, чтобы протестировать в «идеальных» условиях алгоритмы. Это значит, что используя такую схему можно будет наблюдать корректность работы того или иного метода при разных смещениях. Т.е. если второй кадр изображения сдвинут вверх относительно первого, то при идеальной работе алгоритма должны наблюдаться вектора направленные строго вверх.

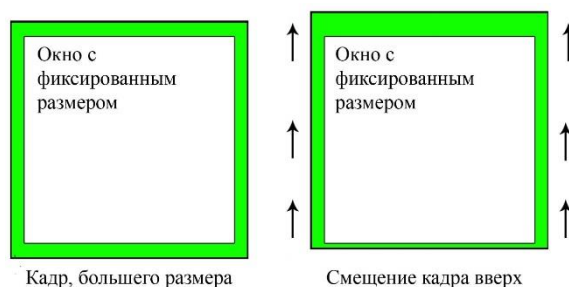


Рис. 2. Схема получения тестовой пары кадров

Следует отметить, что реализация стандартного Lucas-Kanade способна находить верные вектора исключительно на углах объектов, в случае линейных особенностей алгоритм работает только при сдвиге кадра в направлении перпендикулярном линейной особенности, что можно наблюдать на рисунке ниже (рис. 1.б).

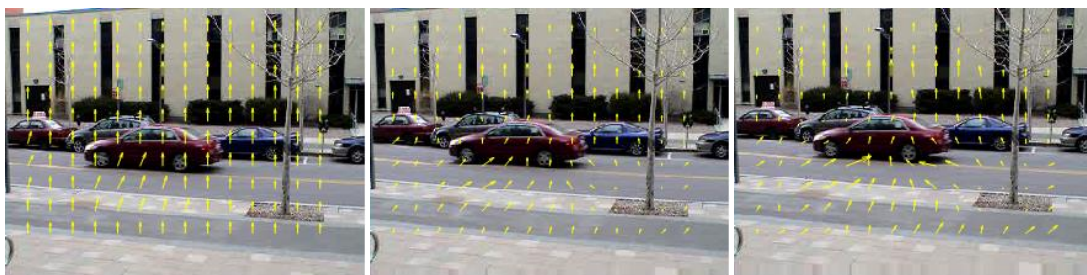
Таким образом, наилучший результат при отклонении на 1 пиксель показал метод Лукаса-Канаде по особым точкам, отклонение от «идеального» значения не существенное (в пределах 1 градуса). Что касается вычислительной сложности – стандартный Lucas-Kanade работает на порядок быстрее (0.16 сек. против 1.5 сек у метода по особым точкам).

Лукас-Канаде не способен хорошо детектировать движения при больших сдвигах по определению. При смещении в 5 пикселей в разы повышается отклонение от «идеального» значения, а при смещении в 10 пикселей Лукас-Канаде теряет связь между кадрами видеопоследовательности.

При небольшом смещении метод детектирует движение хорошо, отклонение можем наблюдать лишь в одной области, и то оно не существенно, т.к. в целом направление движения точно указывает вверх (рис. 3.а).

Алгоритм при большем смещении начинает хуже справляться с детектированием движения, можно выделить уже несколько областей с отклонениями, но в целом, как и при небольшом смещении, можем отметить, что поток идет вверх (рис. 3.б).

Ситуация со смещением в 10 пикселей аналогична предыдущему смещению, но стоит отметить, что с каждым смещенным пикселем Lucas-Kanade заметно хуже начинает детектировать движение (рис. 3.в). По определению он и не должен хорошо детектировать при больших смещениях, для этого существуют другие методы, например SimpleFlow.



а) на 1 пиксель

б) на 5 пикселей

в) на 10 пикселей

Рис. 3. Результаты применения метода Лукаса-Канаде при сдвигах на 1(а),5(б),10(в) пикселей

Прямая форма метода Лукаса-Канаде обладает довольно высокой вычислительной сложностью, рассмотрим модификации обеспечивающие снижение стоимости обработки. Первый вариант снижения времени обработки был рассмотрен выше. Метод Лукаса Канады для особых точек изображения позволяет снизить время обработки для тестового примера приблизительно в 10 раз. Однако этот эффект зависит от числа и качества особых точек. Рассмотрим подход связанный с изменением масштаба модели, т.е. применение метода Лукаса-Канады для сжатых изображений и последующего масштабирования результатов. В таблице 1 приведены результаты обработки тестового кадра отнесенные ко времени и качеству для изображения максимального масштаба.

Таблица 1.

Масштаб по x и y.	0,5	0,25	0.125	0.01
Время, в долях от максимального.	0.246	0.0664	0.0143	3.6e-04
Количество движущихся областей, в долях от максимального.	3/4	2/4	2/4	0

Из таблицы видно, что существенное искажение результатов наступает при сокращении изображения в 100 раз по каждой координате (изображение в 10^4 раз меньше исходного). С другой стороны сжатие изображения в 64 раза привело к потере часть информации и одновременно позволило сократить время вычислений в 69 раз.

Таким образом, применение метода Лукаса-Канады без дополнительных средств сокращения объема обработки приводит к большим потерям времени, а использование модификаций позволит решать задачи в темпе получения видеопотока.

Список литературы

[1] Рахманкулов В.З., Ахрем А.А., Герасимов В.В., Новиков О.А. Программно-алгоритмический комплекс распознавания образов многогранных объектов // Организационное управление и искусственный интеллект. М.: УРСС, 2003. с.208-224.

[2] Блог Павла Батанова.Трекинг точек. Lucas-Kanade [Электронный ресурс]. Многофункциональный сайт. URL: http://blog.scastrase.ru/computer_vision/369/ (дата обращения 26.10.2016).

[3]. Horn Berthold K.P., Schunck Brian G. Determining Optical Flow // Artificial Intelligence, 1981. – Vol. 17. – P. 185–203.

[4] Яне. Б. Цифровая обработка изображений, Москва: - Техносфера, 2007 – 575 с.

Кузнецов Денис Александрович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: OrionJM@yandex.ru

Жуков Роман Александрович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Roman.zhukov1@yandex.ru

Мьят Мин Ай - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jestin512@gmail.com

Корлякова Мария Олеговна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

А.А. Зюзин, Я.А. Долгов, А.В. Финошин, Ю.И. Мышляев

МЕТОДИКА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЯМИ МАЯТНИКА С УЧЕТОМ СИЛ ТРЕНИЯ

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

Введение. Рассматривается задача управления колебаниями маятника с учетом сил трения.

Задачи управления колебательными механическими системами имеют возрастающее практическое значение. Такие объекты, как правило, описываются системами нелинейных дифференциальных уравнений в гамильтоновой или лагранжевой формах.

Методика управления колебаниями консервативными системами широко известна [1, 2, 3]. Энергетический подход хорошо зарекомендовал себя в задачах стабилизации неустойчивого положения равновесия маятниковой системы (двойной маятник – Марк Спонг [3], маятник с маховиком – Андриевский [4], М. Спонг [3], маятник, тележка с маятником – Фрадков [2]). Задача адаптивного управления колебаниями консервативной системой рассмотрена в [5].

В работе рассматривается задача управления диссипативными системами. Рассмотрены два подхода синтеза алгоритма управления.

Постановка задачи. Модель маятника (рис. 1) представлена в нормальной форме Коши и состоит из выходной подсистемы S_1 и входной подсистемы S_2

$$S_1 : \begin{cases} \dot{q} = p, \\ \dot{p} = -\xi_1 \sin q - \xi_3 p + \xi_2 x_2. \end{cases} \quad (1)$$

$$S_2 : \dot{x}_2 = k u. \quad (2)$$

где $\mathbf{x}_1 = [q \ p]^T$ – вектор состояния маятника, $\boldsymbol{\xi} = [\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3]^T$ – вектор неизвестных параметров объекта управления, k – параметр двигателя.

Для маятника $H_0(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}) = p^2/2 + \xi_1(1 - \cos q)$ – гамильтониан (энергия) свободной системы, $H_1(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi}) = -q$ – гамильтониан взаимодействия.

Целью управления (ЦУ) является ограниченность всех траекторий замкнутой системы и возбуждение в гамильтоновой подсистеме колебаний с заданным уровнем энергии.



Рис. 1. Маятниковая система

Синтез алгоритма управления. В соответствии с методикой скоростного биградиента [6] проведем синтез в три этапа. На первом этапе в условиях полной априорной информации об объекте синтезируется «идеальное» виртуальное управление конечным каскадом, обеспечивающее достижение цели управления. На втором этапе неизвестные параметры «идеального» виртуального управления заменяются настраиваемыми и синтезируется алгоритм адаптации, обеспечивающий достижение цели управления в условиях параметрической неопределенности. На третьем этапе формируется пересечение многообразий гиперповерхностей в виде невязки между выходным сигналом входного каскада и виртуальным адаптивным управлением, и синтезируется управление, обеспечивающее достижение пересечения многообразий гиперповерхностей.

Первый подход основан на выборе коэффициента γ при управлении для обеспечения желаемого уровня точности для заданного уровня трения. Оценка γ представлена фрадковым [1, 2].

Второй подход включает в себя компенсацию трения и адаптацию коэффициента трения.

Рассмотрим второй подход более детально.

Управление каскадной системой в предположении, что параметры объекта известны, поэтому отпадает один этап МСБГ.

Этап 1. Введем отклонение от многообразия

$$\sigma = x_2 - x_{2virt} \quad (3)$$

«Идеальное» виртуальное управление

$$x_{2virt}^* = -\gamma_x \left((H_0(\mathbf{x}_1, \xi) - H_*) p \right) + \frac{\xi_3}{\xi_2} p. \quad (4)$$

При отсутствии диссипативных сил, т.е. при $\xi_3 = 0$, выполняется неравенство

$$\begin{aligned} w(\mathbf{x}_1, \xi, 0) &= (H_0 - H_*) \left(\frac{\partial H_0}{\partial q} \dot{q} + \frac{\partial H_0}{\partial p} \dot{p} \right) = \\ &= (H_0 - H_*) p \left(-\xi_3 p + \xi_2 x_{2virt}^* \right) = -\gamma_x (H_0 - H_*)^2 \xi_2 p^2 \leq 0. \end{aligned}$$

Этап 2. Для синтеза контура адаптации введем настраиваемую модель вида

$$\dot{p}_* = v, \quad (5)$$

Введем целевую функцию

$$Q_e(e(t)) = 0.5e^2. \quad (6)$$

Выберем «идеальное» управление настраиваемой моделью

$$v_* = -\alpha_* e - \xi_1 \sin q - \xi_3 p + \xi_2 x_2,$$

где $\alpha_* < 0$, $e = p - p_*$.

Заменим в «идеальном» управлении настраиваемой модели v_* и неизвестные параметры ξ настраиваемыми $\hat{\xi}$

$$v = -\alpha_* e - \hat{\xi}_1 \sin q - \hat{\xi}_3 p + \hat{\xi}_2 x_2. \quad (7)$$

Выберем алгоритм адаптации

$$w(x_1, e, x_2, \hat{\xi}) = e \left(-\hat{\xi}_1 \sin q - \hat{\xi}_3 p + \hat{\xi}_2 x_2 - (-\alpha_* e - \hat{\xi}_1 \sin q - \hat{\xi}_3 p + \hat{\xi}_2 x_2) \right),$$

где

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\xi}}_1 &= -\gamma_1 e \sin q, \\ \dot{\hat{\xi}}_2 &= \gamma_2 e x_2, \\ \dot{\hat{\xi}}_3 &= -\gamma_3 e p. \end{aligned} \quad (8)$$

Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 2-3

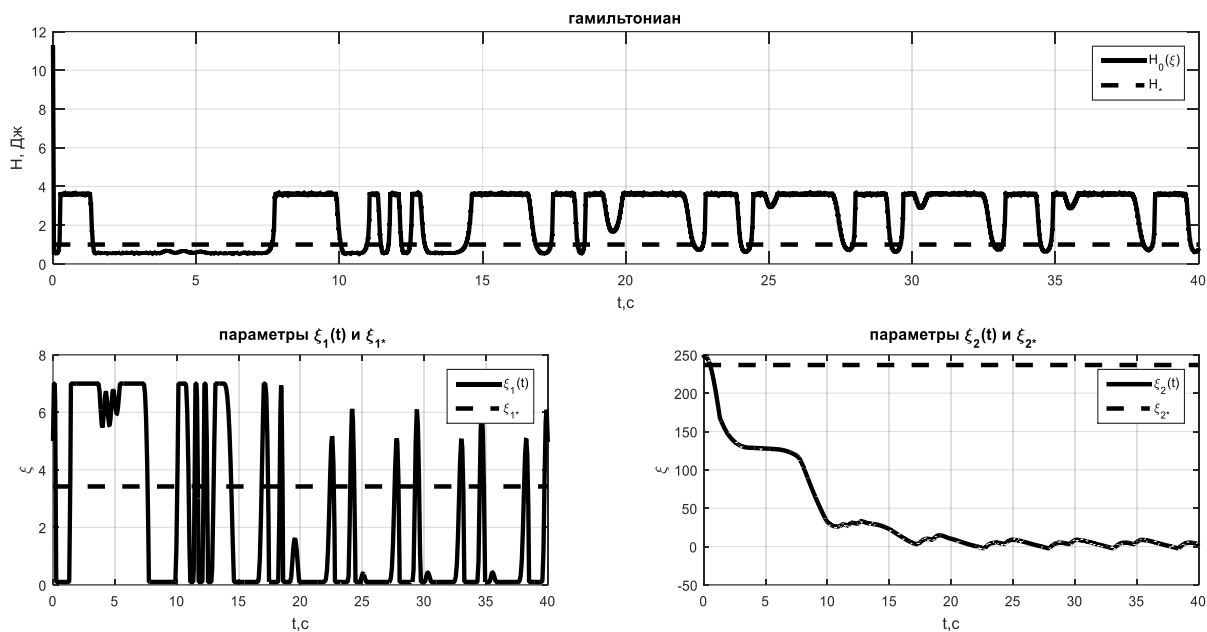


Рис. 2. Результаты моделирования без адаптации сил трения

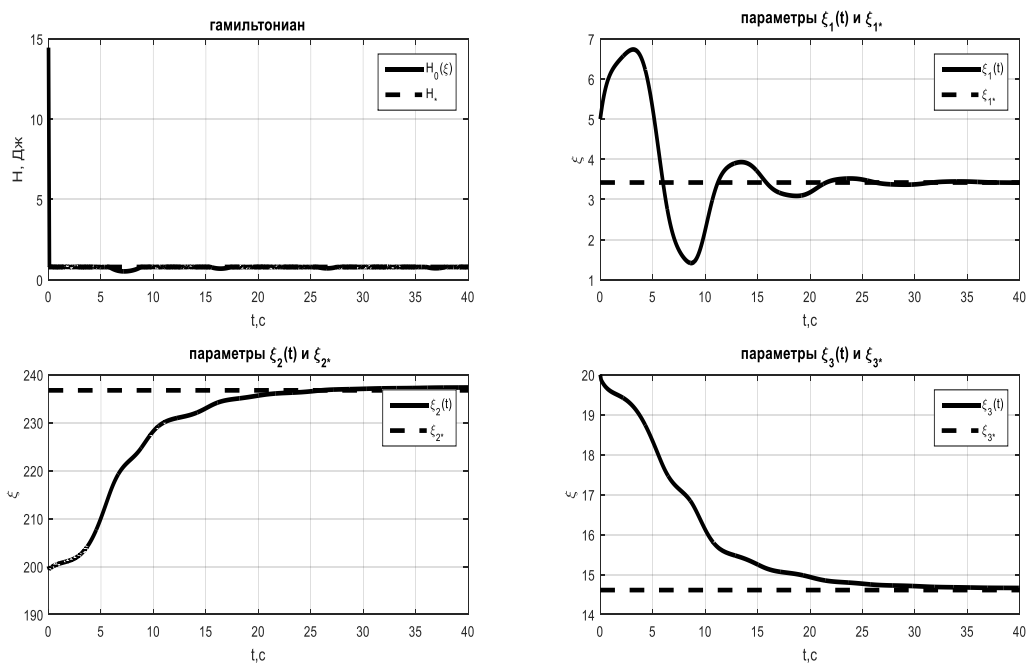


Рис. 3. Результаты моделирования с адаптацией сил трения

Вывод. Применение алгоритмов для управления диссипативными системами при значительных значениях сил трения не приводит к достижению цели управления. Предлагается использование второго подхода, который включает в себя идентификацию коэффициента трения и компенсацию силы трения в управлении.

Список литературы

[1] Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами, СПб.: Наука, 2000, 548 с.

[2] Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. СПб.: Наука, 2003, 208 с., 47 ил.

[3] Spong M.W. Energy Based Control Of A Class Of Underactuated Mechanical Systems, FAC World Congress, 1996, URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.49.9401> (accessed 22.03.2016)

[4] Андриевский Б. Р., Гузенко П. Ю., Фрадков А. Л., “Управление нелинейными колебаниями механических систем методом скоростного градиента”, Автомат.ителемех., 1996

[5] Мышляев Ю.И., Финошин А.В. Алгоритмы управления гамильтоновыми системами в условиях параметрической неопределенности [Электронный ресурс]. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, №12.

[6] Мышляев Ю.И. Схема бискоростного градиента. Сборник трудов международной технической конференции «Приборостроение – 2002», Винница-Алушта, с. 180-184. http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=3173&option_lang=rus (дата обращения 27.03.2016)

Зюзин Александр Александрович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: wendid@yandex.ru

Долгов Ярослав Александрович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: yaroslav2710@mail.ru

Финошин Александр Викторович – ассистент кафедры "Электроника, информатика и управление" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: earlov@gmail.com

Мышляев Юрий Игоревич - канд. техн. наук, доцент кафедры "Электроника, информатика и управление" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: uimysh@mail.ru

Д.А. Кузнецов, А.В. Ермоленко, М.О. Корлякова

МЕТОДЫ ДЕТЕРМИНАЦИИ УНИКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РУКОПИСНОГО ТЕКСТА

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

Задача распознавания рукописных символов есть задача нахождения соответствия между изображением рукописного символа и его кодом. Качество работы систем распознавания рукописных текстов сильно зависит от методов разделения сплошного текста на отдельные элементы и описания символов. Особенно важно автоматизировать разбор рукописных текстов в организациях, где существует значительный поток рукописных материалов. Примером таких структур могут служить административные службы, взаимодействующие с физическими лицами (прием заявлений, подписные компании и т.п.). Представленная работа направлена на формирование системы поддержки принятия решений в подразделениях вневедомственной охраны полиции при идентификации рукописных документов на этапе формирования методов определения уникальных характеристик рукописного текста [1].

Детерминируемые характеристики должны формировать входной вектор признаковой базы системы идентификации автора рукописного текста. Признаковое пространство при этом должно обладать способностью к разделению объектов в рамках одной из обучаемых моделей (нейронные сети, нечеткие классификаторы, линейная или нелинейная регрессия) [2]. Рассмотрим подходы к формированию системы признаков для описания рукописных текстов.

Все множество характеристик рукописного текста может быть разделено на два направления для исследований: строковые и символьные характеристики текста. При этом к строковым характеристикам отнесем такие как угол наклона и средняя высота букв, относительный межстрочный интервал, средняя, минимальная и максимальная ширина пробела, средний, максимальный и минимальный угол наклона строк, максимальный угол разброса строк, а к символьным межбуквенные соединения (прямые штрихи, 3-х, 4-х лучевые соединения, петли).

В основу процедур нахождения строковых характеристик рукописного текста положим принцип кластеризации изображения [2].

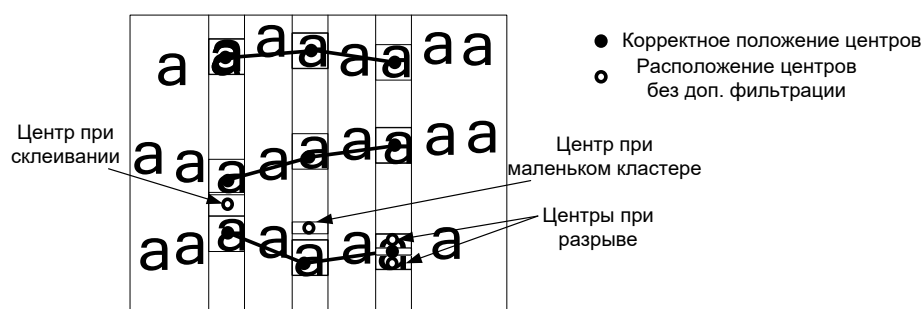


Рис. 1. Принцип работы процедуры кластеризации и необходимость фильтра

В результате разбиения условных столбцов рукописного текста на кластеры (см. рис. 1) сформируем число кластеров в столбце, которое после проведения процедуры фильтрации изображения и осреднения по всем столбцам равно среднему числу строк в тексте. На основании данных этого же разбиения получим среднее значение высоты буквы, которое также может быть использовано как характеристика почерка.

Кластеризация имеет свойство порождать лишние кластеры или объединять несколько реальных строк в один кластер. Предложенным решением является процедура фильтрации изображения, основанная на анализе статистической информации о строках и кластерных столбцах.

Для построения корректной траектории строк необходимо определить их начальные и конечные точки. Однако в связи с наличием в тексте отступов для абзацев, а также с неполной длиной строки (различная длина слов и правила переноса) на краевых столбцах можно получить неполное количество строк. Для исключения подобной ситуации реализована процедура построения виртуальных кластеров, которая генерирует на местах продолжения строк виртуальные кластеры аналогичные значениям предыдущего столбца.

После проведения кусочно-линейной аппроксимации произведем генерацию траектории написания строки для определения угла наклона и иных характеристик. Применим для этого метод наименьших квадратов первого порядка, основанный на подборе параметров кривой при условии минимизации суммы квадратов невязок. Дополним данную процедуру движением виртуальной пиксельной линейки и выделим из рукописного текста пробелы и слова для детального символьного анализа.

При разработке алгоритмов для определения символьной группы параметров, использован метод детализации отдельных фрагментов рукописного текста совокупностью трапеций с различными значениями ребер и оснований, определяемых на основе размера участков внутреннего и внешнего контура очертания фрагмента символа. В исследовании реализован математический и программный аппарат алгоритма кодирования символов рукописного текста трапециями. Область, ограниченная трапецией обладает всеми свойствами прямолинейного отрезка штриха с равномерно изменяющимся радиусом пера: линия, соединяющая середины оснований есть отрезок траектории, стороны трапеции – огибающие семейства окружностей

Первым этапом работы алгоритма является поиск всех пар отрезков, принадлежащих контурам, которые находятся в отношении R (очевидно, что R симметрично). После построения и фильтрации трапеций, изображение разбивается на смежные с ними, так называемые, *узловые области*. Каждая трапеция соприкасается с двумя узловыми областями, причем основания являются границами между трапецией и каждой из двух областей. *Кратностью* узловой области назовем количество соприкасающихся с ней

трапеций. Обозначим значение кратности буквой. Тогда если $K = 0$ в области не удалось выделить ни одной трапеции и в дальнейшем область рассматривается нераспознаваемое «пятно»; если $K = 1$ область является концом штриха при условии выполнения критерия регулярности; если $K = 2$ область является отрезком траектории между двумя трапециями, если $K > 2$: найдена область пересечения штрихов. В результате получаем набор различных трапеций с четко определенными для образца значениями высоты, ребер и их ориентации относительно строки.



Рис. 2. Кодирование буквы трапециями

Полученный набор трапеций может быть использован для описания соединений элементов как в букве, так и между ними. В процессе исследования изучены аспекты построения соединений с разным количеством лучей (последовательность трапеций образующих прямую). Установлено, что соединения, состоящие более чем из 3-х лучей, встречаются редко и малоинформативны.



Рис. 3. Угловые параметры соединения на 3 лучах

Параметрами 3-х лучевых соединений выбраны углы между лучами (с учетом угла наклона строки). По окончании процедуры кластеризации генерированных соединений формируется массив возможных типов 3-х лучевых соединений с вероятностью их нахождения в исследуемом образце.

Для определения информативности признаков, содержащихся в нормированной выборке с приведением к единому диапазону величин 0..100, использованы методы представления данных в нечетких множествах. Построены треугольные и гауссовские (см. рис. 4) распределения величин признаков всех параметров для различных авторов одинакового текста. Анализ разделимых множеств показывает принципиальную возможность решения задачи идентификации на основе существующей признаковой базы. Вместе с тем, большая дисперсионность признаков не позволяет использовать линейные методы разделения множеств.

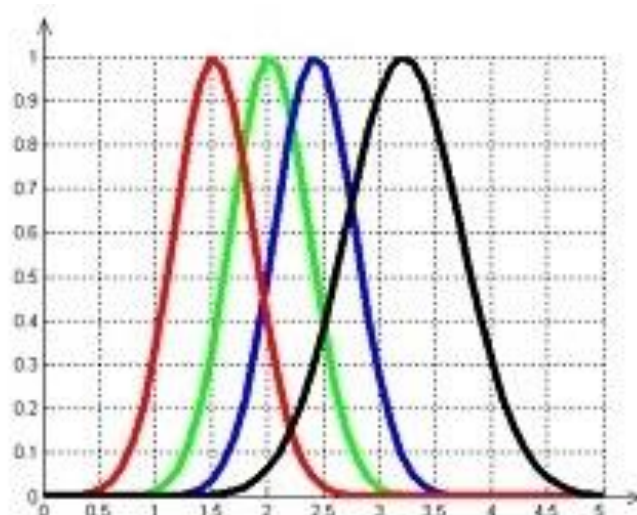


Рис. 4. Распределение признаков для различных авторов

Разработанные методы в целом позволяют сформировать информативную признаковую базу в целях решения задачи идентификации автора рукописного текста. Вместе с тем, применение линейных математических методов на основе формализованных характеристик затруднительно, что приводит к необходимости синтеза решающей идентификационной модели с использованием мягких вычислительных моделей. Наиболее перспективными в данном направлении представляются методы нечетких множеств и нейронных сетей, а также различные вариации их симбиоза.

Список литературы

- [1] Горошко И.В. Математическое моделирование в управлении органами внутренних дел. – М.: Акад. управ. МВД России, 2000
- [2] Комарцова Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004 – 397 с.
- [3] Ермоленко А.В., Козличенков А.А., Корлякова М.О. Выбор входного набора признаков для нейросетевой идентификации почерка. Научная сессия МИФИ 2007. IX Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2007»: Сборник научных трудов. В трех частях. Ч. 1. М.: МИФИ, 2007. – с. 42-50.

Кузнецов Денис Александрович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: OrionJM@yandex.ru

Ермоленко Алексей Владимирович - соискатель, академия управления МВД России. E-mail: ermolenko@rambler.ru

Корлякова Мария Олеговна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Д.А. Кузнецов, Д.В. Тамонов, Аунг Кхаинг, М.О. Корлякова

ОБЗОР АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ОСОБЫХ ТОЧЕК ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СОПОСТАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

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

Современные системы технического зрения активно используют алгоритмы поиска особых точек изображения. Такие системы ориентированы на задачи сопоставления изображений. Особые точки изображений - это точки с характерными окрестностями, которые имеет некие признаки, существенно отличающие ее от от всех соседних точек [1]. Особые точки и особые области изображений играют важную роль в методах обработки видеoinформации, зачастую используются в задачах трекинга и распознавания объектов сцены.

В компьютерном зрении и обработке изображений концепция обнаружения особенностей относится к методам, которые направлены на вычисление абстрактной информации и принятие решений для каждой локальной точки [2]. В результате обработки, особенности изображений будут являться подмножеством областей изображения в виде изолированных точек, кривых и связанных областей. Выбирая алгоритм поиска таких особенностей, следует учесть, что они могут быть простыми – примером являются углы изображения, и сложными – состоящими из целых регионов изображения. Универсального метода, одинаково хорошо распознающего все особенности не существует, рассмотрим алгоритмы которые дают наилучшие результаты для разных типов особенностей: детектор углов Харриса, преобразование Хафа и метода FREAK.

Детектор Харриса и преобразование Хафа используются главным образом для выделения примитивов на изображении. Соответственно они используются в технологиях компьютерного зрения, обработки изображений. Их удобно использовать вместе, так как они решают разные стороны задачи выделения примитивов. Детектор Харриса и преобразование Хафа зарекомендовали себя вполне надежными методами, имеющими свои преимущества и недостатки.

Детектор Харриса является улучшенным детектором Моравеца, выполняет задачу обнаружения углов на изображении, одиночных точек, рассматривая производные яркости изображения для исследования изменений яркости по множеству направлений [3]. Детектор инвариантен к поворотам, частично инвариантен к аффинным изменениям интенсивности. Метод очень хорошо обнаруживает углы L-типа. Пример работы детектора приведен на рис. 1.а. С появлением шумов и углов типа X, Y, T, ↑ детектор справляется хуже. Имеется негативная для его работы зависимость от масштаба [3]. Алгоритм перебирает множество окон по всем пикселям, поэтому его сложность $O(n^2)$.

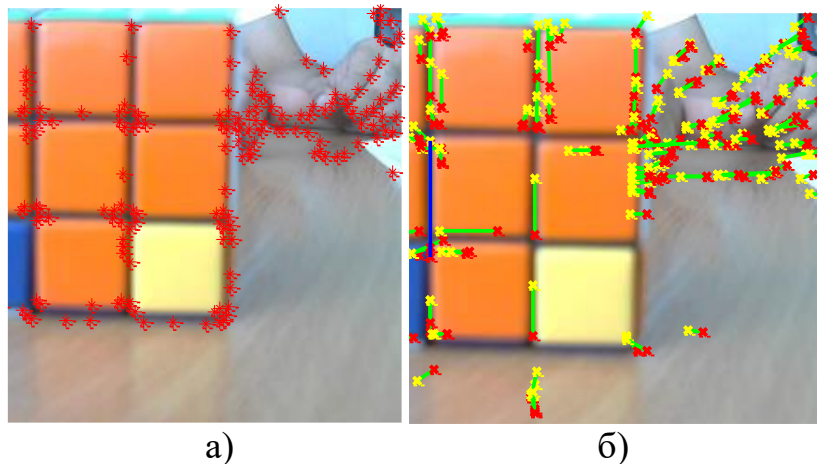


Рис. 1. Обнаружение углов детектором Харриса а) и поиск линий по Хафу б)

Преобразование Хафа предназначено для поиска объектов, принадлежащих определенному классу фигур, таких как прямая, круг, с использованием процедуры голосования. В простейшем случае преобразование ищет прямые типа ss (рис. 1.б), но в пространстве параметров r, θ ($r = x \cos(\theta) + y \sin(\theta)$). Также как и у детектора Харриса, шумы создают проблему качественного обнаружения объектов, порой находя их там, где быть не должно. Алгоритм Хафа хранит и работает с массивом размерности, равной числу параметров, то есть двумерным. Отсюда сложность алгоритма $O(n^2)$.

Для целей сопоставления изображений необходимо описывать особенности в некоторой векторной форме. Метод FREAK является одним из самых быстрых алгоритмов, в его основе лежит использование распределение сканирующих круговых областей, аналогичное сетчатки глаза, размер таких областей зависит от центра изображения: наименьшая область находится в центре, от центра происходит рост радиуса областей в геометрической прогрессии. Новые области могут перекрывать уже полученные на изображении. Для уменьшения шума, каждая область проходит процедуру сглаживания, для каждой применяются разные ядра сглаживания.

При построении бинарного дескриптора F используются пары точек, разница между парами рецептивных полей с соответствующими Гауссианами[4],

$$F = \sum_{0 \leq a < N} 2^a T(P_a) \quad (1)$$

где P_a - пары рецептивных, N -выбранный размер дескриптора.

Сравнив средний уровень интенсивности по Гауссу пар, можно построить описание некоторой точки изображения, где $I(P_a^{r1})$ -сглаженная интенсивность поля P .

$$T(P_a) = \begin{cases} 1 & \text{если } \text{sign}(I(P_a^{r1} - P_a^{r2})) > 0 \\ 0 & \text{в иных случаях} \end{cases}$$

Поиск разницы между двумя изображениями таким образом сводится к нахождению минимального расстояния между векторами Дескриптора.

Для снижения объема обработки имеет смысл проводить разделение изображений на области за счет сегментации. Рассмотрим несколько методов сегментации изображений: метод k-means [3], метод водораздела [5] и ручную разметку.

Схема алгоритма кластеризации (k-means), который фиксирует число классов приведена ниже:

- Связать с каждым кластером K_j объект X_i из обучающей выборки, если число кластеров меньше N , то перейти к процедуре формирования кластеров (п.5.).
- Вычислить расстояния от всех объектов до всех центров кластеров.
- Присоединить объект X_i к кластеру S_k , если расстояние между ними минимально по всем кластерам. Повторить для всех объектов выборки.
- Вычислить новое положение центров кластеров как среднее по всем примерам из текущего кластера
- Повторять от п.2. пока центр кластера смещается более чем на ε , иначе остановить процесс формирования кластеров.

Для целей сегментации алгоритм k-means применяют для анализа объектов по цвету (rgb) или по цвету и координате (x,y, rgb) (при моделировании использовали функцию MatLab). Результаты обработки оценили по времени и качеству (Таблица 1). Параметром алгоритма k-means является число кластеров (N). Результаты обработки показывают, что более информативной является модель сегментации объектов по цвету (rgb). Причем, наилучший результат по качеству обработки показывает вариант с $N=5$. К сожалению, для достижения качественной сегментации необходимо иметь хотя бы приближенное представление о числе классов в данных, что не всегда возможно.

Таблица 1.

метод	t,с на пиксель	Качество	Число областей связности	Параметр алгоритма
k-means (rgb)	6.16e-06	хорошее	>>10	N=5
	6.04e-06	среднее	>>10	N=15
	3.45e-08	среднее	>>10	N=10
k-means (x,y, rgb)	5.83e-06	плохое	~10	N=5
	5.79e-06	плохое	12-15	N=10
	5.87e-06	среднее	25-30	N=20
Водорадел	7.89e-06	выше среднего	~20 хороших объектов ~10 плохих	
Ручная разметка	>>10 мин	высокая	~50-40	

Другой подход к сегментации основан на использовании алгоритма водораздела. Основная идея метода состоит в выделении точек с минимальной и максимальной интенсивностью по кадру и расширении областей вокруг них до достижения границ других таких же областей. Результаты

анализа изображений методом водороздела приведены в Таблице 1 (при моделировании использовали функцию MatLab). Очевидно, что высокое качество разделения связано с большим временем обработки, что не позволяет применять этот метод разделения областей. Кроме этого, видеопоток требует проведения связного по времени анализа сегментов. Это реализуемо в методе k-means (построили кластеры на одном кадре, а анализ делаем для следующих), но не работает в методе водораздела, т.к. каждый кадр сегментируется автономно. Увеличение времени обработки на процедуру сегментации для кадра размера 600x400 составит не более 1.5 с, но позволит сократить перебор сопряженных точек последовательных кадров.

Таким образом, процедура анализа изображений в видеопотоке или для целей стереорекострукции подразумевает следующие операции:

- выделение особых точек (детектор углов)
- описание особых точек (FREAK)
- выделение сегментов и разделение особых точек на подмножества по сегментам (k-means (rgb))
- проведение поиска сопряженных особенностей в парах кадров.

Дальнейшая работа будет ориентирована на распараллеливание обработки и ее оптимизации.

Список литературы

[1]. Михальков Ф.Д. Влияние искажений изображения на работу детектора Харриса с предварительным выделением особых точек // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2015. – № 3(37). – С. 103–105

[2] Научно-образовательный курс «Локальные особенности на изображениях» URL: mm-dsp.com/files/Локальные%20особенности%20на%20изображениях.pdf (дата обращения 1.05.15).

[3] Шапиро Л.Стокман Дж.Компьютерное зрение — М.: БИНОМ.Лаборатория знаний ,2013г—741с.

[4]. A. Alahi, R. Ortiz, P. Vandergheyns, “FREAK: Fast Retina Keypoint,” in Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE Conf. (Providence, June 16–21, 2012), pp. 510–517.

[5] Ховратович Т.С., Барталев С.А. Исследование методов сегментации многоспектральных спутниковых изображений для задачи выявления изменений в лесах URL: www.d33.inforace.ru/d33_conf/2009_conf_pdf (дата обращения 25.12.2015)

Кузнецов Денис Александрович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: OrionJM@yandex.ru

Тамонов Дмитрий Викторович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: genius-alfa@mail.ru

Аунг Кхайнг - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: aungmyo61149@gmail.com

Корлякова Мария Олеговна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Н.В. Аксенов, Ю.П. Корнюшин

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ МОДУЛЕМ

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

Введение. Постановка задачи. Современной тенденцией в эксплуатации сельскохозяйственных машин является не только повышение качества обработки земли, но и снижение нагрузок на силовые элементы агрегатов. Этого можно достичь различными способами. Существуют разработки по применению упругодемпфирующих устройств, изменяющих характеристики ведущих колес машины. Другим путем решения задачи является использование дополнительного прицепа (транспортно-технологического модуля, ТТМ) с ведущими колесами. Он позволяет повысить тяговую силу агрегата за счет реализации излишка мощности, заложенной в трактор. Исследование упругодемпфирующих свойств ТТМ представляет определенный интерес, поскольку его использование может существенно снизить динамическую нагрузку на трансмиссию и двигатель трактора.

Для оценки демпфирующих свойств ТТМ анализируются данные, полученные при проведении лабораторно-полевых испытаний (ЛПИ). Программой ЛПИ предусматривалось исследовать динамические процессы модульного энергетического средства (МЭС) с целью выявления демпфирующих свойств тракторно-технологического модуля (ТТМ).

На рис. 1 показана схема подключения ТТМ к трактору и схема расположения датчиков при проведении ЛПИ.

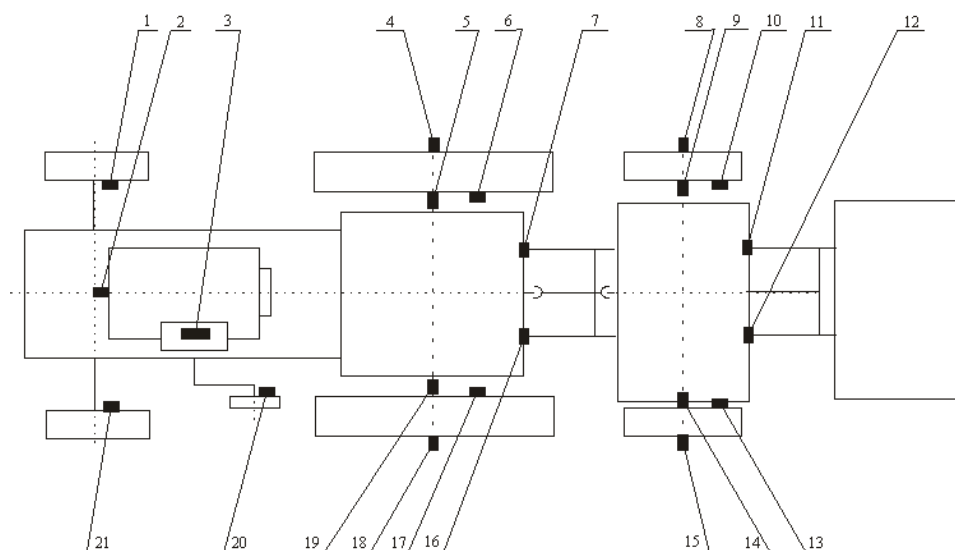


Рис. 1. Схема расположения датчиков

9, 14, 5, 19 - тензодатчики на ведущих полуосях технологического модуля и трактора;

7, 11, 12, 16 – тензодатчики на нижних осях навесок технологического модуля и трактора;

2, 13, 10, 6, 17, 1, 21, 20 – индукционные датчики числа оборотов колесчатого вала, левого и правого колес технологического модуля, левого и правого задних, левого и правого передних колес энергомодуля, «пятого» колеса;

3 - расходомер топлива; 4, 8, 15, 18 - концевые токосъемники.

Результатом ЛПИ являются осциллограммы нагрузок (моментов сил) в точках крепления тензодатчиков. Измерительный комплекс включает в себя датчики и устройства их считывания и оцифровки фирмы National Instruments. На рис. 2. Представлен фрагмент характеристики нагрузок на крюке ТТМ.

Нагрузки, снимаемые с датчиков, представляют собой случайные процессы (случайные числовые последовательности). Для решения последующей задачи идентификации математической модели тракта передачи нагрузок на трактор от инструмента (плуг, борона и т.д.), необходимо знать вероятностные характеристики случайных процессов. Ниже приводится алгоритм их вычисления.

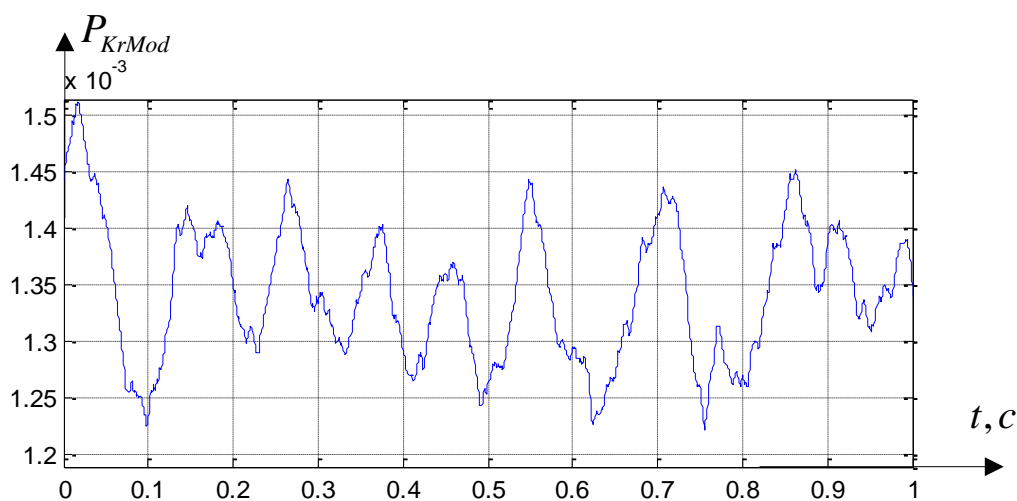


Рис. 2. Фрагмент характеристики нагрузки на крюк ТТМ

Проведем анализ функций зависимости нагрузок на крюк ТТМ и на крюк трактора от времени.

Алгоритм. 1. Вычисляется оценка корреляционной функции по формуле [2]

$$\hat{R}_{xx}[r] = \frac{1}{N-r} \cdot \sum_{k=r}^{N-1} \left[(x[k] - \hat{m}_x) \cdot (x[k-r] - \hat{m}_x) \right],$$

где $\hat{R}_{xx}[r]$ – оценка корреляционной функции, $x[k]$ – реализация, заданная в виде решетчатой функции, N – число отсчетов решетчатой функции, \hat{m}_x – математическое ожидание случайного процесса, оцениваемое как [1]

$$\hat{m}_x = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} x[k].$$

Так же можно использовать смещенную оценку [3]

$$\hat{R}_{xx}[r] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=r}^{N-1} [(x[k] - \hat{m}_x) \cdot (x[k-r] - \hat{m}_x)].$$

2. Вычисляется спектральная плотность стационарного случайного процесса, определяемая как преобразование Фурье от корреляционной функции [2]:

$$S(\omega) = F\{R(\tau)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau.$$

Результаты обработки. Графики полученных характеристик приведены на рис. 3-6. На спектральной плотности нагрузки на крюк ТТМ заметен пик на частоте около 6 Гц. На спектральной плотности крюкового усилия на трактор такого пика на данной частоте не наблюдается.

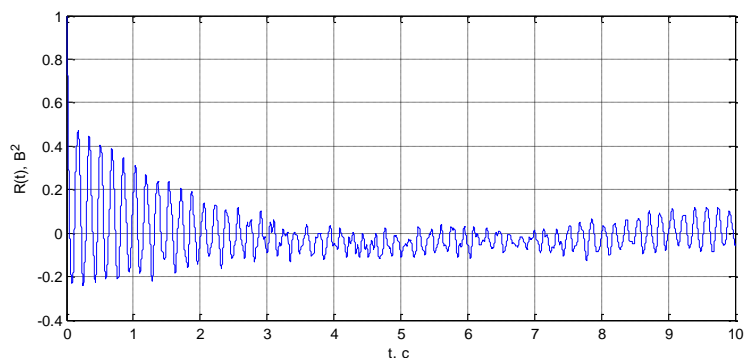


Рис. 3. Нормированная корреляционная функция нагрузки на крюке ТТМ

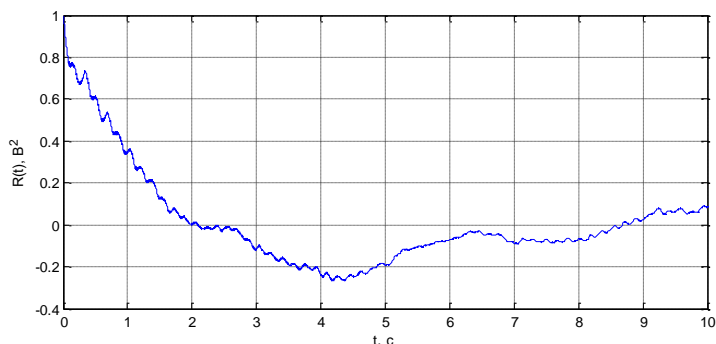


Рис. 4. Нормированная корреляционная функция нагрузки на крюке трактора

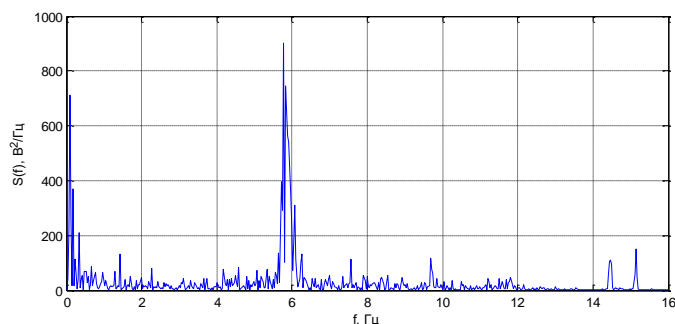


Рис. 5. Нормированная спектральная плотность нагрузки на крюке ТТМ

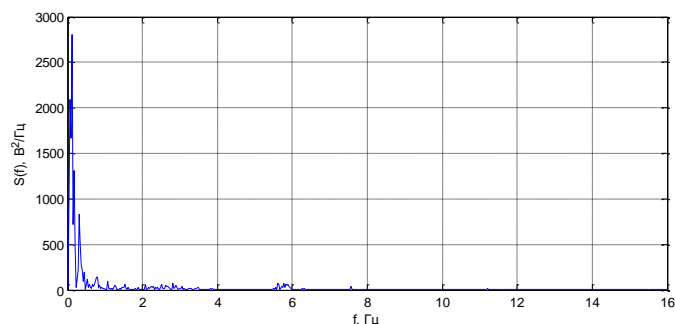


Рис. 6. Нормированная спектральная плотность нагрузки на крюке трактора

Полученные корреляционные функции и спектральные плотности нагрузок в различных точках рассматриваемой системы могут быть аппроксимированы функциональными зависимостями.

Выводы. Таким образом, в результате лабораторно-полевых испытаний и обработки данных можно сделать вывод о наличии демпфирующих свойств у ТТМ. Для исследования этих свойств в зависимости от параметров системы необходимо решать задачу построения математической модели тракта передачи нагрузок от инструмента к трактору.

Литература

[1] Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. Пособие для бакалавров /В. Е. Гмурман – 12-е изд. – М.: Издательство Юрайт, 2014. –470 с.

[2] Корнюшин, Ю.П. Анализ случайных процессов в динамических системах: Методическое пособие по проведению лабораторных работ по курсу “Управление в технических системах” / Ю. П. Корнюшин; МГТУ им. Н.Э.Баумана, Калужский филиал. – Калуга, 1997 – 18 с.

[3] Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Том 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления – Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 654 с.

Аксенов Никита Владимирович - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: n.aksenov2015@yandex.ru

Корнюшин Юрий Петрович - д-р техн. наук, зав. каф. "Системы автоматического управления" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: theroland@yandex.ru

А.В. Аксенов, В.И. Краснощеченко

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА Д-600ТФ

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

В настоящее время на Калужском заводе АО «Тайфун» задействовано оборудование для проведения антенных измерений. Помимо прочего, в состав данного оборудования входит опорно-поворотное устройство (далее ОПУ), включающее механизмы вертикального и горизонтального наведения (ВН и ГН соответственно). Главной проблемой в работе с ОПУ является отсутствие какой-либо автоматизации управления, а как следствие, невозможность достаточно быстрого и точного позиционирования ОПУ. Для решения данной проблемы необходимо решить ряд задач, в том числе определение динамических характеристик двигателя постоянного тока (ДПТ) Д-600ТФ (рис. 1), составляющего основу механизмов ВН и ГН.



Рис. 1. Двигатель постоянного тока Д-600ТФ

Чтобы решить поставленную задачу, необходимо спроектировать и собрать стенд, включающий в себя следующие элементы:

- - контроллер, включающий в себя таймеры/счетчики, механизмы прерываний и т.д.;
- - драйвер ключей ДПТ, позволяющий сформировать управляющий ШИМ-сигнал;
- - датчик обратной связи (кодовый датчик).

В качестве контроллера задействован микроконтроллерный стенд МКС-003, на основе микроконтроллера Atmega128, разработанный на базе

КФ МГТУ им.Н.Э. Баумана. Программирование данного стенда осуществляется с помощью пакетов CodeVision-AVR и AVRStudio 4.[1]

Кроме того, для формирования управляющего ШИМ-сигнала выбрана плата ключей ДПТ (рис. 2), основным элементом которой является микросхема VNH5019.[2]

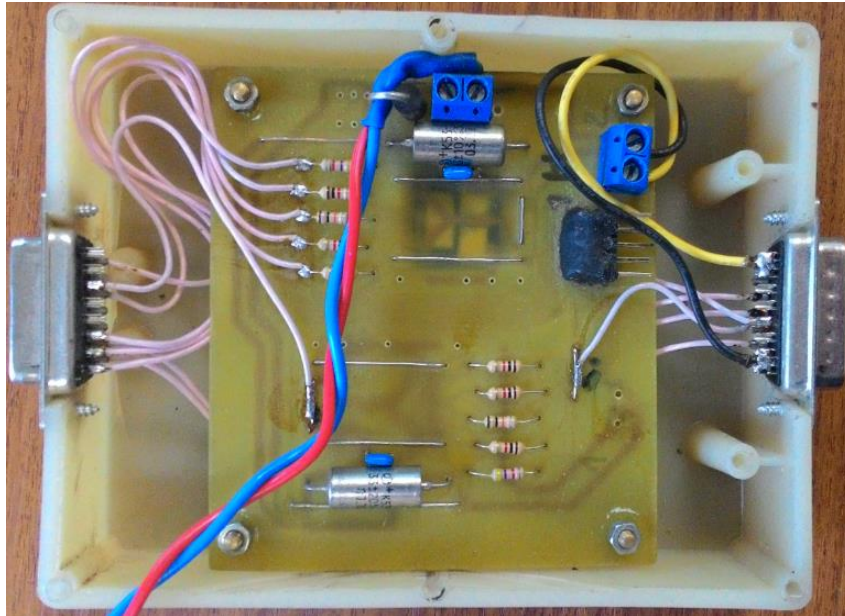


Рис. 2. Плата ключей ДПТ (вид сверху)

Далее для получения данных о скорости вращения двигателя и последующей организации обратной связи в системе управления выбран кодовый датчик IRC 120/1000, оснащенный соединительным кольцом. Для данного кольца разработан соединительный фланец, чтобы обеспечить крепление датчика к корпусу двигателя (рис. 3).



Рис. 3. Кодовый датчик (вид сбоку)

На рисунке 3 обозначены следующие элементы:

- 1 — соединительный фланец;
- 2 — соединительное кольцо;

3 — разъем контактов.

Для жесткого соединения валов двигателя и кодового датчика задействована переходная муфта, представленная на рис. 4.



Рис. 4. Переходная муфта (а – вид сбоку, б – вид спереди)

Для соединения элементов, представленных выше, с двигателем, с его корпуса демонтирован электромеханический тормоз, благодаря чему освобожден вал двигателя (рис. 5).



Рис. 5. Корпус двигателя после демонтажа электромеханического тормоза

Далее собрана система «Двигатель – кодовый датчик», представленная на рис. 6.



Рис. 6. Двигатель Д600-ТФ в сборке с кодовым датчиком IRC 120/1000

Окончательно, стенд для исследования динамических характеристик двигателя постоянного тока представлен на рисунке 7.

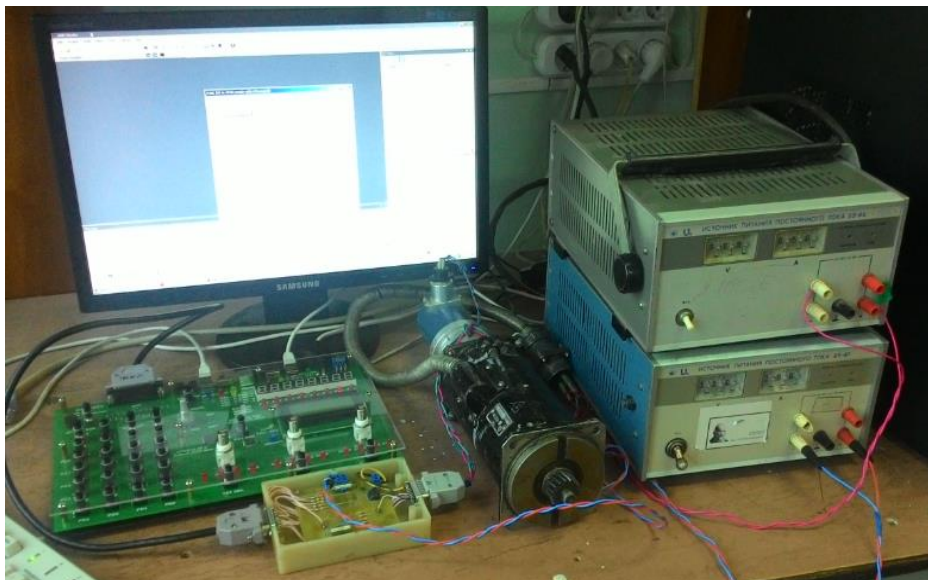


Рис. 7. Стенд для исследования динамических характеристик двигателя Д600-ТФ

Список литературы

[1] Микросхема VNH5019. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00234623.pdf> (дата обращения 20.03.2016).

[2] Ревич Ю.В. *Практическое программирование микроконтроллеров Atmel AVR на языке ассемблера*. 2-е изд., испр. Санкт-Петербург, Изд-во БХВ-Петербург, 2011, 352с.

Аксенов Анатолий Валерьевич - студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: an.aksionov2014@yandex.ru

Краснощеченко Владимир Иванович - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kviip@yandex.ru

УДК 621.744

В.Р. Афанасьев, Ю.Ф. Дорохов

РАЗРАБОТКА РАБОЧЕГО МЕСТА ПРОЕКТИРОВЩИКА ПРЕСС-ФОРМ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ С НЕБОЛЬШОЙ ПРОГРАММОЙ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

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

Современные системы автоматизированного проектирования позволяют создавать оптимальные по формам и технологии их изготовления пластмассовые изделия и литьевые формы за счет использования компьютерного анализа при моделировании и исследовании технологических особенностей изделий.

Упрощенное получение модели на 3D принтере позволило перед изготовлением дорогостоящей оснастки определяться с формами модели, т.е. приводить эти формы к требованиям производства изделий из пластика, таких как: равная толщина различных профилей изделия за счет использования ребер жесткости и выбора, марки пластика, отвечающего назначению изделия.

Для предприятий, изготавливающих небольшие партии изделий и имеющих ограниченное количество термопластавтоматов для их изготовления, применение при проектировании изделий из пластика предлагаемых рынком программ компьютерного анализа - слишком дорогостоящее занятие. Кроме того, для небольшого количества конструкторов (1-2 человека) изучение этих программ в полном объеме может занять большое количество времени, а без этого изучения порой невозможно решить конкретную задачу.

На кафедре САПР КФ МГТУ имени Н.Э.Баумана в одной из лабораторий занимаются созданием рабочего места конструктора проектирующего 3D модели из пластика для конкретного предприятия.

Для этого изучается программа предприятия, типы изделий из пластика, используемые материалы, систематизируются литьевые формы предприятия, и оборудование на котором изготавливаются изделия. Далее изучаются программы, которые можно будет применить для компьютерного анализа, с разработкой методических указаний по их использованию.

После сбора всей необходимой информации создается программный комплекс, позволяющий частично или полностью автоматизировать процесс проектирования изделий из пластика. Это позволит существенно упростить процесс проектирования для конструкторов, и тем самым сократить сроки проектирования.

Можно выделить следующие задачи по автоматизации проектирования изделий из пластика:

- Проектирование самого изделия, пример которого приведен на рисунке 1, а).
- Проектирование литниковой системы для отливки требуемых изделий (см. рис. 1, б).

Литниковая система - это система каналов формы, служащая для передачи материала из сопла литейной машины воформиляющие гнезда формы. Она оказывает решающее влияние на качество изготавливаемого изделия, расход материала, производительность процесса и др.. [1].

Отливка, для приведенного выше изделия и литниковой системы изображена на рисунке 1, в).

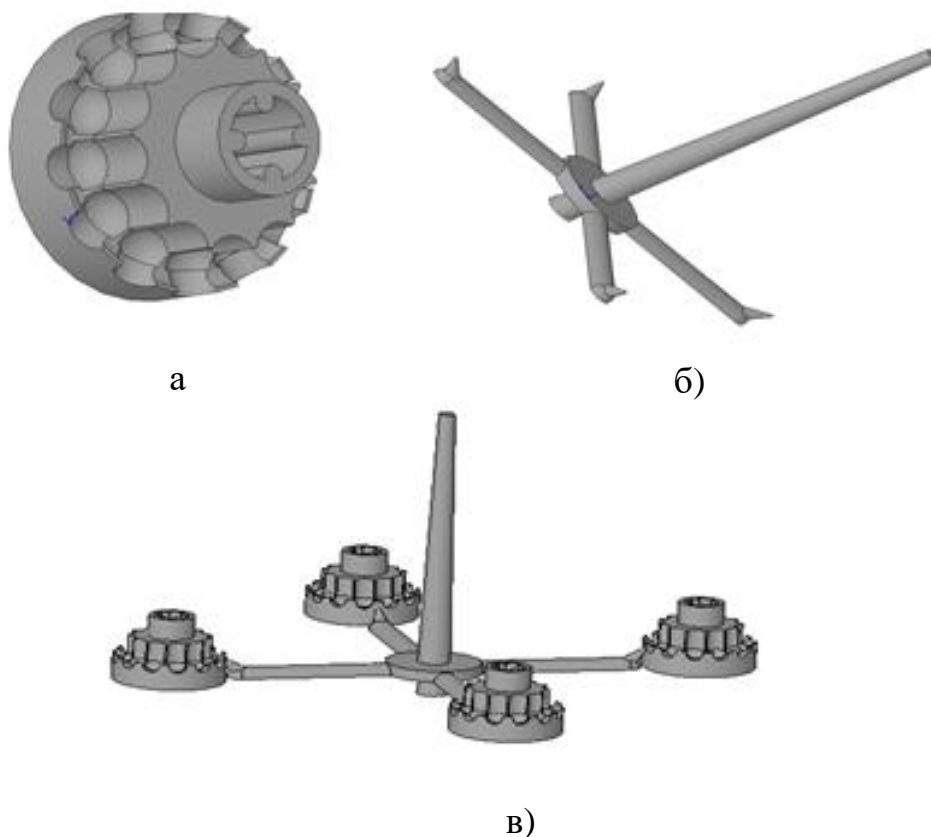


Рис. 1. а) – литниковая система, б) – изделие, в) – отливка

Также в задачи автоматизации могут входить:

- Подбор блока литейной формы по габаритам отливки (см. рис.2).
- Выбор подходящего по габаритам блока литейной формы и технологическим параметрам изделия термопластавтомата (см. рис.3)



Рис. 2. Блок формы литьевой

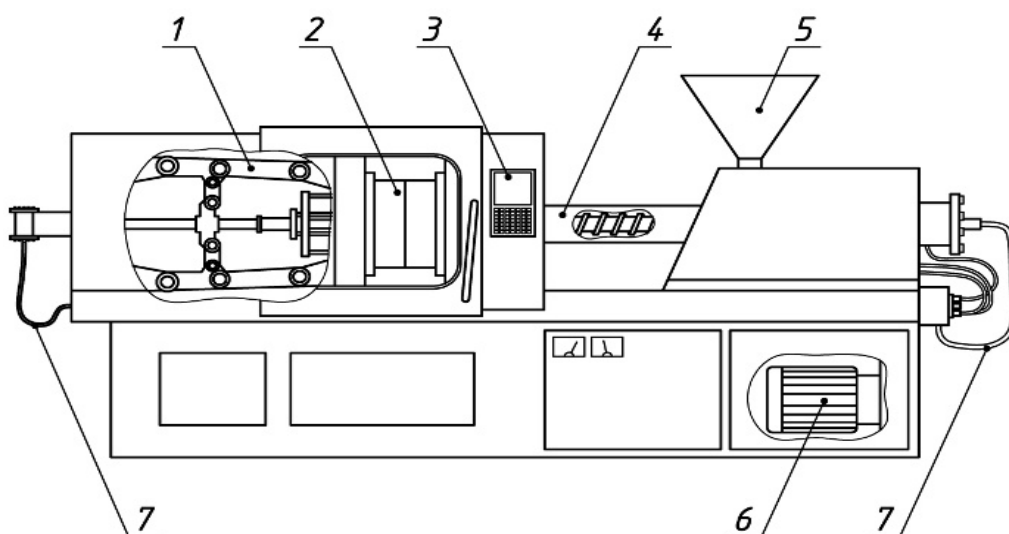


Рис. 3. Схема термопластавтомата: 1–узел смыкания; 2–форма литьевая; 3–блок ЧПУ; 4–узел пластикации; 5–загрузочный бункер; 6–двигатель; 7–гидравлическая система

Специализированные для конкретного предприятия программные комплексы, частично или полностью автоматизирующие какие-либо из вышеперечисленных задач, позволяют конструктору предприятия в короткий срок освоить цикл проектирования изделий из пластика, что в конечном счете окажет существенное положительное влияние на технико-экономические показатели производства.

Список литературы

[1] Пантелеев А. П., Шевцов Ю. М., Горячев И. А. *Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс*. Москва, Машиностроение, 1986, 72 с.

Афанасьев Владислав Романович – студент КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана. E-mail: ya.vladicl@ya.ru

Дорохов Юрий Федорович – канд. техн. наук, преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана. E-mail: dorohov.47@mail.ru

А.А. Брынза, Е.В. Брынза, М.О. Корлякова

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ СИМВОЛОВ

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

Системы оптического распознавания символов находят широкое применение во многих отраслях, например: используются при создании электронных библиотек и архивов путем перевода книг и документов в цифровой компьютерный формат, on-line переводчики, которые по фотофрагменту, захватываемому в видеопотоке, осуществляют распознавание с последующим переводом текста.

Сначала с помощью сканера необходимо получить изображение страницы текста в графическом формате. Далее для получения документа в текстовом формате требуется провести распознавание текста, т.е. преобразовать элементы графического изображения в последовательность текстовых символов. [1]

В данной системе, для выделения объектов используется технология анализа признаков. Всего рассматривается 2 признака для анализа:

- Площадь объекта (число пикселей объекта)
- Рамка (соотношение сторон выпуклой прямоугольной оболочки объекта)

Первый параметр предназначен для «отсеивания» областей, которые потенциально не могут являться символами, в следствии, например, чрезмерной вытянутости, второй же параметр служит для сокращения числа объектов выборки.

Для принятия решений решено было использовать граничный классификатор. Классификатор данного типа имеет очень низкую вычислительную сложность.

Поскольку, число шаблонов сравнительно невелико, решено использовать для анализа набор шаблонов, представленных в бинаризованном формате. При необходимости расширения числа шаблонов, добавление нового шаблона никак не влияет на набор уже внесенных в систему.

Основным достоинством данной системы является наличие открытого кода, т.е. возможность добавления необходимых шаблонов, и ассоциирование их с конкретным символом.

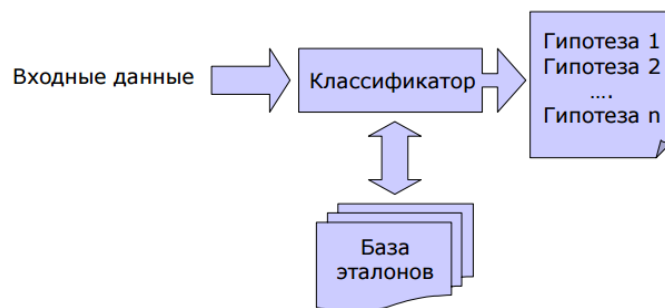


Рис. 1. Упрощенная схема работы классификатора

При работе с отдельным фрагментом, есть возможность выделения области интереса для дальнейшего распознавания. Данная опция позволяет значительно повысить быстродействие за счет сокращения числа не интересных нам объектов – кандидатов.



Рис. 2. Анализируемый фрагмент (входные данные)

Для реализации данной опции может использоваться встроенная функция среды Matlab – `impositionrect`.



Рис. 3. Пример выбора отдельного фрагмента

Для того, чтобы определять схожесть фрагмента с шаблонами используется мультипликативная корреляция, которая так – же является простой в реализации, и не требует большой вычислительной сложности. [2]

$$k = \frac{\sum_c \sum_r (A(c,r) - A_m) \cdot (B(c,r) - B_m)}{\sqrt{\sum_c \sum_r (A(c,r) - A_m)^2 \cdot \sum_c \sum_r (B(c,r) - B_m)^2}}$$

Результатом будет являться объект с максимальным коэффициентом корреляции – в соответствии с которым система принимает решение о выводе значения соответствующему данному шаблону.

Модульная структура, построенная по принципу нисходящего проектирования для данной системы выглядит следующим образом:

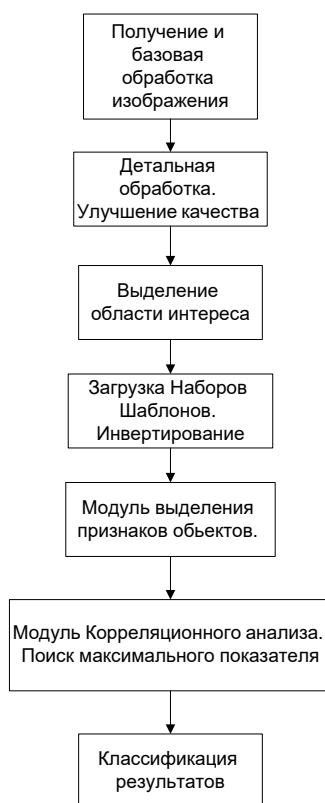


Рис. 4. Модульная структура системы

Данная система не является инвариантной к повороту фрагмента, однако, это может быть учтено путем введения дополнительных признаков. Далее, для всего набора шаблонов осуществляется поворот на определенный угол, после чего производится дальнейшая корреляция. Другим способом является задание множества сеток шаблонов, каждый из которых изменяется на небольшой угол (порядка 3-5 градусов) по сравнению с предыдущим. Затем все элементы данных сеток коррелируются, и рассматривается наилучший результат. Однако, данный метод очень трудоемкий, и требует больших временных затрат на вычисление.

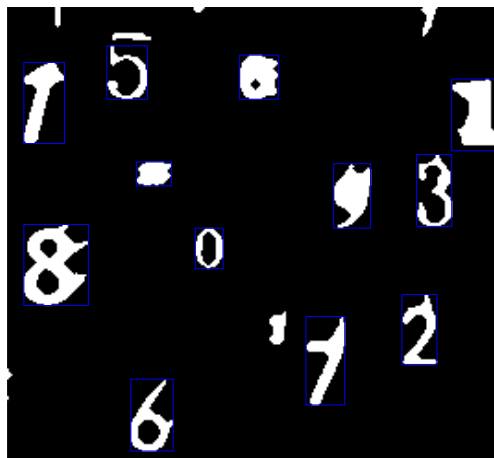


Рис. 5. Анализ и выделение объектов в области интереса
 Ошибка классификации для данного случая составила 16%

Рассмотрим пример фрагмента, состоящего из символов с шрифтом различного стиля (Рис.6.)



Рис. 6. Тестовый фрагмент

Ошибка классификации анализа каждого столбца приведена в таб. 1.

Таблица 1. Ошибка классификации

№ столбца	Число выделенных объектов	Число верно распознанных объектов	Погрешность, %
1	6	6	0
2	6	6	0
3	6	5	16.6
4	6	5	16.6
5	6	5	16.6
6	6	6	0
Общая погрешность			8.3 %

Проанализировав результат, выяснилось, что основной процент погрешности возникает из-за схожести символов «1» и «7». Данная проблема может быть устранена путем задания дополнительных, более точных шаблонов.

Анализ результатов показал, что система работает с высоким качеством распознавания, как со стандартными шрифтами, так и со шрифтами других типов (курсив и пр.)

Время обработки на примере тестового изображения приведенного на рис.6, размером 300x300 пикселей, содержащего 36 объектов составляет 1.068 секунды

Список литературы

[1] Э. Айфичер, Б. Джервис, Цифровая обработка сигналов // изд. Вильямс, Москва 2004 [Электронный ресурс] URL: <http://www.twirpx.com/file/13253/> (дата обращения: 11.03.2016).

[2] Википедия - Электронная энциклопедия [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Корреляция_цифровых_изображений (дата обращения: 12.03.2016)

Брынза Андрей Андреевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана.
E-mail: wolf_93_21@mail.ru

Брынза Елена Васильевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана.
E-mail: lena.brynza@yandex.ru

Корлякова Мария Олеговна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

А.А. Брынза, М.О. Корлякова

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО МИКРОСКОПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ WEB КАМЕРЫ С ИНТЕРФЕЙСОМ USB 2.0

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

Изучение микрообъектов имеет большое прикладное значение. Например при изучении биологических объектов, в материаловедении и т.п. Помимо визуального анализа препаратов, часто необходимо иметь документальную фиксацию образцов. Что реализуется дорогими цифровыми микроскопами. Однако, учебные заведения среднего звена не могут позволить себе приобретение дорогостоящего оборудования, которое можно разработать на основе простых и доступных цифровых камер бытового назначения.

Для создания цифрового микроскопа, обеспечивающего увеличение от 100 до 500 крат, может служить любая Web камера. Поскольку, зачастую возникает необходимость работы с мелкими деталями, платами, либо изучение органики, данное устройство может быть очень полезно.

В данном случае используется простая Web-камера SVEN IC-300 с максимальным разрешением 640x480, и разрешением сенсора 0.3 Мпикс, со стандартным чипом V399.



Рис. 1. Внешний вид камеры

Ценовая составляющая находится в районе 200 рублей.

На первом шаге при разборке необходимо снять пластиковые наклейки, защищающие плату, для данной модели, это осуществляется путем ослабления 5 небольших винтов. Затем, выкручивается объектив. В большинстве случаев проблем с этим не должно возникнуть. В результате у нас остается плата, сродни представленной на рисунке 2.



Рис. 2. Плата разобранной камеры

Как мы можем видеть, по центру находится CMOS датчик, который ни в коем случае нельзя повреждать.

Затем, из выкрученного объектива камеры необходимо достать небольшую линзу. Для этого, в камере данной модели пришлось отпилить часть пластиковой конструкции.



Рис. 3. Разобранный объектив и установленная в него линза

Теперь, данная линза переворачивается и помещается обратно в объектив. Для надежности нужно зафиксировать клеем, в нашем случае использовался пластиковый цилиндр, который позволил прижать линзу неподвижно.

Объектив устанавливается наоборот обратно в камеру, и закручивается.

Так как фокусировка механическая, в дальнейшем при проведении экспериментов необходимо произвести калибровку камеры (сфокусировать).

Полученное устройство необходимо зафиксировать к некоторому каркасу, в нашем случае, в качестве подручных средств был использован механический конструктор, а так же резиновая прокладка из – под фонаря, на которую наша плата крепится.



Рис. 4. Вид платы сверху

Важнейшим фактором любого микроскопа является хорошая освещенность, поэтому, под объективом устанавливается светодиодный фонарь. Он обеспечивает хорошую освещенность. По возможности необходимо обеспечить наличие источников света по бокам от объекта осмотра.

Внешний вид каркаса целиком представлен на рисунке 5.



Рис. 5. Собранный аппарат

Технология подключения камеры остается неизменной. В нашем случае мы работаем через среду MATLAB. Важным требованием для получения хорошего качества является установка максимально высокого разрешения на видеозахват.

После помещения на смотровое стекло объекта, необходимо выполнить фокусировку, это делается либо выкручиванием объектива в необходимом направлении, либо механическим перемещением самой камеры.

Рассмотрим результат работы нашего аппарата:

К сожалению, на 1х этапах, по неосторожности при изъятии линзы повредился CMOS сенсор, из за этого захватываемое изображение искажено, но в целом результат нагляден.

На рис.6 представлен книжный сеноед. Длина туловища целиком около 1 мм. На снимке можем наблюдать его голову, размер которой примерно 0.1-0.05 мм. Разрешение камеры взято небольшое, порядка 320x240.



Рис. 6. Пример работы аппарата

На рисунке 7 представлена крошечная капля крови, как мы видим, на данном изображении можно рассмотреть крошечные эритроциты. Разрешение камеры в данном случае максимальное – 640x480 пикс.

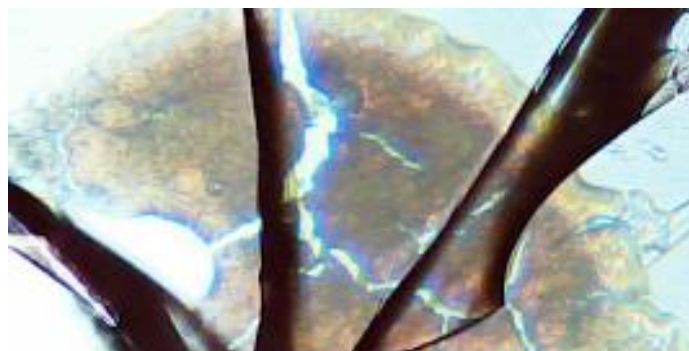


Рис. 7. Результат увеличения

Определяем приблизительно степень увеличения.

Исходный размер капли менее миллиметра ~ 0.9 мм. На выходе, получаем изображение на котором данный фрагмент имеет протяженность порядка 25 см. Таким образом увеличение приблизительно 280 – кратное.

Разумеется, важнейшим условием высокого качества являются характеристики Web камеры и качество освещения. Пример работы с использованием более качественной камеры представлен на рисунке 8.

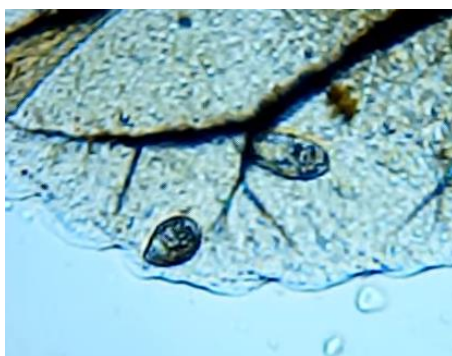


Рис. 8. Результат увеличения с использованием более качественной камеры

Таким образом, использование простейшего оборудования и библиотек обработки изображений позволяет создавать цифровые образы высокого качества для решения прикладных проблем анализа объектов микромира.

Список литературы

[1] Андрей Матвеев Собираем USB-микроскоп [Электронный ресурс] URL: <https://geektimes.ru/post/258660/> (Дата обращения 24.03.2016)

[2] Форум Самоделка [Электронный ресурс] URL: http://samodelka.ru/topic/4268/page__st__20 (Дата обращения 24.03.2016)

[3] Самодельный микроскоп из Web-камеры. [Электронный ресурс] URL: <http://wsesam.ru/text/Samodeljnyiy-mikroskop-iz-vebkameryi.html> (Дата обращения 25.03.2016)

Брынза Андрей Андреевич – студент 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

М.А. Горохова, М.О. Корлякова

РАСПОЗНАВАНИЕ ФИГУР ЗАДАННОЙ ФОРМЫ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

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

Распознавание образов является самой распространенной задачей, которую человеку приходится решать каждый день. Искусственные интеллектуальные системы распознавания образов активно интегрируются в современные системы управления и анализа информации. Примером может служить система распознавания по отпечаткам пальцев [1], системы распознавания текста и программы-переводчики [2]. Многие задачи распознавания можно определить как задачи анализа символов или знаков (распознавание дорожных знаков, поиск лица, поиск человека на изображении и т.п.). Сложность такого анализа связана с высокой изменчивостью распознаваемого объекта. Причем, если форму объекта можно описать примитивом (круг, эллипс, прямоугольник и т.п.), то многообразие размещений, поворотов и цветов делают задачу распознавания очень сложной. Таким образом, распознавание произвольных примитивов в произвольных условиях является актуальной и важной задачей.

Задачу распознавания визуальных объектов эффективно решают сверточные нейронные сети [3]. Сверточные нейронные сети применяются в задачах астронавигации, для распознавания рукописных символов, символов номерного знака автомобиля и др. Преимущества использования сверточных нейронных сетей, в отличие от других известных подходов в том, что они осуществляют анализ образов инвариантных к масштабированию, смещению, повороту, смене ракурса и прочим пространственным искажениям входного изображения [4].

Исследуемая нейронная сеть состоит из входного, двух сверточных и двух полносвязных слоев. Первые два сверточных слоя рассматриваются как слои для извлечения признаков на изображениях. Следующие два слоя являются слоями классификации. В них каждый нейрон соединен со всеми нейронами предыдущего слоя [5].

Рассмотрим возможности применения сверточных нейронных сетей для распознавания геометрических фигур на изображениях. При реализации модели распознавания использовался уже существующий программный пакет, который ориентирован на классификацию рукописных символов [6]. Основным является модуль, где происходит формирование сети, загрузка исходных образов, их обработка и непосредственно обучение. Для решения задачи анализа геометрических примитивов пришлось адаптировать часть функций и процедур. Исходные данные в базовом пакете формировались программно, в то время как мы подавали входные образы «напрямую» и искусственно создавали метки.

Обучение нейронной сети происходит по следующему принципу: в начале необходимо подать на вход обучающую выборку, состоящую из различных классов изображений (эллипс, окружность, квадрат, прямоугольник, треугольник и др.) размером 28x28 пикселей, отличающихся различными изменениями (поворот на угол, масштаб, смещение по осям). Количество образцов одного класса может быть любым, но для получения наилучшего результата оно должно быть не меньше 2000 образцов. Для каждого класса изображений создаются свои метки, чтобы при тестировании легко было отличить классы друг от друга. Так же на вход подается тестовая выборка, которая формируется аналогично обучающей, за одним различием то, что количество образцов любого класса должно быть достаточным для достоверности тестирования. В рамках представленной модели использована выборка из 200 примеров всех классов.

Далее происходит обучение сформированной сети, задаются параметры: количество эпох обучения, количество итераций и количество образцов для пересчета Гессияна функции ошибки обучения. Данные параметры универсальны и могут использоваться для различных входных выборок. Обучение осуществляется с использованием стохастического диагонального метода Левенберга-Марквардта[7].

Основная функция это создание обучающей и тестовой выборки. Существует множество вариантов для формирования данной выборки. Рассмотрим один вариант создания, который происходит по следующему принципу: загружаем полноценное изображение любого размера, затем для различия между образцами осуществляется поворот на некий угол. Находим саму фигуру, формируем рамку вокруг нее, затем делаем кадрирование и задаем нужный размер. Сохраняем и делаем так с каждой. За основу было выбрано 10 классов фигур. Количество образов каждого класса 2500 объектов для обучающей выборки и 700 объектов для тестовой.



Рис. 1. Примеры образов

После того, как обучим сеть, необходимо ее сохранить для тестирования. Тестировать обученной сети происходит на примере реальных изображений. База тестовых примеров была построена по следующему принципу: загружаем изображение, делаем его черно-белым, инвертируем, разбиваем на объекты (с использованием функции ImageProcessingToolBoxMatlab) и каждому объекту присваиваем свой идентификационный номер по порядку. Каждый объект кадрируем, масштабируем до нужного размера (28x28 пикселей) и ограничиваем рамкой шириной 2 пикселя для облегчения дальнейшего тестирования.

Таблица 1. Результаты тестирования

Изображение	Всего образов	Кол-во правильно классифицированных	Кол-во неправильно классифицированных	Ошибка классификации
1	27	14	13	0,48
2	30	17	13	0,43
3	16	7	9	0,56
4	29	11	17	0,58
5	9	5	4	0,44

Результаты классификации от нейросети сравнивались с экспертной разметкой. После проверки каждого образа из тестовой выборки, выдавался ответ, к какому классу он относится. Затем путем сравнения эталона и тестового образа делался вывод о том, правильно ли компьютер классифицировал данный объект.

По результатам тестирования из таблицы 1 видно, что метод работает хорошо и с качеством выше среднего. Кроме того, следует отметить, что для тестов использованы фотореалистичные изображения, которые подвергались фильтрации для упрощения объектов, что приводит к значительному искажению формы. Однако, нейронная сеть позволила классифицировать значительную часть объектов сцены даже для таких жестких условий. Это позволяет утверждать, что технология сверточных сетей эффективна при распознавании примитивов для широкого класса приложений.

Список литературы

[1] Аппаратная реализация методов идентификации по отпечаткам пальцев: [Электронный ресурс]. – http://www.gsm-guard.net/press2_1.html (дата обращения 18.03.2016)

[2] Системы распознавания образов: [Электронный ресурс]. – <http://referatbox.com/5415/sistemy-raspoznavaniya-obrazov/> (дата обращения 18.03.2016)

[3] Макаренко А.А. Сверточные нейронные сети в задаче классификации изображений // Информационные системы. Вып. 4.: Тр. постоянно действующего научно-техн. семинара. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2006 – С. 3-9.

[4] Применение нейросетей в распознавании изображений: [Электронный ресурс]. – <https://geektimes.ru/post/74326/> (дата обращения 18.03.2016)

[5] Применение сверточной нейронной сети для распознавания рукописных цифр [Электронный ресурс]. – <http://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-svertochnoy-neyronnoy-seti-dlya-raspoznavaniya-rukopisnyh-tsifr> (дата обращения 18.03.2016)

[6] База данных MNIST [Электронный ресурс]. – <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/index.html> (дата обращения 18.03.2016)

[7] Метод Левенберга-Марквардта [Электронный ресурс]. – <http://alglib.sources.ru/optimization/levenbergmarquardt.php#header0> (дата обращения 18.03.2016)

Горохова Мария Александровна – студент КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана. E-mail: mashulya4492@yandex.ru

Корлякова Мария Олеговна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Тин Эй Чжо, Тун Тун Чжо, А.М. Макаренков

РАСЧЕТ PID-РЕГУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

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

Работа посвящена проблеме повышения точности систем автоматического управления в условиях наличия случайных параметрических возмущений. В качестве системы автоматического управления рассматривается электрогидравлический следящий привод (ЭГСП) с PID-регулятором, обеспечивающим улучшение его динамических свойств. Для данного типа привода характерна заметная чувствительность к различным внешним факторам, носящим, в основном, случайный характер и приводящим к изменениям параметров привода в процессе эксплуатации. К ним относятся, например, изменение температуры рабочей жидкости или изменение процента содержания газовой фазы в ней. В первом случае такие изменения происходят относительно медленно по сравнению со временем протекания переходных процессов, поэтому параметрические возмущения такого рода можно представить в виде постоянных случайных параметров (величин). Во втором случае изменения значений параметров происходят относительно быстро, что позволяет рассматривать их как случайные процессы и считать эти параметры переменными. В работе предлагается способ компенсации влияния быстрых случайных изменений параметров ЭГСП путем соответствующей оптимизации параметров PID-регулятора, найденных без учета случайности параметров модели ЭГСП.

Рассматривается задача оптимизации параметров PID-регулятора в контуре управления ЭГСП с учетом случайности модуля объемной упругости рабочей жидкости, приводящей к случайности коэффициента сжатия в уравнениях расходов исходной математической модели ЭГСП, обозначаемого далее как $k_{сж}(t)$. Случайные изменения данного коэффициента на интервале исследования имеют переменный характер, что позволяет рассматривать его как случайный процесс.

Стандартной формой линеаризованной математической модели ЭГСП с PID-регулятором является следующее дифференциальное уравнение:

$$a_6(t)y^{(6)}(t) + a_5(t)y^{(5)}(t) + a_4(t)y^{(4)}(t) + a_3(t)y^{(3)}(t) + a_2(t)y''(t) + a_1y'(t) + a_0y(t) = b_2u''(t) + b_1u'(t) + b_0u(t), \quad (1)$$

где коэффициенты $a_2(t) \dots a_6(t)$ зависят от указанного случайного параметра, а значит также являются случайными функциями времени и могут быть

представлены в виде канонических разложений случайных процессов, то есть в виде линейной комбинации некоррелированных случайных величин a_{is} , являющихся коэффициентами разложений этих случайных процессов по системе неслучайных координатных функций $\Psi_{is}^a(t)$:

$$a_i(t) = m_{a_i}(t) + \sum_{s=1}^r a_{is} \Psi_{is}^a(t), \quad i = \overline{0, n-1}, \quad (2)$$

где случайные коэффициенты a_{is} имеют нулевые математические ожидания и дисперсии, равные единице. Алгоритм вычисления проекционных характеристик координатных функций можно найти в [2].

Задача оптимизации параметров регулятора формулируется следующим образом. Требуется определить оптимальные параметры PID-регулятора, обеспечивающие заданные динамические характеристики системы управления с учетом случайности коэффициента сжатия рабочей жидкости, обусловленной быстроизменяющимся процентом содержания газовой фазы.

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 системы ступенчатого сигнала $u(t) = 0,01 \cdot H(t)$ [В]. Параметры PID-регулятора $k_{\text{П}}, k_{\text{И}}, k_{\text{Д}}$ входят в выражения для коэффициентов уравнения (1).

Будем полагать, что случайный коэффициент $k_{\text{сж}}(t)$, учитывающий случайность модуля объемной упругости рабочей жидкости, являются гауссовым случайным процессом, для которого заданы математическое ожидание $m_{k_{\text{сж}}}(t) = 6,3350 \cdot 10^{-10}(t)$ и автокорреляционная функция

$$R_{k_{\text{сж}}k_{\text{сж}}}(t_1, t_2) = 2,0116 \cdot 10^{-23} e^{-|t_1 - t_2|}, \quad \text{имеющие размерности } \left[\frac{M^5}{H} \right] \text{ и } \left[\frac{M^{10}}{H^2} \right]$$

соответственно.

Оптимизацию параметров $k_{\text{П}}, k_{\text{И}}, k_{\text{Д}}$ предлагается выполнять в два этапа. На первом этапе ищутся значения данных параметров, обеспечивающие наилучшее приближение выходного сигнала системы к эталонному переходному процессу $x_{\text{э}}(t)$ при условии, что коэффициент сжатия неслучайный, его величина постоянна и равна математическому ожиданию случайного коэффициента, т.е. $k_{\text{сж}} = 6,3350 \cdot 10^{-10} \frac{M^5}{H}$. Поиск параметров

PID-регулятора на данном этапе осуществляется путем минимизации следующего функционала, построенного с использованием проекционной модели системы управления [1], включающей ЭГСП и PID-регулятор:

$$J(k_{\Pi}, k_{И}, k_{Д}) = \left[\mathbf{C}^{x_{\mathcal{E}}} - \mathbf{C}^{x_p}(k_{\Pi}, k_{И}, k_{Д}) \right]^T \left[\mathbf{C}^{x_{\mathcal{E}}} - \mathbf{C}^{x_p}(k_{\Pi}, k_{И}, k_{Д}) \right], \quad (3)$$

где $\mathbf{C}^{x_{\mathcal{E}}}$ – проекционная характеристика эталонного переходного процесса $x_{\mathcal{E}}(t)$; $\mathbf{C}^{x_p}(k_{\Pi}, k_{И}, k_{Д})$ – проекционная характеристика переходного процесса, вычисленная по проекционной модели системы управления для заданных значений параметров PID-регулятора.

Проекционная модель системы является результатом конечномерной аппроксимации исходной непрерывной модели, выполняемой с использованием методов теории матричных операторов [1].

При начальных значениях параметров PID-регулятора $k_{\Pi} = 1, k_{И} = 0, k_{Д} = 0$, переходный процесс детерминированной системы имеет вид, представленный на рис. 1 (пунктирная линия – $x_{\mathcal{E}}(t)$, непрерывная линия – $x(t)$). Путем минимизации функционала (3) находим значения параметров PID-регулятора $k_{\Pi} = 69,5929, k_{И} = 4,8419, k_{\dot{A}} = 1,8544$, при которых переходный процесс имеет вид, представленный на рис. 2 (пунктирная линия – $x_{\mathcal{E}}(t)$, непрерывная линия – $x(t)$).

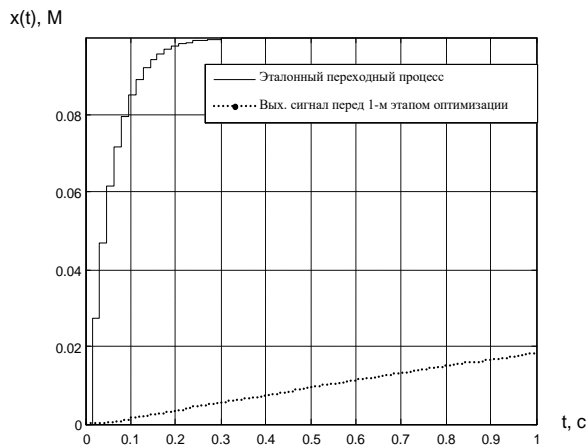


Рис. 1

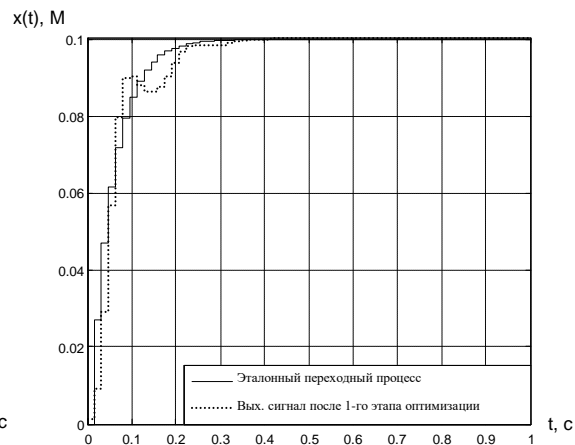


Рис.2

На втором этапе выполняется повторная оптимизация параметров $k_{\Pi}, k_{И}, k_{Д}$ путем минимизации следующего функционала:

$$J(k_{\Pi}, k_{И}, k_{Д}) = \left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \left[c_{ij}^{\mathcal{E}m}(k_{\Pi}, k_{И}, k_{Д}) \right]^2 \right]^{1/2} + \left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \left[c_{ij}^R(k_{\Pi}, k_{И}, k_{Д}) \right]^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

где $c_{ij}^R(k_{\Pi}, k_{И}, k_{Д})$ – элементы квадратной матрицы проекционной характеристики автокорреляционной функции выходного сигнала стохастиче-

ской модели ЭГСП $\mathbf{C}^{R_{xx}}(k_{II}, k_{HI}, k_{DI})$, вычисляемой по усредненной проекционной модели [2]; p – число членов разложения по ортогональному базису функций Уолша; $c_{ij}^{\varepsilon_m}(k_{II}, k_{HI}, k_{DI})$ – элементы квадратной матрицы проекционной характеристики $\mathbf{C}^{\varepsilon_m}(k_{II}, k_{HI}, k_{DI})$, вычисляемой как

$$\mathbf{C}^{\varepsilon_m}(k_{II}, k_{HI}, k_{DI}) = \mathbf{C}^x (\mathbf{C}^x)^T - \mathbf{C}^{m_x}(k_{II}, k_{HI}, k_{DI}) \left(\mathbf{C}^{m_x}(k_{II}, k_{HI}, k_{DI}) \right)^T,$$

где \mathbf{C}^x – проекционная характеристика выходного сигнала ЭГСП для k_{II}, k_{HI}, k_{DI} , найденных на первом этапе алгоритма оптимизации без учета фактора случайности параметров ЭГСП; $\mathbf{C}^{m_x}(k_{II}, k_{HI}, k_{DI})$ – проекционная характеристика математического ожидания выходного сигнала стохастической модели ЭГСП, также вычисляемая по усредненной проекционной модели [2]; T – знак транспонирования.

Минимизируя функционал (4) при начальных значениях $k_{II}=69,5929$, $k_{HI}=4,8419$, $k_{DI}=1,8544$, полученных на первом этапе оптимизации, находим следующие оптимальные значения параметров PID-регулятора $k_{II}=40,4284$, $k_{HI}=0,0042$, $k_{DI}=4,1849$. Видно, что новые значения отличаются от найденных ранее. Таким образом, удалось скомпенсировать влияние случайности параметров ЭГСП за счет коррекции значений параметров PID-регулятора, найденных для детерминированной модели ЭГСП.

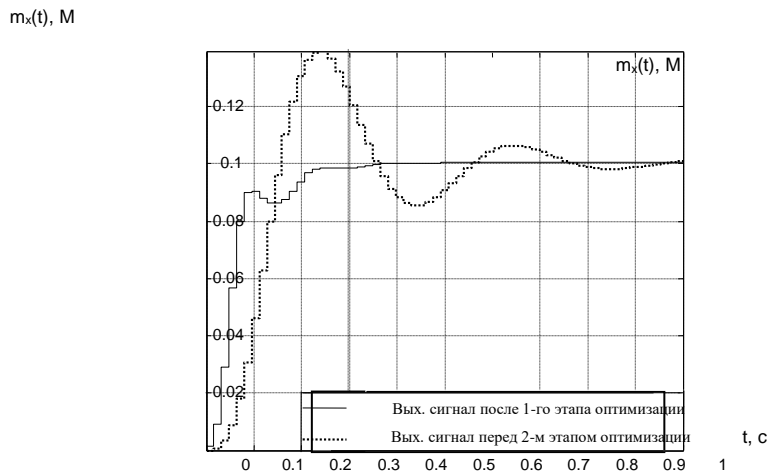


Рис. 3

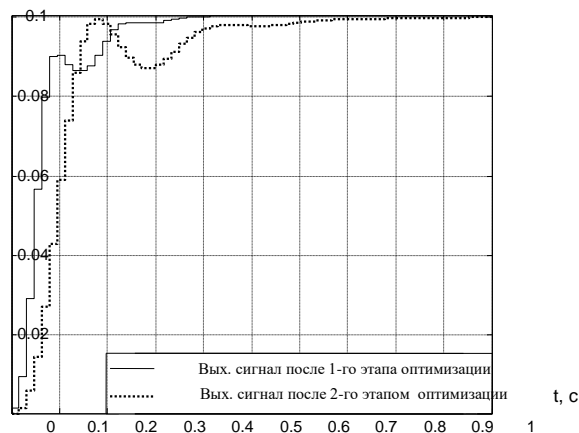


Рис. 4

На рис. 3 представлен график выходного сигнала ЭГСП после выполнения первого этапа оптимизации параметров PID-регулятора без учета случайности параметров ЭГСП (непрерывная линия) и график математического ожидания этого же сигнала с учетом случайности параметров ЭГСП (пунктирная линия). Видно, что случайные параметрические возмущения приводят к заметному изменению среднего значения выходного сигнала ЭГСП, то есть ухудшает точность работы следящей системы управления.

На рис. 4 показан результат второго этапа оптимизации, после выполнения которого среднее значение выходного сигнала ЭГСП при случайных параметрических возмущениях (пунктирная линия) практически не отличается от выходного сигнала ЭГСП не имеющего случайных параметрических возмущений (непрерывная линия).

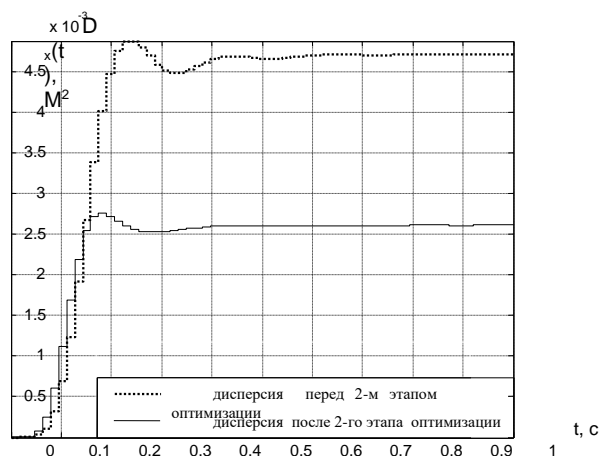


Рис.5

На рис. 5 представлено сравнение дисперсии выходного сигнала стохастической модели ЭГСП до выполнения второго этапа оптимизации параметров PID-регулятора (непрерывная линия) и после выполнения этого этапа (пунктирная линия). Видно, что второй этап оптимизации позволил

не только скомпенсировать отклонение среднего значения выходного сигнала ЭГСП, вызванное параметрическими возмущениями (рис. 4), но и заметно уменьшить его дисперсию и, соответственно, среднеквадратическое отклонение, что также положительно сказывается на точности работы следящей системы

Таким образом, предлагается метод оптимизации параметров PID-регуляторов, позволяющий учесть влияние случайности параметров объекта управления. По сравнению с традиционным подходом к синтезу регуляторов, предлагаемый метод обеспечивает лучшее качество регулирования, как следствие, более высокую точность работы системы управления в целом.

Список литературы

[1] *Латин С.В., Егунов 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., Егунов Н.Д., Макаренков А.М.* и др. Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем. — М.: Физматлит, 2003. — 400 с.

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: htaminncyaw@gmail.com

Макаренков А.М. - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru

А.А. Брынза, М.О. Корлякова

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТКРЫТОЙ БИБЛИОТЕКИ TENSORFLOW

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

TensorFlow является библиотекой программного обеспечения с открытым исходным кодом, предназначенная для численного расчета с использованием графов потока данных. Узлы в графе представляют собой математические операции, в то время как ребра графа представляют собой многомерные массивы данных (тензоры), сообщаемые между собой. Гибкая архитектура позволяет развертывать вычисления для одного или нескольких процессоров или графических процессоров в настольном компьютере, сервере, мобильном устройстве или с помощью одного API (интерфейс программирования, интерфейс создания приложений). TensorFlow первоначально была разработана учеными и инженерами, работающими в команде Google в рамках научно-исследовательской компании «Machine Intelligence» для осуществления машинного обучения и для глубокого исследования нейронных сетей, но система является достаточно обобщенной и может успешно применяться в широком спектре других научных областей [1].

Созданная командой Google Brain, TensorFlow представляет вычисления в виде графов потоков данных, отслеживающих свое состояние (stateful dataflow graph). Библиотека позволяет реализовывать вычисления на аппаратных средствах широкого спектра, от потребительских устройств под управлением Android до крупных гетерогенных систем с несколькими GPU. По утверждению разработчиков, TensorFlow без существенного изменения кода позволяет перенести выполнение ресурсоемких вычислительных задач из среды с одним CPU в гетерогенную быструю среду с несколькими GPU. Принимая во внимание эти возможности, становится очевидно, что TensorFlow призвана обеспечить массовый параллелизм и высокую масштабируемость машинного обучения для всех.

Центральным объектом TensorFlow является граф потока данных, представляющий вычисления. Вершины графа представляют операции, а ребра – тензоры (многомерные массивы, являющиеся основой TensorFlow). Граф потока данных в целом является полным описанием вычислений, которые реализуются в рамках сессии (session) и выполняются на устройствах (device) (CPU или GPU). Как и многие другие современные системы для научных вычислений и машинного обучения, TensorFlow имеет хорошо документированный API для Python, где тензоры представлены в виде массивов ndarray библиотеки NumPy. TensorFlow выполняет вычисления с

помощью высоко оптимизированного C++, а также поддерживает нативный API для C и C++. [3]

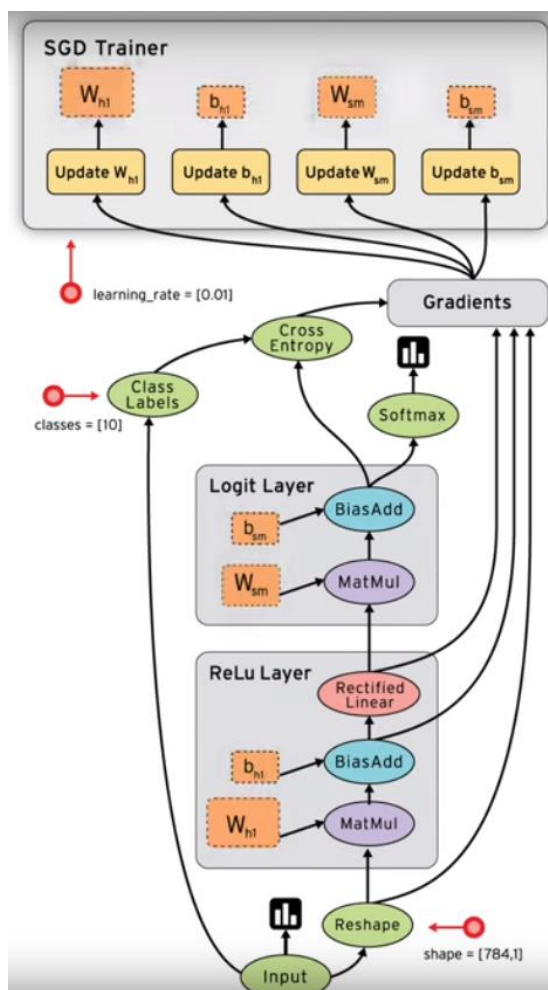


Рис. 1. Схема системы обучения

Вершины графа (операции) получают входные данные (тензоры), выполняют вычисления, а затем передают их результаты на вход следующим операциям и т.д. Операции выполняются асинхронно и, при возможности, параллельно. [1].

Ключевые особенности TensorFlow:

– Высокая гибкость:

TensorFlow не является жесткой библиотекой нейронных сетей. Если существует возможность выразить вычисление как граф потока данных, то использование TensorFlow актуально. Осуществляется построение графика, и написание внутреннего цикла, в котором происходят вычисления. Компания Google предоставляет полезные инструменты для сборки общих подграфов в нейронных сетях, но особенностью является то, что пользователи в TensorFlow могут создавать свои собственные библиотеки более высокого уровня. Установ-

ка библиотеки осуществляется быстро и безболезненно посредством команды *pip install*. [1]

– Высокая мобильность:

TensorFlow работает на процессорах или графических процессорах, а также на персональном компьютере, сервере или мобильной вычислительной платформе. Система позволяет «поиграть» с технологией машинного обучения на личном ноутбуке без необходимости какого-либо специального оборудования. TensorFlow так-же позволяет масштабировать и обучать модель быстрее за счет графических процессоров без каких-либо изменений кода. Система позволяет развернуть обученную модель на мобильном устройстве, в то же время, если вы хотите запустить модель как сервис в облаке, возможность контейнеризации в TensorFlow позволяет это осуществить. [1]

Пример обучения системы посредством TensorFlow. [2]

На вход подается функция вида:

$$y = 7.0 \sin(0.75x) + 0.5x + \epsilon \quad (1)$$

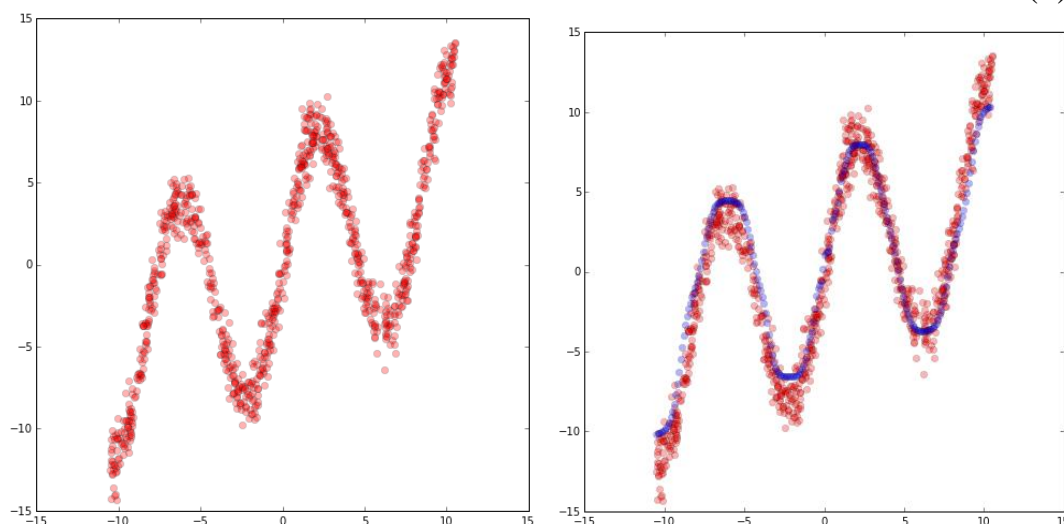


Рис. 2-3. Графики обучения системы

Как мы видим, нейронная сеть обучилась по данной синусоидальной функции очень хорошо, однако, при подаче проинвертированной функции, наблюдается заметное снижение точности обучения. После подачи тестовой выборки.

Обучение, при большем числе примеров, с числом эпох равным 10000 [2]

На вход подается инверсия функции (1)

$$x = 7.0 \sin(0.75y) + 0.5y + \epsilon.$$

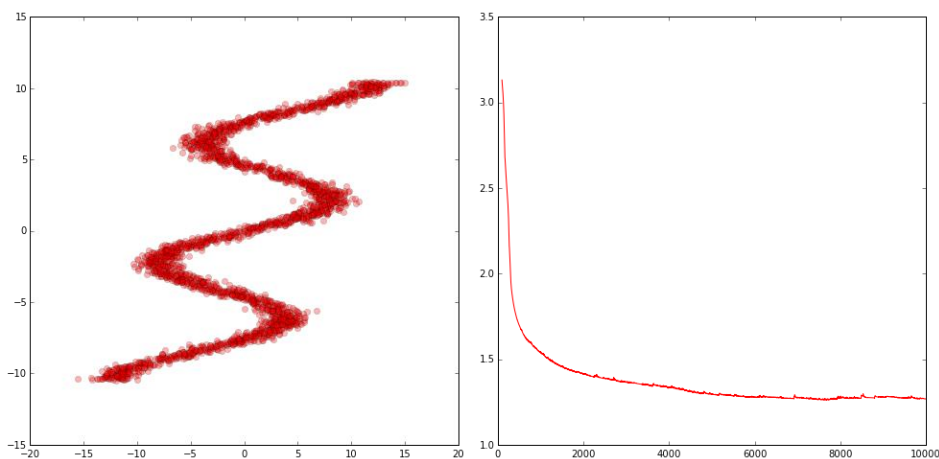


Рис. 4-5. Обучение системы и график зависимости ошибки от эпох

Результат обучения:

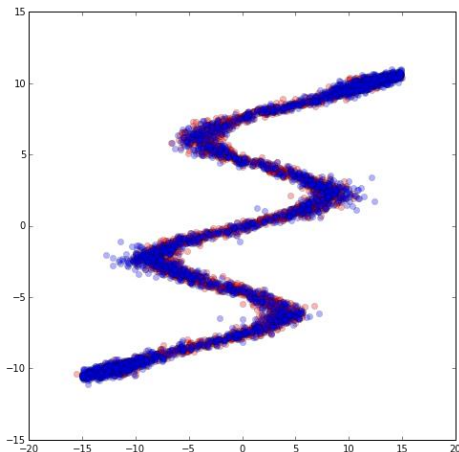


Рис. 6. Результат обучения системы

Анализ проведенных экспериментов показал высокое качество обучения и прозрачную в освоении модель взаимодействия с пользователем.

Список литературы

[1] TensorFlow is an Open Source Software Library for Machine Intelligence [Электронный ресурс] URL: <https://www.tensorflow.org> (дата обращения: 17.03.2015)

[2] Mixture Density Networks with TensorFlow // Nov. 25, 2015 [Электронный ресурс] URL: <http://blog.otoro.net/2015/11/24/mixture-density-networks-with-tensorflow/> (дата обращения: 18.03.2015)

[3] TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems // November, 09, 2015 [Электронный ресурс] URL: <http://blog.otoro.net/2015/11/24/mixture-density-networks-with-tensorflow/> (дата обращения: 18.03.2015)

Брынза Андрей Андреевич – студент 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

Е.А. Терехова, М.О. Корлякова

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИМИТИВОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

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

Системы распознавания образов, относящиеся к системам компьютерного зрения, в последнее время получили широкое распространение. Сегодня задачи распознавания образов решаются, как и с помощью простых и небольших устройств, распространенных в наше время, таких как смартфоны, коммуникаторы так и сложных комплексов систем занимающихся решением различного рода задач управления. Из-за широкого распространения подобных устройств довольно много исследований посвящено теме распознавания. Рассмотрим методы распознавания примитивов и сравним области их применения.

Под графическим примитивом понимается простейший геометрический объект (прямая, угол, квадрат, окружность), отображаемый на экране дисплея [1]. Назначением примитивов является выделение особенностей конкретных изображений для последующей работы с ними. В качестве примеров будем рассматривать детектор углов Харриса и преобразование Хафа.

Детектор углов Харриса реализует извлечение особых точек изображения, а именно углов [2]. Принцип работы детектора приведен на рисунке 1. Для некоторого изображения рассматривается окно W (зависит от размера изображения) с центром (x, y) , а также его сдвиг на (u, v) .

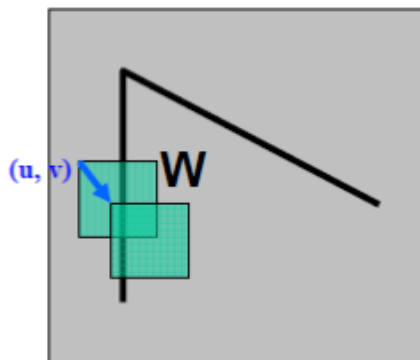


Рис. 1. Изображение поиска углов

После сдвига окна вычисляется взвешенная сумма квадрата разностей между сдвинутым и исходным окном (т.е. изменение окрестности точки (x, y) при сдвиге на (u, v)). Мера отклика каждого пикселя (x, y) определяется как интегральное объединение всех сдвигов вокруг (x, y) .

Углы определяются на основании оценки меры отклика. Значение меры отклика положительно для угловых особых точек. Затем производится отсечение точек по найденному порогу меры отклика (т.е. те точки, у которых значение меры отклика меньше некоторого порога, исключаются из рассмотрения). Далее находятся локальные максимумы функции отклика по окрестности заданного радиуса и выбираются в качестве угловых особых точек[2].

Преобразование Хафа (Hough Transform)[3] — алгоритм, численный метод, применяемый для извлечения элементов из изображения. Используется в анализе изображений, цифровой обработке изображений и компьютерном зрении. Предназначен для поиска объектов, принадлежащих определенному классу фигур, с использованием процедуры голосования. Процедура голосования применяется к пространству параметров, из которого и получаются объекты определенного класса фигур по локальному максимуму в так называемом накопительном пространстве, которое строится при вычислении трансформации Хафа[4].

Классический алгоритм преобразования Хафа был создан для нахождения линий на изображениях, но существуют версии для поиска окружностей [2], а также произвольных, параметрически описываемых, примитивов[1]. Основная проблема этих моделей – высокая вычислительная и емкостная сложность.

Проанализируем с помощью детекторов углов и линий две группы изображений:

- Изображения естественных сцен (фотографии снятые в различных помещениях, уличные сцены, пейзажи)
- Простые изображения, созданные в графических редакторах. (геометрические фигуры, объекты, имеющие четкие контуры и цвета.)

При анализе будем нормировать результаты размерами изображений. Анализ производится по трем характеристикам: число найденных объектов, среднее время обработки одного пикселя, оценка поиска примитива (экспертная оценка наблюдателя). Результаты анализа представлены таблице 1. Эксперименты проводятся в среде Matlab с использованием библиотеки Image Processing Toolbox.

Представленные методы поиска примитивов имеют значительные недостатки. Например, низкое качество поиска примитивов. Кроме того, результаты зависели от сложности изображений предложенных для детектирования. При детектировании линий и углов у изображений, которые относятся к первой группе, наблюдалось значительное количество найденных объектов, большинство из которых не относились к искомому, тогда как у изображений второй группы были найдены все, присутствующие на изображениях, искомые объекты (углы, линии).

Таблица 1. Анализ работы алгоритмов

Эксперимент	Число объектов	Среднее время обработки для одного пикселя (с)	Оценка поиска примитива (т.е экспертная оценка)
Детектирование линий на изображениях первой группы	Множество объектов (>100)	$\approx 1 \cdot 10^{-6}$ с	Не точное и ошибочное определение некоторых линий.
Детектирование линий на изображениях второй группы	Все линии присутствующие на изображениях (~10)	$\approx 3 \cdot 10^{-6}$ с	Обнаружение практически всех линий.
Детектирование углов на изображениях первой группы	Множество объектов	$\approx 7 \cdot 10^{-7}$ с	Выделение объектов в большинстве случаев не являющимися углами
Детектирование линий на изображениях первой группы	Все углы изображений	$\approx 2 \cdot 10^{-7}$ с	Выделение всех углов с небольшими погрешностями

В результате экспериментов можно сделать вывод, что чем проще выбирается изображений (с малым количеством цветов, мелких деталей, элементов), тем эффективнее будут работать методы поиска углов и линий. Однако многие алгоритмы анализа изображений включают в себя рассмотренные методы в качестве предварительных процедур обработки кадров.

Список литературы

- [1] Детекторы линий [Электронный ресурс] URL: http://habrahabr_full.complexdoc.ru/1908260.html (дата обращения: 20.01.2016)
- [2] Шапиро Л. Стокман Дж. Компьютерное зрение — М.: БИНОМ.Лаборатория знаний, 2013г—741с.
- [3] Преобразование Хафа [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Преобразование_Хафа (дата обращения: 20.01.2016)
- [4] Рубчинский А.А. «Новые возможности построения детекторов линий». Электронный журнал «Системный анализ в науке и образовании» Выпуск №1, 2009 г.

Терехова Елена Анатольевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана.
E-mail: lena.terekhova2012@yandex.ru

Корлякова Мария Олеговна - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mkorlyakova@yandex.ru

Тун Тун Чжо, А.М. Макаренков, Тин Эй Чжо, Мьо Паинг Сат

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ ПО СЛУЧАЙНОМУ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМУ ВОЗМУЩЕНИЮ

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

Обеспечение требуемого качества управления с учетом фактора неопределенности параметров объекта является одной из актуальных задач современной теории управления. В работе рассматривается управление электрогидравлическим следящим приводом (ЭГСП) по принципу компенсации параметрического возмущения при отработке случайных сигналов с ненулевым математическим ожиданием. Задача отработки такого рода сигналов возникает при проведении механических испытаний машин и оборудования на случайную вибрационную нагрузку, где требуется воспроизведение испытательных сигналов, включающих как случайную, так и детерминированную составляющую. Случайность физических параметров, характерная для ЭГСП, может привести к существенным искажениям статистических характеристик формируемых вибрационных воздействий, например, к существенным колебаниям дисперсии формируемого вибрационного воздействия. Это является особенностью поведения ЭГСП как стохастической системы, состоящей в том, что корреляционная функция ее выходного сигнала определяется не только корреляционной функцией входного сигнала, как это имеет место для детерминированной системы, но и его математическим ожиданием.

Предлагается способ компенсации влияния быстрого случайного изменения одного из параметров ЭГСП на дисперсию его выходного сигнала (формируемого вибрационного воздействия). Предполагается, что на вход ЭГСП поступает сумма случайного и детерминированного сигналов. При этом случайный сигнал представляет собой центрированный гауссов случайный процесс, а детерминированный – периодический сигнал в виде гармонической функции.

В качестве случайного физического параметра выступает модуль объемной упругости рабочей жидкости, случайность которого приводит к случайности коэффициента сжатия в уравнениях расходов исходной математической модели ЭГСП, обозначаемого далее как $k_{сж}(t)$. Случайные изменения данного коэффициента на интервале исследования имеют переменный характер, и он рассматривается как гауссов случайный процесс.

Линеаризованная математическая модель ЭГСП представляется в следующей стандартной форме:

$$a_5(t)x^{(5)}(t) + a_4(t)x^{(4)}(t) + a_3(t)x'''(t) + a_2(t)x''(t) + a_1(t)x'(t) + a_0x(t) = b_0y(t), \quad (1)$$

где коэффициенты $a_1(t) \dots a_5(t)$ зависят от указанного случайного параметра, а значит также являются случайными функциями времени и могут быть представлены в виде канонических разложений случайных процессов, то есть в виде линейной комбинации некоррелированных случайных величин a_{is} , являющихся коэффициентами разложений этих случайных процессов по системе неслучайных координатных функций $\Psi_{is}^a(t)$:

$$a_i(t) = m_{a_i}(t) + \sum_{s=1}^r a_{is} \Psi_{is}^a(t), \quad i = \overline{0, n-1},$$

где случайные коэффициенты a_{is} имеют нулевые математические ожидания и дисперсии, равные единице. Алгоритм вычисления проекционных характеристик координатных функций $\Psi_{is}^a(t)$ можно найти в [2].

Проекционная аппроксимация модели (1) с использованием техники матричных операторов [1] по методике, изложенной в [3], позволяет записать решение задачи статистического анализа в следующей операторной форме:

$$\mathbf{C}^{R_{xx}} = M \left[\mathbf{A} \mathbf{C}^{R_{yy}} \mathbf{A}^T \right] + M \left[\mathbf{A} \mathbf{C}^{m_y} \left(\mathbf{C}^{m_y} \right)^T \mathbf{A}^T \right] - \mathbf{C}^{m_x} \left(\mathbf{C}^{m_x} \right)^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{C}^{m_x} = M \left[\mathbf{A} \right] \mathbf{C}^{m_y} \quad (3)$$

где \mathbf{A} – квадратная матрица проекционной характеристики (матричный оператор) системы; $\mathbf{C}^{R_{xx}}$ – квадратная матрица проекционной характеристики корреляционной функции выходного сигнала; $\mathbf{C}^{R_{yy}}$ – проекционная характеристика корреляционной функции входного сигнала; \mathbf{C}^{m_x} и \mathbf{C}^{m_y} – соответственно проекционные характеристики математического ожидания выходного и входного сигнала; $M[\cdot]$ – оператор математического ожидания; t – знак транспонирования.

Из выражения (2) видно, что влияние ненулевого математического ожидания обусловлено вторым и третьим слагаемым в его правой части. Идея компенсации этого влияния состоит во введении матрицы множителя на некоторую функцию $f(t)$ (матричный оператор умножения \mathbf{A}^f) в первое слагаемое, т.е. в преобразовании (2) к виду

$$\mathbf{C}^{R_{xx}} = M \left[\mathbf{A} \mathbf{A}^f \mathbf{C}^{R_{yy}} \left(\mathbf{A}^f \right)^T \mathbf{A}^T \right] + M \left[\mathbf{A} \mathbf{C}^{m_y} \left(\mathbf{C}^{m_y} \right)^T \mathbf{A}^T \right] - \mathbf{C}^{m_x} \left(\mathbf{C}^{m_x} \right)^T, \quad (4)$$

что соответствует введению множителя 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 случайной 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

$$R_{\tilde{y}^*\tilde{y}^*}(t_1, t_2) = kDe^{-b|t_1-t_2|}. \quad (5)$$

Тогда выражение (4) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \mathbf{C}^{R_{xx}} = M & \left[\mathbf{A} \left(\mathbf{A}^f \mathbf{C}^{R_{yy}} \left(\mathbf{A}^f \right)^T + \mathbf{C}^{R_{\tilde{y}^*\tilde{y}^*}} \right) \mathbf{A}^T \right] + \\ & + M \left[\mathbf{A} \mathbf{C}^{m_y} \left(\mathbf{C}^{m_y} \right)^T \mathbf{A}^T \right] - \mathbf{C}^{m_x} \left(\mathbf{C}^{m_x} \right)^T, \end{aligned} \quad (6)$$

а сигнал на входе ЭГСП будет формироваться следующим образом:

$$y(t) = \tilde{y}(t)f(t) + \tilde{y}^*(t) + \bar{y}(t). \quad (7)$$

Если детерминированная составляющая является гармоническим сигналом $\bar{y}(t) = A \sin \omega t$, то функция $f(t)$ может выглядеть так:

$$f(t) = 1 - r \frac{|A \sin(\omega t + \varphi)|}{\max |A \sin(\omega t + \varphi)|}, \quad (8)$$

где коэффициент r определяет глубину компенсации, а φ – фазовый сдвиг, позволяющий получить “противофазный” сигнал $f(t)$, гасящий колебания дисперсии выходного сигнала системы.

Для нахождения параметров r , φ и k можно воспользоваться приемом минимизации функционала, выражающего близость корреляционных функций выходного сигнала стохастической системы (1) и детерминированной системы, также описываемой уравнением (1), в котором все случайные коэффициенты заменены своими математическими ожиданиями. В качестве критерия близости можно использовать следующую метрику пространства $L^2([0, T] \times [0, T])$:

$$\rho(r, \varphi, k) = \left(\int_0^T \int_0^T \left[R_{xx}^d(t_1, t_2) - R_{xx}^s(t_1, t_2, r, \varphi, k) \right]^2 dt_1 dt_2 \right)^{1/2}, \quad (9)$$

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.

Проекционная аппроксимация модели (1) позволяет представить функционал (9) в следующей удобной для вычисления форме:

$$J(r, \varphi, k) = \left[\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p [c_{ij}^{\varepsilon R}(r, \varphi, k)]^2 \right]^{1/2}, \quad (10)$$

где $c_{ij}^{\varepsilon R}(r, \varphi, k)$ – элементы квадратной матрицы, вычисляемой как

$$C^{\varepsilon R}(r, \varphi, k) = C^{R_{xx}^d} - C^{R_{xx}^s}(r, \varphi, k), \quad (11)$$

где $C^{R_{xx}^d}$ 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.

Проекционная характеристика $C^{R_{xx}^s}(r, \varphi, k)$ в (11) вычисляется по усредненной проекционной модели системы (1) с использованием приема разложения случайной обратной матрицы \mathbf{A} в ряд Неймана с последующим аналитическим усреднением членов этого ряда [2].

В качестве примера решения задачи компенсации влияния случайности параметров ЭГСП, описываемого моделью (1), на дисперсию его выходного сигнала, рассмотрим воспроизведение детерминированного сигнала $\bar{y}(t) = 0.01 \sin(34.89t)$ с наложенной на него центрированной случайной составляющей $\tilde{y}(t)$ с корреляционной функцией $R_{\tilde{y}\tilde{y}}(t_1, t_2) = 1 \cdot 10^{-5} e^{-20|t_1 - t_2|}$.

Для случайного коэффициента $k_{сжс}(t)$ задано математическое ожидание $m_{k_{сжс}}(t) = 3,235 \cdot 10^{-11}(t)$ с размерностью $\left[\frac{M^5}{H} \right]$ и корреляционная

функция $R_{k_{сжс}k_{сжс}}(t_1, t_2) = 0,5 \cdot 10^{-22} e^{-10|t_1 - t_2|}$ с размерностью $\left[\frac{M^{10}}{H^2} \right]$, через ко-

торые вычисляются математические ожидания и корреляционные функции случайных коэффициентов модели (1). Факт статистической связанности этих коэффициентов через общий случайный коэффициент $k_{сжс}(t)$ учитывается при вычислении выражения (6) и, в конечном итоге, функционала (10). При этом используется прием аналитического усреднения проекционных моделей, описанный в [2] и [3].

На рис. 1 приводится график автокорреляционной функции скорректированного входного сигнала $y(t)$ для стохастической модели ЭГСП.

На рис. 2 представлены графики дисперсии выходного сигнала для стохастической и детерминированной модели ЭГСП, где (1) – дисперсия выходного сигнала детерминированной модели; (2) – дисперсия выходного сигнала стохастической модели без компенсации влияния случайности переменного параметра $k_{сж}(t)$; (3) – дисперсия выходного сигнала стохастической модели с компенсацией влияния случайности переменного параметра $k_{сж}(t)$.

Алгоритм вычисления функционала (10) использует выражение для вычисления $C^{R_{xx}}(r, \varphi, k)$, полученное в результате аналитического раскрытия моментов $M[\cdot]$ в (6). Алгоритм такого аналитического усреднения требует существенных затрат вычислительных ресурсов в связи с необходимостью выполнения большого числа аналитических преобразований при выводе выражений для стохастических моментов высоких порядков, но в то же хорошо подходит для реализации на вычислительной платформе Grid [4]. В связи с этим возможно использование таких средств поддержки параллельных вычислений, предоставляемых пакетом MATLAB (MathWorks, Inc.), как Distributed Computing Toolbox и Distributed Computing Engine.

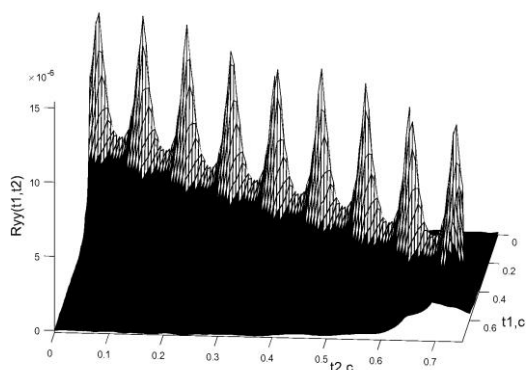


Рис. 1

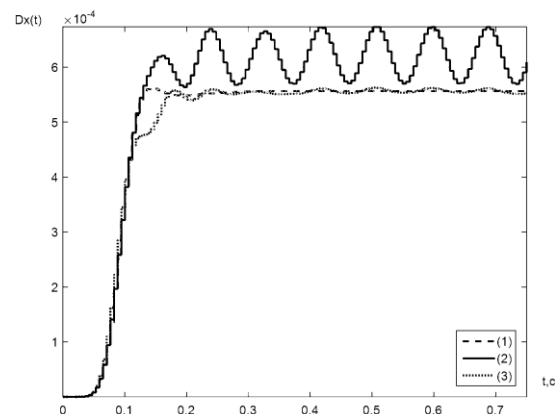


Рис. 2

Таким образом, в работе предложен способ компенсации влияния случайности параметров ЭГСП на дисперсию его выходного сигнала в приложении к задаче формирования случайных вибрационных воздействий. В качестве случайного физического параметра рассматривается модуль объемной упругости рабочей жидкости, приводящий к случайности коэффициента сжатия в уравнениях расходов математической модели ЭГСП. Данный коэффициент рассматривается как гауссов случайный процесс.

Приведен численный пример, демонстрирующий практически полную компенсацию паразитных колебаний дисперсии случайного вибрационно-

го воздействия, формируемого ЭГСП при воспроизведении случайного испытательного сигнала, содержащего регулярную составляющую.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект № 16-41-400701).

Список литературы

[1] *Латин С.В., Егунов 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., Егунов Н.Д., Макаренков А.М.* и др. Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем. — М.: Физматлит, 2003. — 400 с.

[3] *Макаренков А.М.* Учет влияния случайных параметров в проекционных моделях систем автоматического управления // Известия ТулГУ. Серия Вычислительная техника, информационные технологии, системы управления. Вып.3. Системы управления. Том.2. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. — С.30-38.

[4] *Оленев Н.Н., Печенкин Р.В., Чернецов А.М.* Параллельное программирование в MATLAB и его приложения. — М.: Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, 2007. — 121 с.

Тун Тун Чжо - аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: htaminncyaw@gmail.com

Макаренков А.М. - канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amm2005@rambler.ru

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: myo-paingsatt85@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ..... 3

Бысов С.А., Юхимец Р.М.

Анализ направлений расширения технологических возможностей
металлообрабатывающего оборудования 4

Бычков Д.И., Вяткин А.Г.

Анализ упругих деформаций, возникающих при закреплении
заготовок в приспособлениях 8

Верховинец М.А., Филиппова И.А.

Влияние физико-химических и силовых взаимодействий отливки
и литейной формы на качество литых заготовок..... 11

Варичкин И.А., Зенкин Н.В.

Классификация смазочно-охлаждающих жидкостей..... 16

Соколова И.Д., Свитка А.С.

Направления развития станкостроения в России 19

Агеев Б.Н.

Обработка методом точения на вертикальном обрабатывающем
центре 23

Савина Ю.А.

Особенности поверхностного слоя деталей в машиностроении..... 26

Антонюк Ф. И., Мкртчян А.Б.

Оценка формоизменения цилиндрических заготовок при холодной
осадке 29

Шаронов И.В., Филиппова И.А.

Перспективные направления развития вторичной металлургии.
Внепечная обработка стали..... 32

Ромашов В.В., Саханов Д.М., Филиппова И.А.

Перспективные направления развития технологии производства
алюминия 37

Тарасенков Д.А., Филиппова И.А.

Перспективные направления развития технологии производства
высокопрочного чугуна 42

Шаталов В.К., Сорокин С.П., Штокал А.О., Рыков Е.В.,

Говорун Т.А., Рожкова Т.В.

Повышение поверхностной твёрдости титановых сплавов
при использовании наплавочных прутков, обработанных
микродуговым оксидированием 47

<i>Вяткин А.Г., Попова Т.В.</i> Применение смазочно-охлаждающих технологических сред при холодной обработке давлением.....	51
<i>Исаев Н.О., Филиппова И.А.</i> Прогрессивные технологии производства точных заготовок литьем по газифицированным моделям	54
<i>Федорова О.С., Калмыков В.В.</i> Статистическое оценивание шероховатости поверхности в результате алмазного выглаживания	59
<i>Андросов А.Ю., Хайченко В.Е.</i> Технология компьютерного моделирования и быстрого процесса прототипизации моделей в литейной индустрии	62
СЕКЦИЯ 2. ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА	68
<i>Максимов Н.Н., Ненарокомов Г.К.</i> Анализ технологических мероприятий, направленных на снижение остаточных напряжений и деформаций при сварке каркасных конструкций из алюминиевых сплавов.....	69
<i>Сапожников А.Ю., Орлик А.Г.</i> Влияние заточки вольфрамового электрода на стабильность процесса сварки	72
<i>Коростелкин А.С., Миронов И.М., Труханов К.Ю.</i> Математические модели газопламенного нагрева	76
<i>Соловьев Н.И., Труханов К.Ю.</i> Особенности дуговой сварки меди и ее сплавов	79
<i>Соловьев Н.И., Зверев П.С., Труханов К.Ю.</i> Проектирование приспособления для сборки-сварки узла поперечной балки автомобиля	82
<i>Максимов Н.Н., Сергеев В.Ю.</i> Разработка технологии контактной сварки элементов электроусилителя рулевого управления	86
<i>Коваленко А.С., Зыбин И.Н.</i> Технологические варианты восстановления конических поверхностей деталей электроконтактной наваркой проволокой	89
<i>Савосто В.В., Зыбин И.Н.</i> Электроконтактная наварка проволокой с разворотом электрода относительно детали	91
СЕКЦИЯ 3. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	93
<i>Аунг Пью</i> Влияние толщины слоёв CdS на выходные характеристики солнечных элементов nCdS- pCdTe	94

<i>Тун Тун Лин</i> Метод определения магнитных параметров ферритовых плёнок по спин-волновым характеристикам	96
<i>Аунг Пьо</i> Обзор математических моделей солнечных элементов учитывающих температурное влияние	101
<i>Чжо Зай, Прасицкий В.В.</i> Параметры датчиков Холла как максимальная мощность рассеяния, входное и выходное сопротивления датчика	105
<i>Мазин А.В., Аунг Пьей Зон</i> Применение метода Хармана для измерения свойств термоэлектрических материалов	109
<i>Твердова С.М.</i> Расчет некоторых зависимостей в трехкомпонентном полупроводнике	112
<i>Мазин А.В., Аунг Пьей Зон</i> Термоэлектрический метод измерения теплового сопротивления элементом Пельтье	115
<i>Чжо Зай, Прасицкий В.В.</i> Усовершенствование электрода натриевой лампы высокого давления ...	120
<i>Чжо Зай, Прасицкий В.В.</i> Электрод газоразрядной лампы	123
СЕКЦИЯ 4. ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ	127
<i>Липихин Е.Г., Шевелев Д.В.</i> Влияние степени понижения давления газа на облик проточной части микротурбины когенерационной установки	128
<i>Тарасов Е.В., Жинов А.А.</i> Исследование эффективности бездеаэрационных схем ПТУ со смешивающими подогревателями	134
<i>Емельянов Н.Э., Карышев А.К.</i> К вопросу использования регулируемого соплового аппарата (РСА) в силовой турбине газоперекачивающего агрегата	139
<i>Калюжный Г.М., Юрик Е.А.</i> Камеры сгорания газотурбинного двигателя	144
<i>Сидоров П.М., Сидоров П.М., Шевелев Д.В.</i> Определение теплоемкости рабочего тела ГТУ при помощи open source пакета прикладных математических программ Scilab	148
<i>Завальный Ф.Г., Гридчин Н.В.</i> Охлаждение лопаток высокотемпературных газовых турбин	151

<i>Няшин А.В., Юрик Е.А.</i> Перспектива использования транспортного газотурбинного двигателя в условиях низких температур	156
<i>Афанасов Я.В., Гридчин Н.В.</i> Повышение эффективности охлаждения лопаток ГТД путем испарительного охлаждения	160
<i>Тарасов Е.В.</i> Применение турбореактивных двигателей в составе орбитального корабля многоразового использования	165
<i>Седов Д.А., Юрик Е.А.</i> Проблемы охлаждения элементов газотурбинных установок	169
<i>Заричный А.Ф., Ильичев В.Ю.</i> Разработка методики расчёта колебаний роторов, соединённых муфтами	174
<i>Завальный Ф.Г., Гридчин Н.В.</i> Теплозащитные покрытия лопаток высокотемпературных газовых турбин	177
<i>Сидоров П.М., Сидоров П.М., Шевелев Д.В.</i> Термодинамический расчет цикла газотурбинной установки при помощи open source пакета прикладных математических программ Scilab	180
<i>Сафонов А.И., Шевелев Д.В.</i> Утилизационная газотурбинная установка как способ повышения эффективности магистральных газосжатых станций	184
СЕКЦИЯ 4. КЛАССИЧЕСКИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ; АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВОМ	189
<i>Антонов С.А., Корлякова М.О.</i> Анализ действующих моделей скринридеров	190
<i>Брынза А.А., Ермоленко А.В., Корлякова М.О.</i> Вопросы синтеза системы идентификации автора почерка посредством мягких вычислений	193
<i>Окар Мин, Чжо Ту Аунг</i> Вычисление матричного оператора умножения двух процессов	196
<i>Аксенов Н.В., Корнюшин Ю.П.</i> Идентификация математической модели машинно-тракторного агрегата с технологическим модулем в пакете MATLAB Identification Toolbox	199

<i>Аксёнов А.В., Краснощеченко В.И.</i> Идентификация параметров двигателя постоянного тока Д-600ТФ	202
<i>Кочеткова Е.Ю., Брынза А.А., Корлякова М.О.</i> Исследование модели стереопары камер и формирование системы технического зрения	206
<i>Кузнецов Д.А., Жуков Р.А., Мьят Мин Ай, Корлякова М.О.</i> Метод трекинга объектов среды.....	211
<i>Зюзин А.А., Долгов Я.А., Финошин А.В., Мышляев Ю.И.</i> Методика адаптивного управления колебаниями маятника с учетом сил трения	216
<i>Кузнецов Д.А., Ермоленко А.В., Корлякова М.О.</i> Методы детерминации уникальных характеристик рукописного текста	221
<i>Кузнецов Д.А., Тамонов Д.В., Аунг Кхаинг, Корлякова М.О.</i> Обзор алгоритмов поиска особых точек для решения задач сопоставления изображений	225
<i>Аксенов Н.В., Корнюшин Ю.П.</i> Оценка вероятностных характеристик случайных процессов при исследовании демпфирующих свойств машинно-тракторного агрегата с технологическим модулем	229
<i>Аксёнов А.В., Краснощеченко В.И.</i> Проектирование стенда для исследования динамических характеристик двигателя постоянного тока Д-600ТФ	233
<i>Афанасьев В.Р., Дорохов Ю.Ф.</i> Разработка рабочего места проектировщика пресс-форм для предприятий с небольшой программой изделий из пластмасс	237
<i>Брынза А.А., Брынза Е.В., Корлякова М.О.</i> Разработка системы оптического распознавания символов	240
<i>Брынза А.А., Корлякова М.О.</i> Разработка цифрового микроскопа с использованием Web камеры с интерфейсом USB 2.0.....	244
<i>Горохова М.А., Корлякова М.О.</i> Распознавание фигур заданной формы на изображениях с использованием сверточных нейронных сетей	248
<i>Тин Эй Чжо, Тун Тун Чжо, Макаренков А.М.</i> Расчет PID-регулятора электрогидравлического следящего привода с учетом случайных параметрических возмущений	251

<i>Брынза А.А., Корлякова М.О.</i> Решение задачи машинного обучения, с использованием открытой библиотеки TensorFlow	257
<i>Терехова Е.А., Корлякова М.О.</i> Сравнение методов обнаружения примитивов на изображениях	261
<i>Тун Тун Чжо, Макаренков А.М., Тин Эй Чжо, Мьо Паинг Сат</i> Управление электрогидравлическим приводом по случайному параметрическому возмущению	264
СОДЕРЖАНИЕ	270

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

**Материалы
Региональной 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 18.04.2016.
Формат 60x90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Печ. л. 17,25. Усл. п. л. 16,04. Тираж 50 экз. Заказ № 68

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