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»

55 лет
Калужскому филиалу
МГТУ им. Н.Э. Баумана

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

Материалы
Всероссийской научно-технической конференции

Том 1

ИЗДАТЕЛЬСТВО МГТУ им. Н.Э. Баумана
Москва 2014

УДК 378:001.891
ББК 74.58:72
Н34

Руководители конференции

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

Оргкомитет конференции

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

Н34 **Наукоемкие** технологии в приборо- 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.

ISBN 978-5-7038-4077-1 (т. 1)
ISBN 978-5-7038-4076-4

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

УДК 378:001.891
ББК 74.58:72

© Коллектив авторов, 2014
© Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана
© Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014

ISBN 978-5-7038-4077-1 (т. 1)
ISBN 978-5-7038-4076-4

СЕКЦИЯ 1.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.9.06

С.Н. Бриченков, И.Д. Соколова

МОДЕРНИЗАЦИЯ ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА С ЦЕЛЬЮ РАСШИРЕНИЯ ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

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

В статье рассмотрено одно из решений проблемы расширения технологических возможностей металлорежущего станка. Коробка скоростей является базовой деталью металлообрабатывающего оборудования. Поэтому для расширения функциональных возможностей станка, повышения точности и производительности обработки необходима модернизация коробки скоростей и шпиндельного узла. Для достижения этой цели рассмотрены технологические возможности фрезерного станка модели 65А90ПМФ4. В основе модернизации лежит замена шпинделя коробки скоростей на поворотную фрезерную головку. Были проведены существенные изменения коробки скоростей для осуществления монтажа фрезерной головки. Установку данного приспособления следует производить по направляющим и закреплять с помощью болтов. Это обеспечит легкость монтажа фрезерной головки и упростит изготовление коробки скоростей. Приведен расчет резьбовых соединений, необходимый для правильного подбора диаметров болтов, способных выдержать установленную фрезерную головку и обеспечить ее стабильную работу. В результате проведенного исследования была предложена конструктивная схема, обеспечивающая обработку заготовки с пяти сторон.

Ключевые слова: *Коробка скоростей, фрезерная головка, технологические возможности станка*

Современный этап социального и экономического развития общества характеризуется постепенным повышением развития многих отраслей производства, требующих создания новых машин, механизмов и оборудования для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов. Однако в современной промышленности остается большое количество морально устаревших станков, заменить которые на современное, экономичное и высокотехнологичное оборудование в короткое время и с наименьшими затратами не представляется возможным.

Одним из путей решения этой проблемы является модернизация станков, которая предусматривает повышение их экономичности, универсальности и производительности, а также комплексную механизацию и авто-

матизацию трудоемких процессов, сокращение потерь рабочего времени на вспомогательные и второстепенные операции.

Модернизация станочного парка обеспечивает повышение производительности, увеличения коэффициента использования оборудования, автоматизацию работы станков и т.д.

Металлорежущие станки предназначены для производства современных машин, приборов, инструментов и других изделий. Следовательно, их количество и качество, техническая оснащенность характеризуют производственную и экономическую мощь страны.

Коробка скоростей является базовой деталью металлообрабатывающего оборудования, поэтому, когда возникает потребность в расширении функциональных возможностей станка, повышении точности и производительности обработки, то в первую очередь ставится вопрос о модернизации коробки скоростей и шпиндельного узла.[1]

Цель данного исследования – добиться расширения технологических возможностей станка путем модернизации коробки скоростей.

Для достижения этой цели рассмотрены технологические возможности станка до модернизации, описаны в общем виде предлагаемые изменения коробки скоростей и произведены необходимые расчеты.[2],[3]

Станок фрезерный вертикальный с крестовым столом, ЧПУ и МАСИ модели 65А90ПМФ4 предназначен для обработки в автоматическом режиме по программе с автоматической сменой инструмента деталей сложной конфигурации типа кулачков, копиров, штампов, прессформ или им подобных, а также обработки корпусных деталей с большим числом выполняемых операций.[4]

Параметры технической характеристики станка обеспечивают высокопроизводительную обработку деталей из черных и цветных металлов, высоколегированных и жаропрочных сплавов, а также обработку деталей из легких сплавов.[5]

Возможность выполнения на станке операций фрезерования, растачивания, сверления, зенкерования, развертывания при обработке сложных деталей позволяет обеспечить высокую точность обработки с одной установки и значительно повысить производительность.

Но вертикальное расположение шпинделя станка делает невозможным обработку наклонных поверхностей, что значительно ограничивает номенклатуру изделий, пригодных для обработки на данном оборудовании. Эту проблему можно решить изготовлением дорогостоящих приспособлений для установки детали на столе станка под требуемым углом, но это решение может быть целесообразно только в условиях серийного производства.

В данной работе представлено одно из возможных решений поставленной задачи с помощью модернизации коробки скоростей станка.

В станке 65А90ПМФ4 вращение шпинделя производится от электродвигателя постоянного тока и четырехступенчатую коробку скоростей. Регулирование частоты вращения шпинделя внутри каждой ступени - бесступенчатое. Шпиндель смонтирован в отдельной стальной неподвижной гильзе, а передача вращения от валов коробки скоростей происходит посредством шлицевой передачи. Схематичный чертеж коробки скоростей станка в исходном исполнении показан на рис.1.

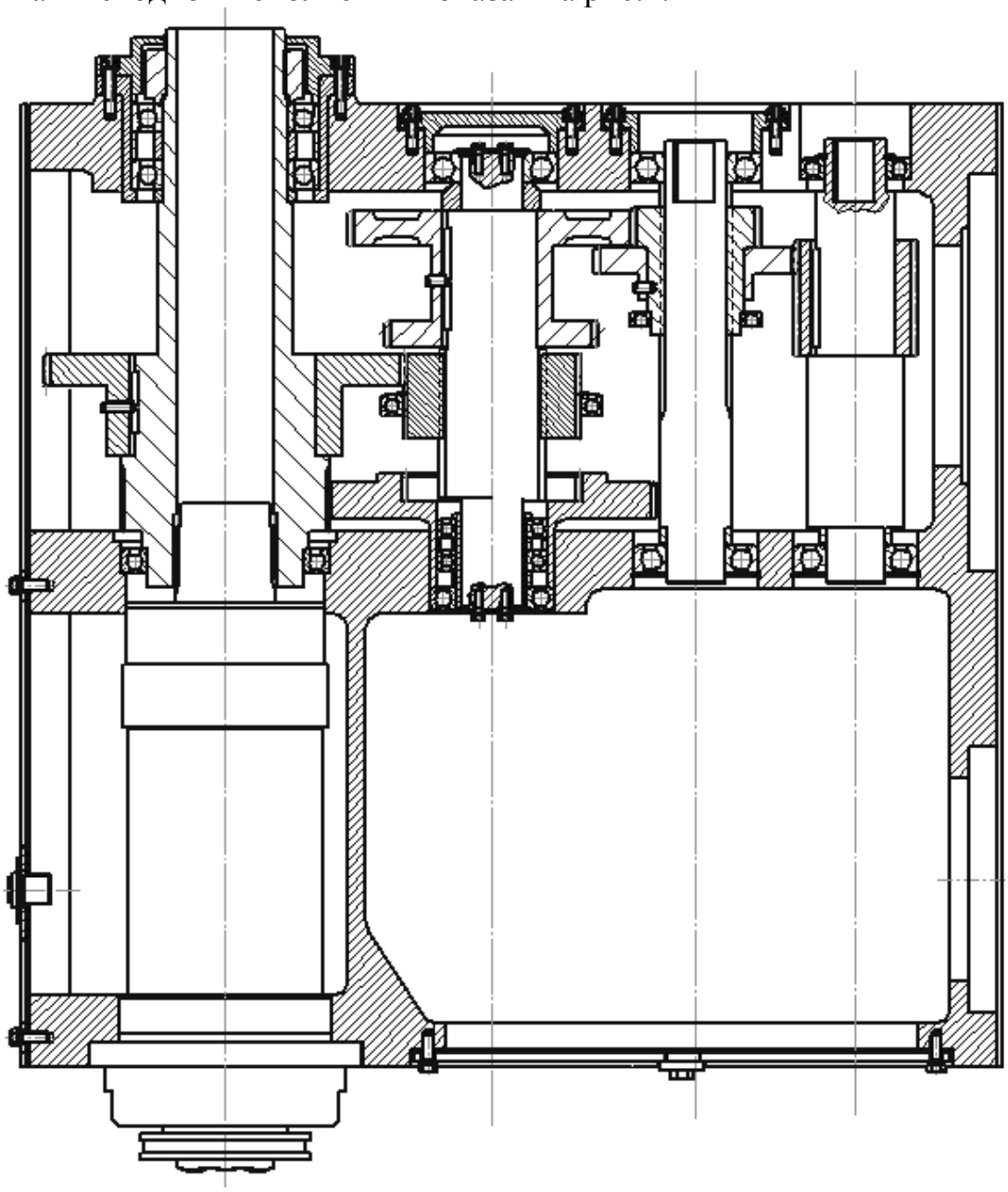

Рис. 1. Схематичный чертеж коробки скоростей станка в исходном исполнении

Это конструктивное решение построения коробки скоростей можно считать очень удачным для вертикально фрезерного станка данного типа, но для расширения функциональных возможностей следует внести некоторые изменения.

В основе предлагаемой модернизации коробки скоростей лежит замена базового шпинделя на поворотную фрезерную головку. Ее конструктивное исполнение взято с уже существующей универсальной индексированной фрезерной головки HUI 50 для горизонтально-расточного станка TOS WHNQ 13 CNC, схематично показанной на рис.2.

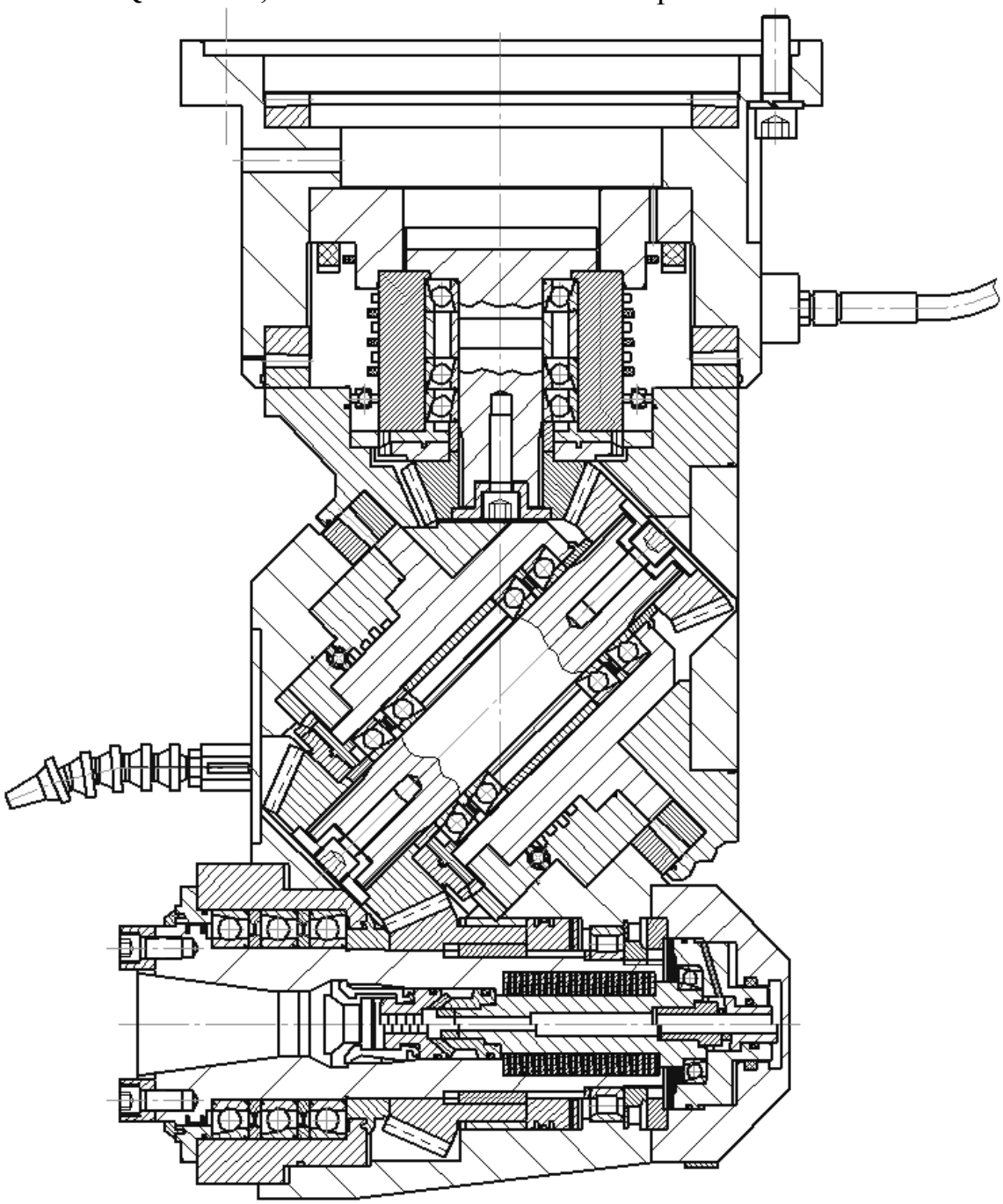

Рис. 2. Схематичный чертеж универсальной индексированной фрезерной головки HUI 50

Фрезерная головка HUI 50 является специальной принадлежностью, предназначенной для горизонтально-расточного станка модели WHN(Q) 13 CNC.[6] Значительно расширяет технологические возможности данного станка, так как позволяет проводить обработку пятой стороны детали,

фрезерование наклонных поверхностей, сверление, растачивание вертикальных и наклонных отверстий (используя линейную интерполяцию) в деталях из чугуна, стали и литой стали.

Чтобы монтаж фрезерной головки стал возможным, были проведены некоторые изменения коробки скоростей станка 65А90ПМФ4. Сокращено количество валов коробки скоростей с четырех до трех, тем самым уменьшив ее габаритные размеры и общую массу. Также потребовалось подготовить посадочное место под фрезерную головку путем изменения той части коробки скоростей, в которой был установлен шпиндель: был убран шпиндель, который соединялся с валом коробки скоростей при помощи шлицев, удалена часть коробки скоростей и усилена стенка, к которой будет монтироваться приспособление. Тем самым мы облегчили конструкцию, что было необходимо, так как масса монтируемой фрезерной головки равна 500 кг; и создали возможность нормального функционирования поворотной головки.

Также следует указать, что, так как приспособление монтируется на место шпинделя и коробка скоростей сократилась на один вал, то размеры рабочей зоны станка практически не изменились. Следовательно, были расширены технологические возможности станка без потери исходных параметров.

Установку данного приспособления следует производить по направляющим и закреплять с помощью болтов, что обеспечит легкость монтажа фрезерной головки и упростит изготовление коробки скоростей.

Схематичный чертеж коробки скоростей станка 65А90ПМФ4 после модернизации, описанной выше показан на рис. 3.

Далее приведен упрощенный расчет резьбовых соединений, который потребовался для правильного подбора диаметров болтов, способных выдержать установленную фрезерную головку и обеспечить ее стабильную работу.

На рис. 4 приведен схематичный чертеж вида спереди корпуса коробки скоростей с посадочным местом и отверстиями под болты для крепления фрезерной головки.

Для упрощения расчетов резьбовых соединений, а также для создания некоторого запаса прочности, разобьем общую схему соединения фрезерной головки к коробке скоростей на две расчетные схемы и приведем отдельно расчет каждой из них.[7]

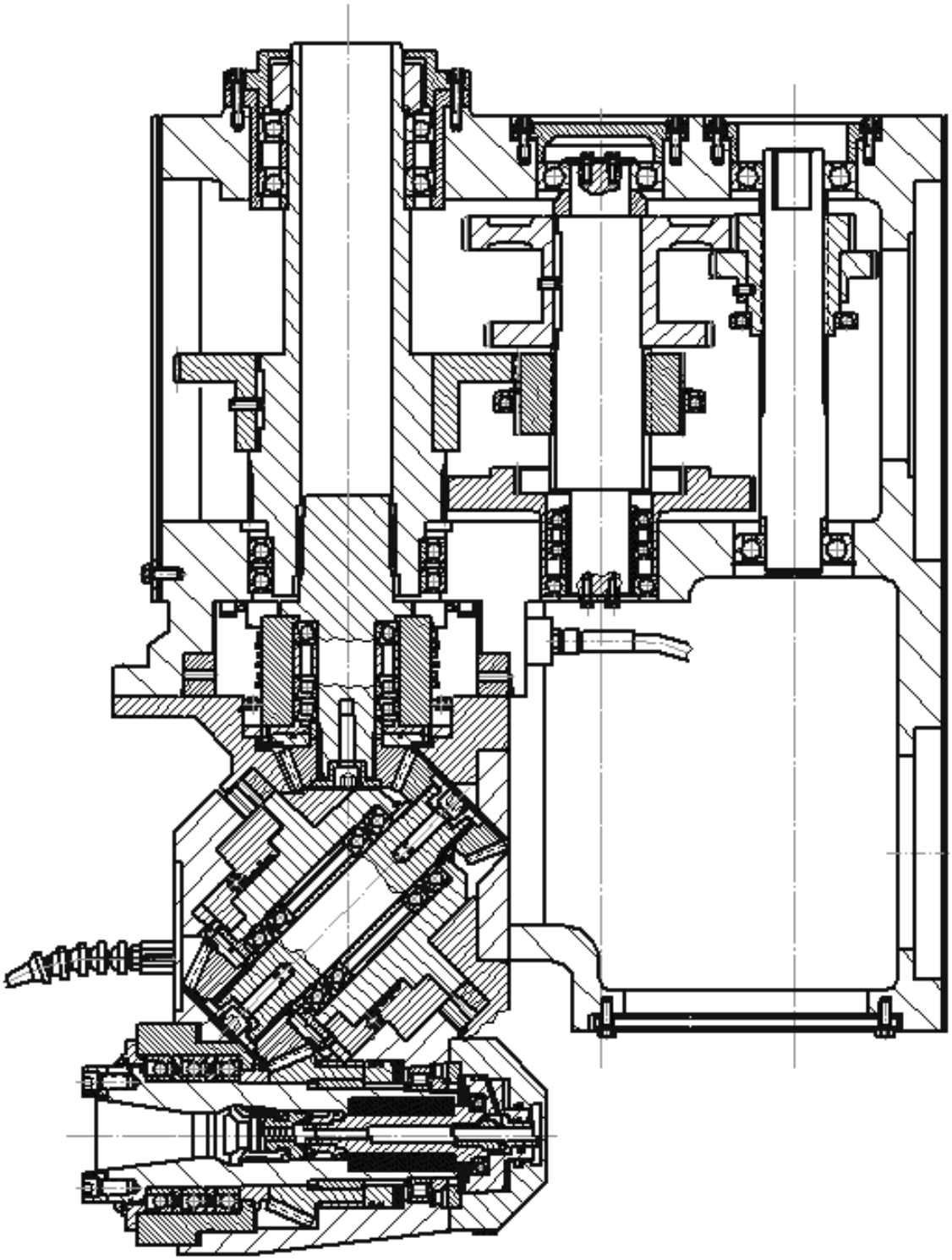

Рис. 3. Схематичный чертеж коробки скоростей станка 65А90ПМФ4 после модернизации

Схема 1: на болты действует осевая сила, раскрывающая стык (соединение торца фрезерной головки к коробке скоростей). Данная расчетная схема приведена на рис. 5.

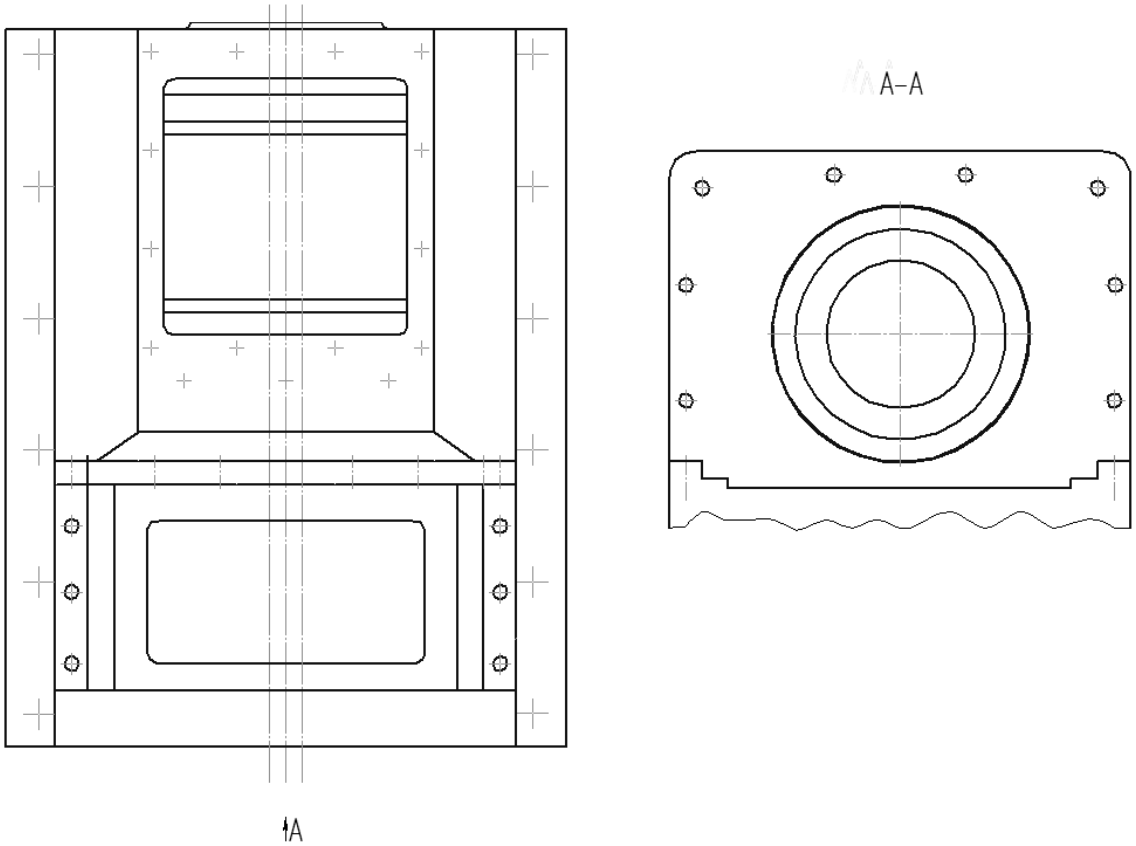

Рис. 4. Схематичный чертеж вида спереди корпуса коробки скоростей

Осевая сила образована массой фрезерной головки = 500 кг, массой режущего инструмента - до 25 кг и массой СОЖ. Общую массу примем приближенно равной 600 кг.

Тогда осевая сила $F_a = m \cdot g = 600 \cdot 9{,}81 = 5886H \approx 6000H$.

Далее принимаем: число болтов (Ст.3) $z = 8$, коэффициент запаса затяжки $k_{зт} = 3$, коэффициент внешней нагрузки $\chi = 0{,}3$.

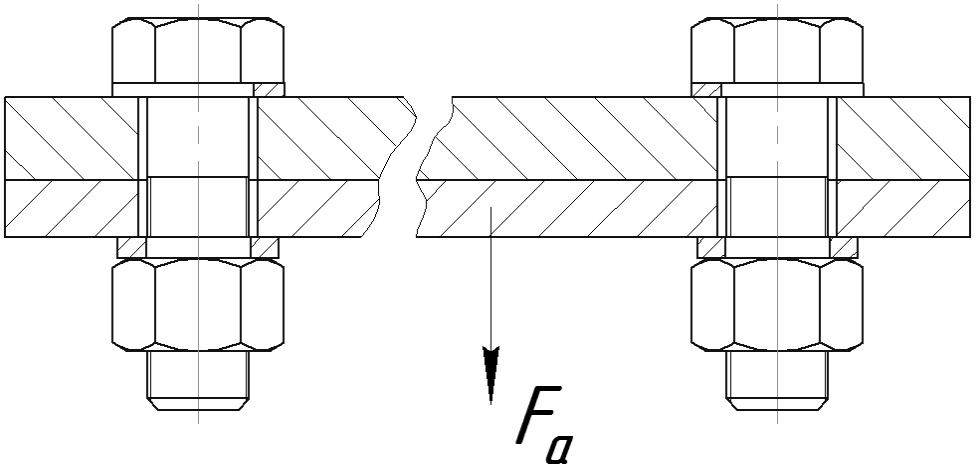

Рис. 5. Расчетная схема 1

1. Определяем внешнюю нагрузку, приходящуюся на один болт:

$$F_{вн} = \frac{F_a}{z} = \frac{6000}{8} = 750H$$

2. Находим расчетную нагрузку, воспринимаемую одним болтом:

$$F_p = 1,3k_{зт}(1-\chi)F_{вн} + \chi F_{вн} = 1,3 \cdot 3 \cdot (1-0,3) \cdot 750 + 0,3 \cdot 750 = 2273H$$

3. Вычисляем расчетный внутренний диаметр резьбы болта:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4F_p}{\pi[\sigma]}}, \text{где } [\sigma] = \frac{\sigma_t}{[s_t]} = \frac{200}{5} = 40МПа$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 2273}{3,14 \cdot 40}} = 8,5мм,$$

4. Принимаем болт М12х1,75 ($d_1 = 10,106мм$)

Схема 2: болты поставлены с зазором и воспринимают поперечную нагрузку (соединение боковой части фрезерной головки к коробке скоростей). Данная расчетная схема приведена на рис. 6.

Рис. 6. Расчетная схема 2

Внешняя сила, создающая поперечную нагрузку: $F_{вн} = m \cdot g = 600 \cdot 9,81 = 5886H \approx 6000H$.

Далее принимаем: число болтов (Ст.3) $z = 6$, коэффициент запаса затяжки $k_{зт} = 3$, коэффициент внешней нагрузки $\chi = 0,3$.

1. Определяем расчетное усилие, приходящееся на один болт:

$$Q = \frac{F_{вн}}{z} = \frac{6000}{6} = 1000H.$$

2. Необходимая сила затяжки:

$$F = \frac{kQ}{fzi},$$

где $f = 0,15$ - коэффициент трения, $i = 1$ - число стыков, $k = 1,8$ - коэффициент запаса.

$$F = \frac{kQ}{fzi} = \frac{1,8 \cdot 1000}{0,15 \cdot 6 \cdot 1} = 2000H$$

3. Находим расчетную нагрузку, воспринимаемую одним болтом:

$$F_p = 1,3F_{вн} = 1,3 \cdot 2000 = 2600H$$

4. Вычисляем расчетный внутренний диаметр резьбы болта:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4F_p}{\pi[\sigma]}}, \text{где } [\sigma] = \frac{\sigma_t}{[s_t]} = \frac{200}{5} = 40МПа$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 2600}{3,14 \cdot 40}} = 9,1мм,$$

5. Принимаем болт М12х1,75 ($d_1 = 10,106мм$).

Расчеты показали, что для закрепления фрезерной головки на коробке скоростей достаточно 14 болтов М12×1,75.

В результате данной научно исследовательской работы выполнены все поставленные ранее задачи: рассмотрены технологические возможности станка до модернизации, представлены в общем виде предлагаемые изменения коробки скоростей, произведены расчеты резьбовых соединений.

В ходе работы, с изменением коробки скоростей, стало возможно из вертикально фрезерного станка, способного обрабатывать только перпендикулярные и параллельные столу станка поверхности, получить станок, способный обрабатывать наклонные поверхности различной конфигурации.

Вывод. Предложенная модернизация коробки скоростей станка имеет право на существование и значительно расширяет технологические возможности вертикально фрезерного станка, и требует более подробного изучения.

Однако следует заметить также, что данные изменения требуют замены устаревшей системы ЧПУ 2С42-65-01 на современную SINUMERIK 840D sl, которая поддерживает управление поворотной фрезерной головкой.

Список литературы

1. Бриченков С.Н., Соколова И.Д. Модернизация шпиндельного узла с целью повышения точности станка//Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе. Сборник трудов Всероссийской науч.-техн. конф. – М., 2013г.

2. Алексеева Н.А., Джамай В.В., Серпичева Е.В. Основы проектирования и конструирования узлов и деталей машин и механизмов. Учебное пособие к расчетной работе – М.: МАИ, 2006. – С. 82-87.

3. Дмитриев В.Г., Иванов С.Д., Гузенков П.Г. Детали машин. - М.: МГОУ, 2001. – С. 281-292.

4. ГОСТ 9726-89. Станки фрезерные вертикальные с крестовым столом. Терминология. Размеры. Нормы точности и жесткости // Государственный комитет СССР по стандартам. – С. 36.

5. Станок фрезерный вертикальный с крестовым столом, ЧПУ и МАСИ 65А90ПМФ4. – Руководство по эксплуатации. - 1991г.

6. Инструкция по эксплуатации и ремонту универсальной индексированной фрезерной головки HUI 50 для станка WHN(Q) 13 CNC с системой SINUMERIK 840D Solution line - TOS VARNSDORF a.s., - Чехия , 2013 г. – 29 с.

7. Детали машин и основы конструирования / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев, А. В. Карп и др.; Под ред. М. Н. Ерохина. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2011. – 314-315 с.

Бриченков Сергей Николаевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: serega-stud@mail.ru.

Соколова Ирина Дмитриевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sokolovairinadm@rambler.ru.

Brichenkov S. N., Sokolova I. D.

MODERNIZATION OF THE MILLING MACHINE TO EXPAND ITS TECHNOLOGICAL CAPABILITIES

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

The article considers one of the solutions of the problem of expanding the technological capabilities of the metal-cutting machines. Gearbox is a basic part of Metalworking equipment. Therefore, to extend the functionality of the machine, improve accuracy and processing performance required upgrade gearbox and spindle unit. To achieve this goal is considered the technological capabilities of a milling machine model 65A90ПМФ4. The basis of the upgrade is to replace the spindle of gearbox for rotary milling head. Underwent major changes of gear boxe for the installation of the milling head. Installation of this device should be on rails and fasten with screws. This will allow easy mounting of the milling head and simplify the manufacture of gearbox. The calculation of threaded connections necessary for the proper selection of the diameters of screws, capable of withstanding the installed milling head and ensure its stable operation. The study was proposed design scheme, providing processing of the workpiece with five sides.

Key words: *gearbox, milling head, technological capabilities of the metal-cutting machine*

References

1. Brichenkov S.N., Sokolova I.D. Upgrade spindle unit in order to increase accuracy of the machine// High technologies in instrument and mechanical engineering and the development of innovative activities in the University. Proceedings of all-Russian scientific-technology. Conf. – M., 2013г.

2. Alekseeva N.A., Jami V.V., Serpicheva E.V. Basics of design and construction of units and parts of machines and mechanisms. Tutorial to design work - M: IIA, 2006. – P. 82-87.

3. Dmitriev V.G., Ivanov S.D., Gusenkov P.G. Machine parts. - M.: Moscow state regional University, 2001.- P. 281-292.

4. GOST 9726-89. Milling machines with vertical cross table. Terminology. Dimensions. Standards of accuracy and rigidity / / USSR State Committee on Standards.

5. Vertical milling machine with cross table, CNC and MASI 65A90PMF4. - Operating Manual. - 1991.

6. Instruction manual and repair indexed universal milling heads HUI 50 for the machine WHN(Q) 13 CNC system SINUMERIK 840D Solution line - TOS machines Varnsdorf a.s., - Czech Republic , 2013 - 29 p.

7. Machine parts and design principles / M. Erokhin, S. P. Kazantsev, A. C. Carp and others; Ed. by M. N. Erokhina. - 2nd ed., Rev. and suppl. - M: ColosS, 2011. – P. 314-315.

Brichenkov Sergey Nikolaevich – student of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: serega-stud@mail.ru.

Sokolova Irina Dmitrievna – Ph. D., Assoc. Professor of Instrumental equipment and technologies Department of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: sokolovairinadm@rambler.ru.

УДК 621.91

С.Н. Бриченков, А.В. Волков

СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМОВ АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА СИЛ РЕЗАНИЯ

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

Аналитическое определение сил резания - одна из сложнейших задач теории резания металлов, над которой трудятся коллективы многих научных школ. В данной работе рассмотрен упрощённый базовый алгоритм расчёта сил резания по Н.Н. Зореву и В.К. Старкову, являющийся основой значительной части усилий по продвижению новых разработок. Приведены оценка погрешностей базового алгоритма в сравнении с результатами других авторов, а также его критика данными авторами. По результатам работы сделаны выводы о возможности использования базового алгоритма при современном уровне развития CAD/CAM/CAE/PDM – систем, его точности и применении наряду с новыми алгоритмами при разработке CAD/CAM/CAE/PDM – систем. Работа может представлять интерес для специалистов в области металлообработки и разработчиков CAD/CAM/CAE/PDM – систем.

Ключевые слова: *усилие резания, усадка стружки, режимы резания*

В практике проектирования процессов резания обычно используют степенные эмпирические формулы для определения составляющих силы резания. Но для современных методов оптимизации производства они не обеспечивают требуемой точности, что связано с резким изменением показателей степеней и коэффициентов при изменении условий обработки. Это может приводить к ошибкам, которые через справочную литературу попадают в расчётные модули CAD/CAM/CAE/PDM – систем, снижая эффективность последних. Однако аналитическое определение сил резания - одна из сложнейших задач теории резания металлов, над которой трудятся коллективы многих научных школ.

В калужском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Инструментальная техника и технологии» проводятся работы по поиску оптимальных путей повышения точности определения усилий резания аналитическим способом, обеспечивающим нахождение оптимизированного алгоритма определения усилий резания и возможность его использования при разработке CAD/CAM/CAE/PDM – систем [1-5].

Целью данной работы является анализ упрощённого базового алгоритма расчёта сил резания по Н.Н. Зореву и В.К. Старкову, являющегося основой значительной части усилий по продвижению новых разработок, в том числе и возможность его использования при разработке CAD/CAM/CAE/PDM – систем.

В качестве методики проведения работы выбран анализ погрешностей базового алгоритма определения усилий резания сталей ст. 10 – ст. 50, 20Х, в сравнении с результатами современных авторов, а также анализ достижений и критика работ последних в данном направлении. Во всех случаях сравнивались стали, прошедшие нормализацию, обрабатываемые твердосплавными инструментами с главным углом в плане $\varphi = 45°$ и параметром $\theta = 40 \div 50°$.

Рассмотрим упрощённый базовый алгоритм определения составляющих силы резания по величине усадки стружки по Н.Н. Зореву и В.К. Старкову [6,7,8].

В своей работе по оптимизации условий обработки металлов В.К. Старков (2009 г.) обратил внимание на недостаточную точность расчёта режимов резания по эмпирическим зависимостям и полагает, что накопленный опыт позволяет свести объемное рассмотрение процессов резания к плоской задаче с упрощенной схемой формоизменения на плоскости, ортогональной режущему лезвию инструмента [8].

В обоснование достоверности механизма стружкообразования путем сдвиговой деформации срезаемого металла по плоскости скалывания В.К. Старковым был принят постулат постоянства действующего значения касательного напряжения пластического течения по предполагаемой плоскости сдвига [8]. Критерием оптимальности математической модели оптимизации условий обработки В.К. Старковым избрана удельная энергоемкость, дающая возможность расчета усилия резания по упрощённой формуле Н.Н. Зорева (1956 г.) с использованием факторов процесса, известных заранее: механические свойства обрабатываемого материла - предел прочности обрабатываемого материала $\sigma_в$, МПа и относительное сужение ψ, %; параметры геометрии инструмента - заданный передний уголγ,° и угол наклона главной режущей кромки λ,°; коэффициент усадки стружки ξ и параметр θ (сумма угла действия и угла сдвига на передней поверхности инструмента) [6]. Формула (1) Н.Н. Зорева [6], отличается значительной простотой от современных, например, рассмотренный в работе Ю.Н. Внукова (2007г.) [9], и применена В.К. Старковым как наиболее удачная из известных для расчета главной (тангенциальной) составляющей силы резания при использовании модели сливного стружкообразования.

Рассмотрим непосредственно методику расчета составляющих силы резания Н.Н. Зорева и В.К. Старкова, основанную на предположении о локализации зоны пластической деформации перед режущей кромкой инструмента, когда становится приемлемой модель деформации по условной

плоскости сдвига. В.К. Старковым это признано допустимым в условиях сливного стружкообразования, при высоких скоростях резания, а также при обработке деталей из высоколегированных материалов [8].

По Н.Н. Зореву, тангенциальная P_Z и нормальная P_Y составляющие силы резания, рассчитываются через механические свойства материала обрабатываемой детали: его предел прочности $\sigma_в$ и относительное сужение ψ, *а* также через параметры геометрии резца и режима обработки:

$$P_Z = \frac{0,6\sigma_B}{1-1,7\psi}\left[\frac{\xi-\sin\gamma}{\cos\gamma}+tg\theta\right]\frac{St}{\cos\gamma\cos\lambda}. \quad (1)$$

$$P_y = P_1 tg\omega\cos\varphi, \quad (2)$$

где

$$\omega = \theta - \Phi = \theta - arctg\frac{\cos\gamma}{\xi-\sin\gamma}. \quad (3)$$

Здесь Φ - угол сдвига; ξ - усадка стружки по толщине; ω - угол действия; $\theta = \Phi + \omega$ - параметр (сумма угла действия и угла сдвига на передней поверхности инструмента), °; λ - угол наклона главной режущей кромки, °; ψ - равномерное относительное поперечное сужение образца, %.

Схема резания для данного случая показана на рис.1.

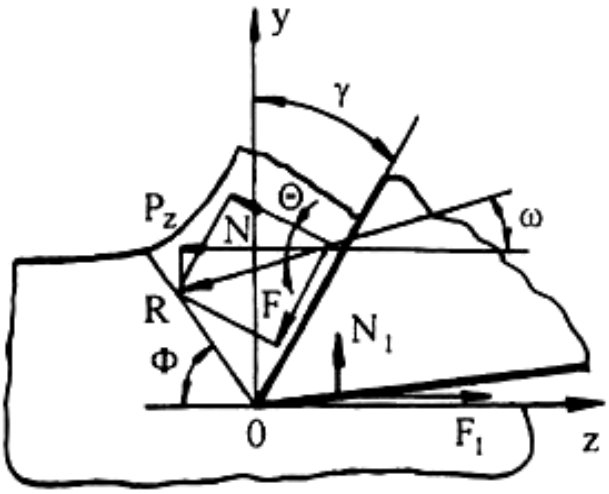

Рис. 1. Схема для определения силы по Н.Н. Зореву [7].

Экспериментальные исследования Н.Н. Зорева по влиянию различных условий резания на процесс стружкообразования показали, что даже для прямоугольного свободного резания процесс стружкообразования непосредственно зависит от четырех факторов: угла действия, переднего угла, свойств обрабатываемого материала, скорости резания [7].

По рекомендации Н.Н. Зорева для точных подсчетов усадки стружки в широком диапазоне изменения толщин среза В.К. Старковым использовалась формула (3) с учётом влияния толщины среза a на усадку стружки при постоянной стойкости инструмента [7]:

$$\xi = \theta a^{-0,06} \qquad (4)$$

Н.Н. Зорев (1967 г.) с высокой достоверностью определял среднюю точность расчётов только по алгоритму, основанному на методе определения проекции силы резания P_z при одинаковой стойкости инструмента. Известно, что по 128 опытам она составила в среднем 10%, при максимальной величине 15%. Точность расчётов по алгоритму на основе определения усадки стружки Н.Н. Зоревым считается несколько более низкой [7].

Расчет по формулам Н.Н. Зорева (1-3) выполнен В.К. Старковым (2009 г.) с использованием обобщенных моделей коэффициента усадки стружки, полученных методом многофакторного статистического анализа при коэффициенте множественной корреляции результатов измерения от исследуемых параметров резания для операции точения - 0,77 (относительная приведённая погрешность около 32%). Коэффициент трения инструмента с материалом по задней поверхности принят $\mu_З = 0,41$, а по передней поверхности $\mu_п = 0,7$ [8]. Для процесса точения жаропрочных сплавов им получена экспериментальная формула определения усадки стружки (5):

$$\xi = 1 + 0,145 V^{0,110} S^{0,319} t^{-0,094} \gamma^{-0,022} f^{-0,046}, \qquad (5)$$

где f — относительное содержание легирующих элементов в жаропрочном сплаве.

Таким образом, упрощённая схема базового алгоритма определения усилий резания по В.К. Старкову, или главного подмодуля алгоритма оптимизации режимов, сводится к схеме представленной на рис.2.

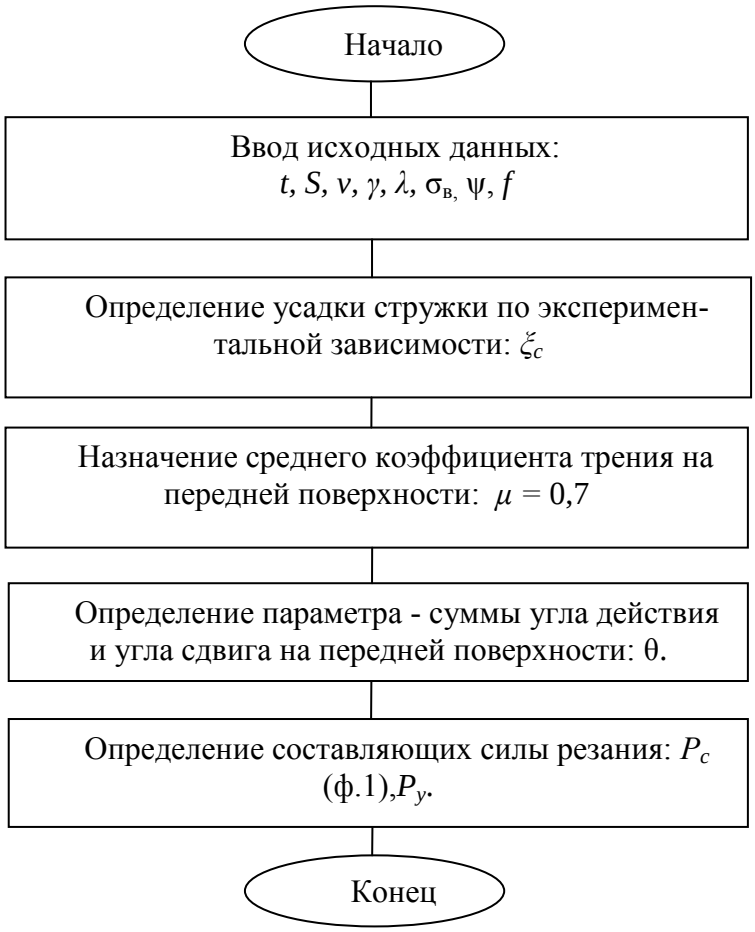

Рис. 2. Упрощённый алгоритм определения составляющих силы резания по величине усадки стружки по Н.Н. Зореву и В.К. Старкову [6,8]

Из материалов работы В.К. Старкова следует, что основную погрешность при расчётах усилия резания с использованием обобщенных моделей коэффициента усадки стружки, вносит точность определения коэффициента усадки стружки. Он показал, что для жаропрочных сплавов характерной является затрата работы резания на пластическую деформацию металла, удаляемого в виде стружки, в пределах 90...95 %. При исследовании процесса резания сплавов типа ХН77ТЮР, ХН55ВТФКЮ, ХН56ВМКЮ, ЖС6КП при сливном стружкообразовании, в условиях локализации пластически деформируемой зоны было установлено, что алгоритм определения усилий резания по усадке стружки Н.Н. Зорева даёт расхождение опытных значений P_z с расчетными при точении 23% [8].

Рассмотрели критику упрощённого базового алгоритма определения составляющих силы резания по величине усадки стружки по Н.Н. Зореву и В.К. Старкову со стороны других авторов [9,12,11].

В работе Ю.Н. Внукова (2008 г.) [9] анализировались некоторые алгоритмы аналитического расчета сил резания при прямоугольном несвободном резании, разработанные Н.Н. Зоревым. Автор считает, что алгоритмы Н.Н. Зорева представляют интерес только как принципиальные, и по при-

чине большого количества допущений, упрощений и широкого использования экспериментальных данных, не могут быть в настоящее время использованы в практических целях. Однако Ю.Н. Внуковым точность расчёта по рассмотренным алгоритмам не оценивалась.

Представляет интерес оценка точности базового алгоритма Н.Н. Зорева по результатам испытаний алгоритма при сравнении с экспериментальными данными А.М. Розенберга (1956, 1990 г.г.) [13, 9]. Результаты его сравнительных расчётов показали, что погрешности главной составляющей силы резания по упрощённому алгоритму Н.Н. Зорева при сравнении с результатами экспериментальной проверки расчёта сил резания двух марок сталей (ст. 10 и нержавеющей стали ЭЯ1Т), по 27 опытам составили: средняя 5,30%, максимальная – 13,93%.

Далее было проведено сравнение экспериментальных и расчетных значений главной составляющей силы резания полученных по Н.Н. Зореву и В.К. Старкову с данными - по алгоритмам А.Л. Воронцова, Ю.Н. Внукова, А.М. Розенберга при аналогичных режимах резания, характеристиках инструмента и обрабатываемого материала. Результаты этого сравнения сведены в таблицы 1,2,3.

При сравнении полученных сил резания результаты расчетов по формулам Н.Н. Зорева (1-3) были приняты как базовые и именно относительно них определялись все погрешности.

Следует заметить, что схемы резания А.Л. Воронцова, Ю.Н. Внукова, А.М. Розенберга фактически аналогичны схеме Н.Н. Зорева и В.К. Старкова, показанной на рис.1.

Для анализа выбирались только конструкционные стали, что связано с наличием данных по ним у всех рассматриваемых авторов. При определении свойств этих сталей, необходимых для расчета, использовался марочник сталей под ред. А.С. Зубченко [14]. Важно уточнить, что в расчетах Н.Н. Зорева температура в зоне резания по умолчанию принималась равной 600°С, т.к. при экспериментах различных авторов это могло оказать влияние на точность результатов.

Таблица 1.

Результаты расчётно-экспериментальной проверки формулы для определения сил резания А.Л. Воронцова по алгоритму Н.Н. Зорева, основанному на определении величины усадки стружки

№ (п/п)	Параметры инструмента		Характеристики обрабатываемого материала			Режимы резания		Составляющие силы резания		Погрешность при сравнении
								Расчетные по Н.Н. Зореву и В.К. Старкову [7,8]	Экспериментальные по А.Л. Воронцову [12] / Расчетные по А.Л. Воронцову [12]	
	γ, град	λ, град	Марка материала	Относительное сужение, ψ	$\sigma_в$, МПа	t, мм	S, мм/об	P_z, Н	P_z, Н	%
Сталь конструкционная углеродистая качественная										
1	8	0	Ст. 10	0,5	330	0,5	0,21	208.4	228	9,4
									227,4	9,11
2	25	0		0,5	330	1,00	1,00	1688	1800	6,64
									1849,2	9,55
3	15	8	Ст. 45	0,4	600	3,00	0,2	1369	1480	8,11
									1618,3	18,21
4	-5	0		0,4	600	3,00	0,2	1534	1760	14,73
									1769,2	15,33
Сталь конструкционная легированная										
5	0	0	20Х	0,48	470	0,5	0,3	432.3	430	-0,53
									435,3	0,69
6	0	0		0,48	470	0,5	0,23	333.8	350	4,85
									350,8	5,09

Таблица 2.

Результаты расчётно-экспериментальной проверки формулы для определения сил резания Ю.Н. Внукова по алгоритму Н.Н. Зорева, основанному на определении величины усадки стружки

№ (п/п)	Параметры инструмента		Характеристики обрабатываемого материала			Режимы резания		Составляющие силы резания		Погрешность при сравнении
								Расчетные по Н.Н. Зореву и В.К. Старкову [7,8]	Экспериментальные по Ю.Н. Внукову [9] / Расчетные по Ю.Н. Внукову [9]	
	γ, град	λ, град	Марка материала	Относительное сужение, ψ	$\sigma_в$, МПа	t, мм	S, мм/об	P_z, Н	P_z, Н	%
Сталь конструкционная углеродистая качественная										
1	10	0	Ст. 40	0,45	570	4,0	0,75	6267	5000	20,2
									4479	28,5
2	10	0		0,45	570	4,0	0,39	3320	3200	3,6
									2486	25,1
3	10	0		0,45	570	4,0	0,125	1100	1200	-9,1
									976	11,3
5	10	0	Ст. 10	0,5	330	4,0	0,51	3848	3000	22
									2339	39,2
6	10	0	Ст. 30	0,45	490	4,0	0,78	7621	4750	37,7
									4493	41
7	20	0	Ст. 50	0,35	630	12,0	0,85	17970	16500	8,2
									17602	2

Таблица 3.

Результаты расчётно-экспериментальной проверки формулы для определения сил резания А.М. Розенберга по алгоритму Н.Н. Зорева, основанному на определении величины усадки стружки

№ (п/п)	Параметры инструмента		Характеристики обрабатываемого материала			Режимы резания		Составляющие силы резания		Погрешность при сравнении
								Расчетные по Н.Н. Зореву и В.К. Старкову [7,8]	Экспериментальные по А.М. Розенбергу [11] / Расчетные по А.М. Розенбергу [11]	
	γ, град	λ, град	Марка материала	Относительное сужение, ψ	$\sigma_в$, МПа	t, мм	S, мм/об	P_z, Н	P_z, Н	%
Сталь конструкционная углеродистая качественная										
1	20	0	Ст. 10	0,5	330	3,0	0,291	1572	1460	7,1
									1375	12,5
2	0	0		0,5	330	3,0	0,291	1841	2180	-18,4
									2125	-15,4
3	-10	0		0,5	330	3,0	0,291	2089	2400	-14,9
									2440	-16,8
5	10	0	Ст. 30	0,45	490	4,0	0,75	7336	5560	24,2
									5640	23,1
6	10	0		0,45	490	4,0	0,49	4851	3600	25,8
									3700	23,7
7	10	0	Ст. 40	0,4	570	4,0	0,75	6267	5600	10,6
									5140	17,9

На расчет главной составляющей силы резания P_z оказывает значительное влияние значение относительного сужения обрабатываемого материала ψ. Как следует из формулы (1), и исходя из того, что значение ψ варьируется (0;1), для обработки металлов с большим значением относительного сужения требуются большие силы резания, и наоборот. Таким

образом, правильность выбора этого параметра тоже вносит определенную долю погрешности в расчеты.

Для анализа таблиц по усилию резания построим одну из возможных гистограмм (рис. 3) на которой покажем среднюю разницу между расчетными и экспериментальными значениями сил резания по каждому из авторов.

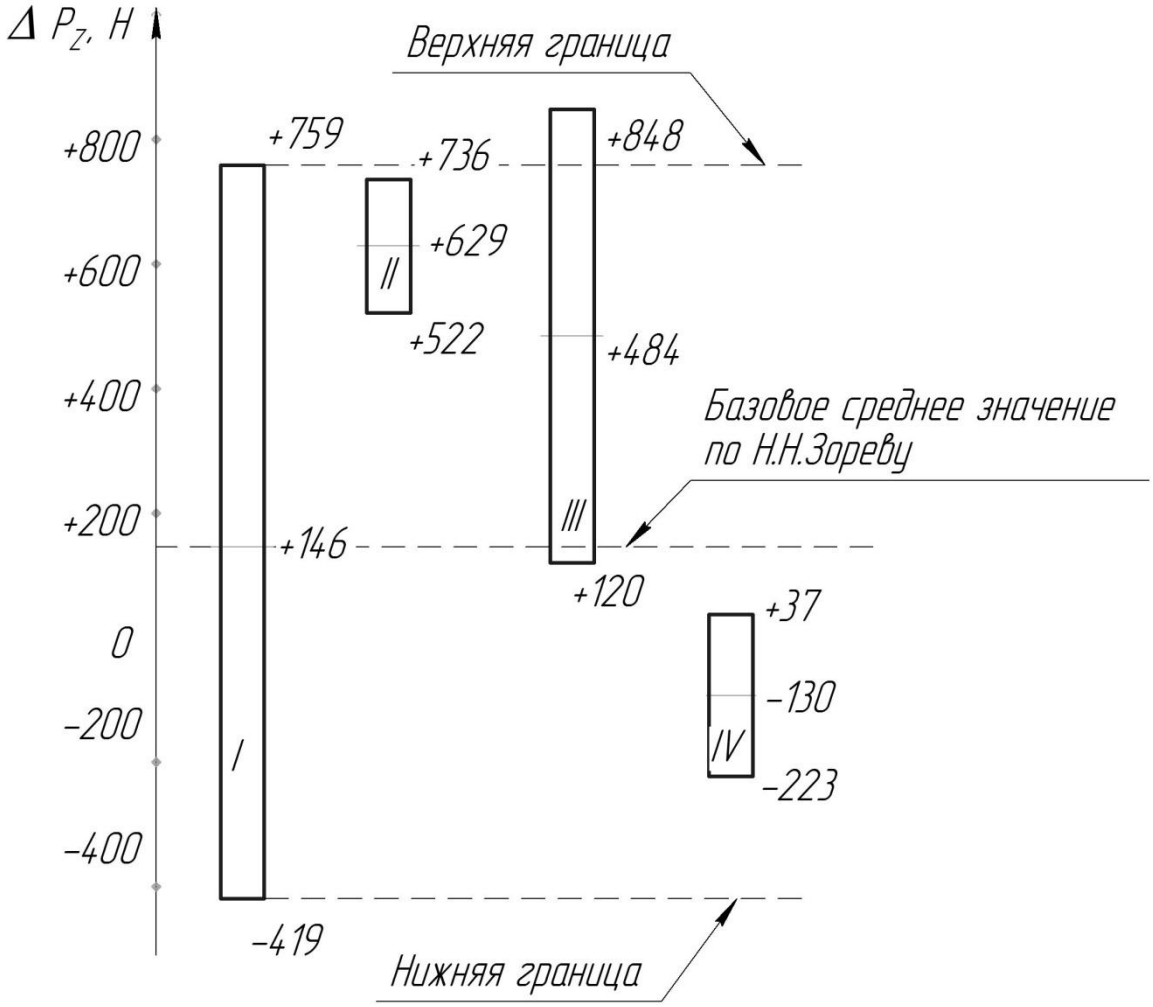

Рис.3. Разница между расчетными и экспериментальными значениями главной составляющей силы резания P_z .

С целью уменьшения погрешностей при выборе значений резания при построении данной гистограммы использовались экспериментальные данные полученные при точении только конструкционных сталей при подачах S =0,39÷0,75 мм/об , и глубинах резания t=4÷4,3 мм.

Гистограмма на рис. 3 содержит следующие обозначения:

I – Поле рассеяния значений разности между экспериментальными и расчетными силами P_z по Н.Н. Зореву;

II - Поле рассеяния значений разности между экспериментальными силами P_z по А.Л. Воронцову и расчетными силами P_z по Н.Н. Зореву;

III – Поле рассеяния значений разности между экспериментальными силами P_z по Ю.Н. Внукову и расчетными силами P_z по Н.Н. Зореву;

IV - Поле рассеяния значений разности между экспериментальными силами P_z по А.М. Розенбергу и расчетными силами P_z по Н.Н. Зореву.

В итоге выведены следующие средние значения полей рассеяния: 759Н по Н.Н. Зореву, 629Н по А.Л. Воронцову, 484Н по Ю.Н. Внукову и -130Н по А.М. Розенбергу. Разброс полученных значений объясняется тем, что эксперименты данными авторами проводились в несколько отличающихся условиях и оценить все факторы влияющие на конечный результат одинаковыми не представляется возможным. Однако, как видно из гистограммы что средние значения по каждому из трех авторов А.Л. Воронцову, Ю.Н. Внукову, А.М. Розенбергу находятся в границах поля рассеяния значений разности между экспериментальными и расчетными силами P_z по Н.Н. Зореву, принимаемыми нами за базовые.

Следует также заметить, что при проверке экспериментально полученных данных о силах резания Н.Н.Зорева по его же методике, средняя погрешность близка к указанным им же 10-15%[7]. Это свидетельствует о правильности использования формулы (1) в данной работе.

Принимая во внимание, что погрешность при определении силы резания по формуле Н.Н. Зорева указана им равной 10-15% [7], определены следующие величины погрешностей при аналогичных расчётах по другим авторам, а именно: - по А.Л. Воронцову - в среднем 7,2%; по Ю.Н. Внукову – 11,8%; по А.М. Розенбергу - 4,9%.

Гистограмма погрешностей расчёта усилий резания по данным указанных авторов показана на рис. 4. Исходя из того, что при расчетах погрешностей по всем авторам выбирались данные только по конструкционным сталям, примем погрешность в расчетах силы резания по Н.Н. Зореву равной 15% (по наибольшему значению). Погрешность по данным В.К. Старкова в 23% в данном случае не показана, в связи с тем, что он работал преимущественно с легированными сталями и в рамках данных расчетов не применим. Однако данную погрешность тоже имеет смысл учитывать в дальнейшем, с целью расширения границ возможных погрешностей.

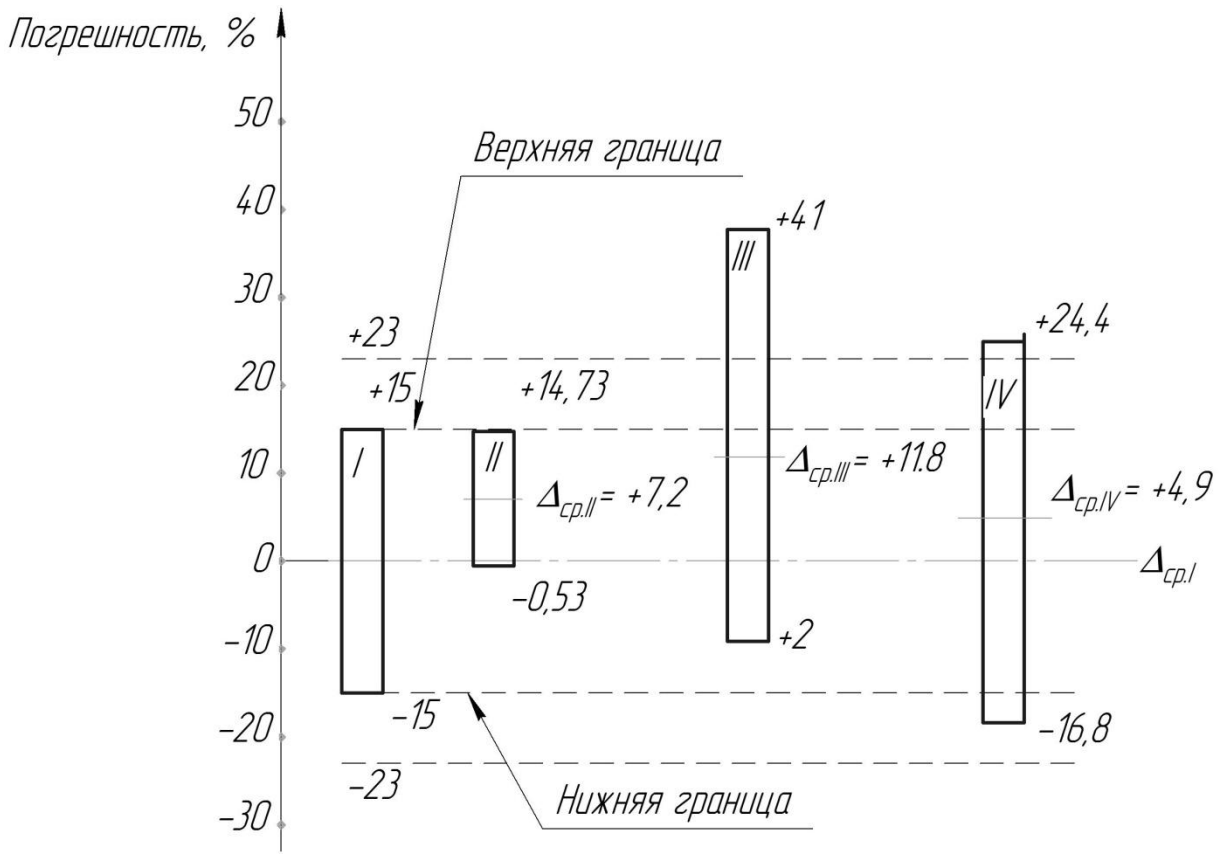

Рис.4. Гистограмма погрешностей между расчетными значениями главной составляющей силы резания P_z .

Гистограмма на рис. 4 содержит следующие обозначения:

I – поле рассеяния возможных значений силы резания рассчитанной по формуле Н.Н. Зорева;

II - поле рассеяния возможных значений силы резания рассчитанной по формуле А.Л. Воронцова;

III – поле рассеяния возможных значений силы резания рассчитанной по формуле Ю.Н. Внукова;

IV - поле рассеяния возможных значений силы резания рассчитанной по методике А.М. Розенберга;

Как следует из данных, представленных на гистограмме (рис. 4), наиболее приближены к эталонным, полученным по величине усадки стружки по Н.Н. Зореву и В.К. Старкову, расчетные значения главной составляющей сил резания, полученные по формуле А.Л. Воронцова. Анализируя гистограммы, можно сделать вывод, что, так как поле рассеяния II не выходит за верхнюю и нижнюю границу поля рассеяния I, то полученное расчетное значение силы резания по Воронцову можно считать достоверным в соответствии с принятой методикой. Т.е. формула А.Л. Воронцова может использоваться для определения составляющей силы резания P_Z и дает значение с высокой точностью.

Таким образом, в данной работе рассмотрен упрощённый алгоритм определения составляющих силы резания по величине усадки стружки по Н.Н. Зореву и В.К. Старкову, проанализированы преимущества и недостатки приведённой модели по данным других авторов. Изложены сведения о погрешности расчёта по рассмотренному алгоритму и алгоритму на основе определения проекций силы резания при одинаковой стойкости инструмента Н.Н. Зорева.

В заключение отметим, что все методики расчета главной составляющей силы резания, рассмотренные в рамках данной статьи, дают значения достаточно высокой точности, однако по данным настоящей работы всё же предпочтительнее использовать алгоритм определения составляющих силы резания по величине усадки стружки по Н.Н. Зореву и В.К. Старкову и формулу А.Л. Воронцова, т.к. результаты других авторов выходят за пределы установленного разброса погрешностей расчётов.

В связи с недостаточным количеством сведений по обработке резанием высоколегированных материалов в литературных источниках авторы считают целесообразным продолжить работу по анализу погрешностей базового алгоритма определения усилий резания с использованием иных и вышеуказанных сталей.

Список литературы.

1. Бриченков С.Н. «О точности алгоритмов аналитического расчёта сил резания». Наукоёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции. 6 – 12 декабря 2013 г. Т. 1. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014 г., с 79-84.

2. Волков А.В. «Гипотеза о точности расчёта силы резания. Параметры резания».10 с. (направлена для публикации в сборнике научных трудов Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 5, 2014 г.)

3. Волков А.В. «Гипотеза о точности расчёта силы резания. Разработка математической модели». 10 с. (направлена для публикации в сборнике научных трудов Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 5, 2014 г.)

4. Волков А.В. «О коэффициенте резания при точении». 10 с. (направлена для публикации в сборнике научных трудов Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 5, 2014 г.)

5. Волков А.В. «О следствии концепции Ю.М. Ермакова для расчёта усилий резания». Наукоёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции. 6 – 12 декабря 2013 г. Т. 1. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014 г., с 76 -77.

6. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. — 367 с.

7. Зорев Н.Н. «Расчёт проекций силы резания». Машгиз, Москва, 1958. — 56 с.

8. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. — 640 с.

9. Внуков Ю.Н., Саржинская А.Г. Анализ особенностей различных подходов при аналитическом расчете сил резания // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.- техн.сб. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2008.- Вып.74. - С.31-56.

10. Развитие науки о резании металлов. Коллектив авторов. /Под ред. д-ра техн. наук проф. Н.Н. Зорева. М., Машиностроение, 1967. 416 с.

11. Розенберг А. М., Розенберг О. А. «Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания».; АН УССР. Ин-т сверхтвердых материалов.— Киев : Наук, думка. 1990.— 320 С.

12. ВоронцовА. Л., Султан-ЗадеН. М, АлбагачиевА. Ю. Разработка новой теории резания. Современная теория разрушения при пластической деформации // Вестник машиностроения. - 2008. - С. 67 – 76.

13. Розенберг А. М., Еремин АД, Элементы теории процесса резания металлов. -М.1 Машгиз, 1956.

14. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение-1, 2003, 784 с.

15. Беспахотный П.Д., Федоров Ю.В. Исследование процесса резания с позиции теории разрушения // Прикладные вопросы физики деформации и разрушения материалов. М.: НИАТ, 1974. Вып. 2. С. 54-62.

16. Верещака А.С. Резание материалов: Учебник/А.С. Верещака, В.С. Кушнер. — М: Высш. шк., 2009. — 535 с.

17. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. — 304 с

18. Рыжкин А.А. Обработка материалов резанием: учебное пособие / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов. — Ростов н/Д.: Феникс, 2008. — 411 с.

Бриченков Сергей Николаевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: serega-stud@mail.ru.

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

S.N. Brichenkov, A.V. Volkov

COMPARISON OF ACCURACY OF THE ALGORITHMS ANALYTICAL CALCULATIONS OF CUTTING FORCES

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

Analytical determination of the cutting forces - one of the most difficult problems in the theory of metal cutting, over which the work collectives of many scientific schools. In this paper we consider a simplified basic algorithm for calculating cutting forces on N.N. Zorev and V.K. Starkov, forming the basis of a large part of efforts to promote new developments. Given error estimation of the basic algorithm in comparison with the results of other authors, as well as his criticism of these authors. The results of the conclusions about the possibility of using the basic algorithm at the present level of development of CAD / CAM / CAE / RDM - systems, its accuracy and the use of new algorithms, along with the development of CAD / CAM / CAE / RDM - systems. The work may be of interest to specialists in the field of metalworking and developers CAD / CAM / CAE / RDM - systems.

Keywords: *cutting force, chip shrinkage, cutting conditions.*

Brichenkov Sergey Nikolaevich – student of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: serega-stud@mail.ru.

Volkov Aleksandr Vladimirovich – Ph. D., Assoc. Professor of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: volkovkfmgtu@yandex.ru.

УДК 621.9.06

А.С. Свитка, И.Д. Соколова

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СТАНКОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ В РОССИИ

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

В статье проводится анализсовременного состояния станкостроения в России. Развитие станкоинструментальной отрасли – одно из важнейших факторов обеспечения модернизации промышленности России, однако производство новых станков, необходимых для качественного рывка вперед, серьезно отстает от запросов рынка. Выявлены направления развития станочного оборудования западными станкостроительными концернами: прогрессивные инновационные разработки, использование модульного принципа, производственная кооперация, автоматизированное проектирование. Рассмотреныосновные проблемы, мешающие развитию станкостроения в России:слишком низкая доля станков новых поколений, с высокими показателями производительности, точности и чистоты обработки,большая часть предприятий нуждается в реструктуризации и диверсификации.В результате исследования был сделан вывод о том, что закупка импортного оборудования подрывает технологическую безопасность страны. Поэтому главная задача промышленной политики на современном этапе – технологическая модернизация производства и повышение конкурентоспособности продукции за счет изменения качественного и количественного состава применяемых средств производства. Для успешного достижения этих целей необходима консолидация и концентрация отрасли.

Ключевые слова: *Станкостроение, многоцелевые станки, обрабатывающие центры*

Станкостроение – фондообразующая отрасль машиностроения, а стало быть, и зеркало развития промышленного потенциала страны. Однако отечественное станкостроение для металлообработки находится в достаточно сложной ситуации. Тем не менее, отечественное оборудование имеет шанс занять свою нишу как на внутреннем, так и на внешнем рынках.

В данной работе рассматриваются направления развития станочного оборудования западными станкостроительными концернамии основные проблемы, мешающие развитию станкостроения в России.

Доля машиностроения в объеме промышленного производства составляет в России 19,5%. Для сравнения: этот показатель в Германии, Японии, США и др. развитых странах составляет от 39 до 45% (доля станкостроения в объеме отрасли машиностроения). Еще в 1990 году СССР занимал третье место в мире по производству и второе — по потреблению механообрабатывающего оборудования. Сегодня Россия находится по этим показателям соответственно на 22-м и 17-м местах. Начиная с 2002 года импорт механообрабатывающего оборудования превышает его внутреннее производство. Одной из проблем данного рынка является высокая и постоянно увеличивающаяся доля импорта. Потребности внутреннего рынка в 2012 г. удовлетворялись за счет собственного производства лишь на 17% [1].

Развитие станкоинструментальной отрасли – одно из важнейших факторов обеспечения модернизации промышленности России, однако производство новых станков, необходимых для качественного рывка вперед, серьезно отстает от запросов рынка. Крайне низкая доля станков новых поколений, с высокими показателями производительности, точности и чистоты обработки не позволяет российским предприятиям при нынешних резко растущих затратах на сырье и энергию выпускать конкурентоспособную продукцию.

Большая часть из 300 предприятий нуждается в реструктуризации и диверсификации. Конкурентоспособную продукцию станкостроители выпускают только в небольших объемах, это узкая линейка оборудования и достаточно дорогой продукт. Основной доход предприятиям обеспечивают ремонт и модернизация старого оборудования (в среднем 80%), доля собственных новинок несоизмеримо мала. Тем не менее, при этом годовая потребность промышленности – не менее 50 тысяч единиц нового механообрабатывающего оборудования. В силу чего, внутренний спрос удовлетворяется преимущественно за счет импорта [2].

Предпочтения потребителя: не патриотичны, но прагматичны. Очевидно, что потребители предпочитают покупать импортное оборудование даже в том случае, если в России производятся его аналоги. Первую пятерку западных импортеров составляют традиционно сильные в этом секторе производители Японии, Германии, Китая, Италии, Южной Кореи. Чуть отстает от корейских производителей Тайвань.

Покупатели станков ориентируются на такие характеристики, как своевременность и точность изготовления деталей при низких на это затратах. Станки должны обладать возможностью установки на них систем электронного управления, цифровой индикации, объединения нескольких станков в технологические линии.

Современное станкостроение в связи с возросшими требованиями потребителей смещается от производства отдельных специализированных к многоцелевым станкам, совмещающим максимально возможное число

операций, к созданию гибких, программно-управляемых обрабатывающих центров с возможностью последующей автоматизации производства. Современные станки ведущих зарубежных компаний обеспечивают колоссальную производительность при высокой точности. Такой подход значительно расширяет возможности серийного образца без его серьезной реконструкции, избавляя от необходимости приобретать специальные станки. Большое внимание западные станкостроительные концерны уделяют совершенствованию не только механической части, но и электронной, а также улучшению эргономики и дизайна.

Ведущие станкостроительные заводы внедряют и прогрессивные инновационные разработки, используют модульный принцип, производственную кооперацию, автоматизированное проектирование, обновляют свои продуктовые линейки, пользующиеся повышенным спросом у потребителей. Стратегия развития российского станкостроения – вопрос национальной безопасности.

Мнения относительно того, какое будущее ожидает национальное станкостроение, часто кардинально расходятся. Потребители (особенно те немногие машиностроители, сохранившие способность делать достойную продукцию) говорят о системных проблемах отрасли, которые очень сложно решить. Некоторые специалисты полагают, что России нет необходимости развивать отечественное станкостроение и ликвидировать накопившееся отставание в отрасли. Они предлагают воспользоваться существующими продуктами, представленными на мировом рынке. Отнюдь не любое механообрабатывающее оборудование и инструмент могут быть свободно приобретены у зарубежных производителей, поскольку развитые страны контролируют экспорт наиболее наукоемкого оборудования и технологий, как принадлежащих к технологиям двойного назначения.

Тот факт, что закупка импортного оборудования подрывает технологическую безопасность страны, давно осознана представителями власти. Обеспечение отрасли машиностроения России отечественными станками наиболее наукоемких категорий – вопрос национальной безопасности.

Вывод. Главная задача промышленной политики на современном этапе – технологическая модернизация производства и повышение конкурентоспособности продукции за счет изменения качественного и количественного состава применяемых средств производства. Для успешного достижения этих целей необходима консолидация и концентрация отрасли [3].

В случае успешной реализации этих проектов по прогнозам Министерства промышленности уже к 2016 г. отечественное станкостроение сможет поставить для машиностроительных предприятий около 700 тысяч единиц нового механообрабатывающего оборудования.

Список литературы

1. [Электронный ресурс] Исследование рынка металлообрабатывающих станков в России http://re-port.ru/research/issledovanie_rynka_metalloobrabatyvayushih_stankov_v_rossii/ (дата обращения 10.10.2014 г.).

2. [Электронный ресурс] Станкостроение в России: состояние, тенденции, перспективы http://cadcam.3bb.ru/viewtopic.php?id=1170(дата обращения 10.10.2014 г.).

3. [Электронный ресурс] Краткая история и перспективы развития станкостроения http://komtech-stanki.ru/history.html (дата обращения 10.10.2014 г.).

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

Соколова Ирина Дмитриевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Инструментальная техника и технологии» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sokolovairinadm@rambler.ru.

A.S. Svitka, I.D. Sokolova

PROSPECTSOF DEVELOPMENTOF MACHINE BUILDING IN RUSSIA

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

The articleanalyzes the current state of machine building in Russia.The development of machine tool industry is one of the most important factors in ensuring the modernization of the Russian industry, however, the production of new machines required for qualitative leap forward, lags behind the demands of the market.Identified directions of development of machine-tool equipment Western machine tool companies: progressive innovation using a modular principle and manufacturing, computer-aided design.The main problems hindering the development of machine building in Russia: too low, the share of machines, new generation, high performance, accuracy and surface finish, most of the enterprises in need of restructuring and diversification. Thestudy concluded that the purchase of imported equipment undermines the technological security of the country.Therefore the main task of industrial policy at the present stage of technological modernization of production and increase the competitiveness of products due to a change in the qualitative and quantitative composition of the means of production.To successfully achieve these objectives, the necessary consolidation and concentration in the industry.

Key words:*Machine tools, multi-purpose machines, machining centers*

References

1. [Electronic resource] Market research Metalworking machines in Russia http://report.ru/research/issledovanie_rynka_metalloobrabatyvayushih_stankov_v_rossii/ (date of access 10.10.2014).

2. [Electronic resource] The machine tool industry in Russia: status, trends and prospectshttp://cadcam.3bb.ru/viewtopic.php?id=1170 (date of access 10.10.2014).

3. [Electronic resource] A brief history and prospects of development of machine tool industryhttp://cadcam.3bb.ru/viewtopic.php?id=1170 (date of access 10.10.2014).

Svitka Anastasia Sergeevna – student of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: svitka1993@yandex.ru.

Sokolova Irina Dmitrievna – Ph. D., Assoc. Professor of Instrumental equipment and technologies Department of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: sokolovairinadm@rambler.ru.

Ю.А. Савина, В.Т. Никитич

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ

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

Зубофрезерование является самой распространенной, но трудоемкой операцией для обеспечения высокого качества изготовления зубчатых колес, ее следует производить на жестких, с мощным электродвигателем, высокопроизводительных станках на повышенных режимах резания с применением многозаходных червячных фрез.

Зубофрезерование производится двумя методами - копированием и обкаткой. Зубофрезерование копированием производится дисковыми модульными или пальцевыми модульными фрезами. Зубофрезерование обкаткой производится червячными модульными фрезами.

Обкатное зубофрезерование червячными фрезами, известное уже более 100 лет, широко применяют и в современном машиностроении благодаря универсальности, а также высоким показателям производительности и точности. Технология позволяет нарезать зубчатые колеса внешнего зацепления с прямыми и косыми зубьями, конусной и бочко-образной формы, червячные колеса, шлицевые соединения с прямобочным и эвольвентным профилем, звездочки цепных передач и др. детали.

Зубофрезерование ведется на зубофрезерных станках дисковыми или червячными фрезами. Червячная фреза, например, получает главное (вращательное) движение и движение подачи в вертикальном направлении; заготовка имеет движение круговой подачи.

При обработке зубчатых колес с твердостью НВ 150-200 цельными и сборными червячными фрезами класса А (ГОСТ 9374-80) стабильно достигается 8-9 степень по ГОСТ 1643-81 и шероховатость поверхности Ra=1,6-5,0 мкм. Если требуется более высокая 7-8 степень точности, то применяют червячные фрезы класса АА, зубофрезерные станки и технологическую оснастку высокой точности и жесткости в статическом состоянии и под рабочей нагрузкой.

Для обеспечения изгибной и контактной выносливости стальные зубчатые колеса обычно подвергают химико-термической обработке (ХТО). В результате поверхность зубьев получает высокую твердость HRC 58-63 и вязкую сердцевину HRC 33-45. Однако под действием термических деформаций точность зубьев снижается на 1-2 степени. В связи с этим зубофрезерование червячными фрезами применяют в качестве предварительной обработки зубьев под последующее шевингование, шлифование, хонингование или окончательной обработки зубьев цилиндрических колес общего машиностроения невысокой точности.

Зубофрезерование дисковыми модульными фрезами осуществляют методом врезания с единым делением. Этим методом изготовляют зубчатые колеса невысокой точности (9-10-й степени); его в основном применяют для чернового нарезания зубьев в условиях серийного производства. Стандартные модульные фрезы не обеспечивают равномерного припуска под чистовую обработку, поэтому, когда необходим минимальный припуск, применяют специальные фрезы, спроектированные только для данного колеса. Процесс зубофрезерования дисковой фрезой методом деления не обеспечивает постоянства циклической погрешности колеса на один зуб, несмотря на то что погрешность профиля эвольвенты на всех зубьях может быть постоянной.

Зубофрезерование двумя дисковыми фрезами методом обкатывания характеризуется высокой производительностью благодаря применению многолезвийного инструмента, работающего на высоком режиме резания. Нарезание зубьев производят из целой заготовки. Производительность станков при работе двумя дисковыми фрезами в четыре раза выше, чем при зубострогании двумя резцами. Зубофрезерование дисковыми модульными фрезами осуществляют методом врезания с прерывистым делением. Изготовляют зубчатые колеса невысокой точности (9-10-й степени); его в основном применяют для чернового нарезания зубьев в условиях серийного производства. Зубофрезерование роторов выполняется на специальных зубофрезерных станках.

Наибольшее распространение получили методы зубофрезерования червячной фрезой с осевым, радиально-осевым и диагональным движением подачи, а также двухпроходное зубофрезерование.

Зубофрезерование с осевой подачей осуществляется при подаче червячной фрезы параллельно оси обрабатываемого колеса. Зубофрезерование с осевой подачей, осуществляемое при подаче червячной фрезы параллельно оси обрабатываемого колеса применяют для нарезания прямозубых и косозубых колес, шлицевых валов и червяков. Зубофрезерование с переменной осевой подачей основано на увеличении подачи при входе и выходе червячной фрезы из заготовки. Фрезерование зубчатого колеса начинается на максимальной подаче, затем она постепенно уменьшается до постоянной величины. На постоянной подаче станок продолжает работать до начала выхода фрезы из заготовки. В этот момент подача снова автоматически повышается до установленного максимального значения.

Фрезерование с радиально-осевым движением подачи эффективно при обработке колеса с большим углом наклона зубьев, закрытых зубчатых венцов, где невозможно выполнение осевого движения подачи, и при работе червячными фрезами большого диаметра. В обычных условиях фрезерование с осевым движением подачи предпочтительней фрезерования с радиально-осевым движением подачи.

Зубофрезерование с диагональным движением подачи выполняют при одновременном осевом движении подачи фрезы параллельно оси заготовки и тангенциальным движением подачи параллельно оси фрезы.

Этот метод значительно улучшает сопрягаемость профилей зубьев колес благодаря наклонному расположению огибающих резов по отношению к делительной линии зуба, что особенно важно для колес, зубья которых в дальнейшем не подвергаются механической обработке.

Большим преимуществом зубофрезерования с диагональным движением подачи является равномерный износ зубьев червячной фрезы по всей длине. Этот метод целесообразно использовать при обработке зубчатых колес с широкими зубчатыми венцами, пакета из нескольких заготовок и колес с повышенной твердостью. При фрезеровании с диагональным движением подачи экономически целесообразно применять длинные точные червячные фрезы.

Зубофрезерование за два рабочих хода заключается в том, что первый и второй рабочие ходы осуществляют последовательно за один установ заготовки. Глубина резания при втором рабочем ходе составляет 0,5…1,0 мм. Холостые ходы обеспечивают ускоренный подвод и отвод червячной фрезы. Обычно при втором рабочем ходе скорость резания увеличивают на 25-40%. Скорость движения осевой подачи, как правило, уменьшают с целью повышения качества поверхности зубьев и стойкости червячной фрезы.

Зубофрезерование можно производить с подачей смазочно-охлаждающей жидкости и без подачи СОЖ. В качестве СОЖ применяют минеральные и синтетические масла. Синтетические масла более совместимы с окружающей средой, так как не содержат хлора, тяжелых металлов и ароматических углеводородов. При использовании СОЖ станки должны быть оснащены мощными установками для удаления масляного тумана, не допуская его эмиссии в окружающую среду.

Зубофрезерование без СОЖ экономически более эффективно и экологически безопасно для окружающей среды. Обработку производят червячными фрезами из порошковой быстрорежущей стали (число заходов 1-3) и твердого сплава (число заходов 1) заготовок зубчатых колес с модулем соответственно до 5 мм и до 4 мм. В зависимости от режимов резания и геометрии зубчатого колеса температура заготовки при обработке не должна превышать 30-50°С. Для обеспечения термического баланса зубофрезерного станка мощным потоком воздуха удаляют стружку, образующуюся в зоне резания. При этом станок снабжают термостойким кожухом и специальными устройствами для удаления и транспортирования стружки и металлической пыли. Хорошие результаты при обработки без СОЖ получают при использовании зубофрезерования за два рабочих хода.

В пределах рабочей длины червячной фрезы ее зубья снимают различную по толщине и форме стружку. Поэтому износ фрезы не равноме-

рен по длине. Чтобы выровнить износ по всей длине, фрезу периодически передвигают вдоль оси. Исходными составляющими для определения величины передвижки являются число зубьев, угол наклона зубьев, ширина зубчатого венца, модуль, число стружечных канавок, рабочая длина фрезы и другие параметры.

Существуют два способа передвижки фрезы: одноцикловой и многоцикловой. При одноцикловом способе фрезу автоматически передвигают на определенную длину после обработки одной или нескольких заготовок. Обычно длина передвижки и число обработанных заготовок выбирается так, что при достижении конца рабочей длины фрезы она заменяется. Недостатком этого метода является высокая термическая нагрузка на зубья фрезы вследствие небольшой длины передвижки. Поэтому для теплонапряженных процессов, например, для зубофрезерования без СОЖ, применяют многоцикловой способ.

Зубофрезерование широко используется для обработки как прямозубых, так и косозубых колес благодаря своей высокой производительности, точности и универсальности. Наиболее прогрессивным является зубофрезерование полнопрофильными червячными фрезами, обрабатывающими как внутренний профиль, так и наружный диаметр шестерни, что существенно повышает их точность. Зубофрезерование дисковыми фрезами целесообразно изготовлять зубчатые колеса 7-9-й степени точности. Точность обработки зубчатых колес дисковыми фрезами зависит главным образом от точности делительных головок или лимбов и точности профилирования и изготовления дисковых фрез.

Зубофрезерованием обрабатывают зубчатые колеса 6-8 степени точности. При использовании прецизионного оборудования и инструмента зубофрезерование обеспечивает 4-5 степень точности. Производительность зубофрезерования, особенно при обработке узких колес, может быть повышена применением радиального врезания фрезы, благодаря значительно меньшей длине врезания. Такой метод применим на станках, имеющих механизм переключения радиальной подачи на продольную при точно фиксированном межосевом расстоянии и работающих при выключенном механизме дифференциала на радиальной подаче.

Процесс скоростного зубофрезерования ведется с образованием большого количества нагретой стружки, отлетающей на значительное расстояние от рабочей зоны. В этих условиях кроме обычных правил по технике безопасности следует заранее осуществлять ряд дополнительных мероприятий, гарантирующих безопасность работы станочников. При зубофрезеровании первый и второй переходы осуществляются последовательно с автоматическим изменением режимов. Первый переход обычно происходит при попутной подаче, второй - при встречной.

Список литературы

1. *Корсаков В.С.* Основы технологии машиностроения. – М.: Высшая школа, 1974. – 335 с.

2. *Колесов И.М.* Основы технологии машиностроения. – М.: Высшая школа, 1999. – 591 с.

3. *Косилова А.Г.* Справочник Технолога Машиностроителя. – М.: Машиностроение, 1986г. – Т2. – 496 с.

4. *Калашников А.С*. Современные методы обработки зубчатых колёс. – М.: Спектр, 2012 – 238 с.

5. *Локтев Д.А.* Современные износостойкие покрытия червячных фрез // Стружка. – 2007. – №19. – 40 с.

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

Никитич Валерий Тимофеевич – канд. техн. наук, преп. кафедры "Технологии машиностроения" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ulia1158@yandex.ru.

Р.Р. Газыев, В.В. Калмыков

ВЫБОР ПОСАДОК В СОЕДИНЕНИИ ВАЛ-ВТУЛКА

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

Улучшение ресурсоемкости и надежности изделий определяет эффективность современного производства. Это позволяет повысить конкурентоспособность отечественной промышленности. От качества подвижных и неподвижных соединений деталей зависит качество узлов и агрегатов. Широкое применение получили соединения типа «вал-втулка». Условно их можно разделить на два типа [1]:

1. Шпоночные соединения;
2. Фрикционно-посадочные соединения.

Выбор зависит от требований к сборке, а также от величины и силы крутящегося момента. Для поддержания соединений «вал-втулка» в исправном состоянии необходимо защищать их от коррозийного истирания (трибокоррозии) с помощью смазочных материалов. Чаще всего применяются антифрикционные покрытия или пастообразные твердые смазки, в состав которых входят графит, дисульфид молибдена и другие добавки.

Шпоночные соединения зачастую подвергаются воздействию ударных нагрузок и переменных крутящих моментов. Высокое давление в сочетании с относительно небольшим движением вызывает коррозийное истирание, которое в дальнейшем может привести к заклиниванию соединений. Антифрикционные покрытия получили широкое применение в автомобилестроительной промышленности. Во избежание образования задиров и предотвращения коррозийного истирания скользящие поверхности и конусы фрикционно-посадочных соединений необходимо смазывать пастами. Смазочные материалы не только предотвращают антикоррозийное истирание в шпоночных и фрикционно-посадочных соединениях, но и способствуют облегчению сборки и демонтажа деталей [2].

Необходимые свойства соединений обеспечивают различными сочетаниями размеров сопрягаемых поверхностей, которые называют посадками. В настоящее время основой для выбора посадок являются экспериментальные данные и производственный опыт. Известные методики расчета соединений «вал-втулка» являются приближенными, так как не учитывают все факторы, влияющие на соединение. Их применяют для предварительного определения зазоров и натягов, которые могут обеспечить работоспособность в заданных условиях эксплуатации. На надежность соединения с натягом влияет свыше 20 факторов: это физико-механические свойства материалов вала и втулки, их геометрические параметры, технология сборки, условия эксплуатации, усталость материала, фреттинг-коррозия, остаточные напряжения и т.д. Для учета влияния большинства факторов пока нет

математических соотношений и экспериментальных данных. В работе [3] предложена методика и программа прогнозирования состояния соединений «вал-втулка» посредством нейросетевых алгоритмов. Входными данными для работы нейронной сети является множество, которое составляют факторы, влияющие на образование натяга (зазора) в соединениях. Размерные факторы при этом поступают с 3D-модели детали. Выходными данными (результатом работы системы) являются прогнозируемые предельные натяги (зазоры), получаемые в результате соединения поверхностей деталей. Задача нейронной сети – подбор весовых коэффициентов для прогнозирования натягов (зазоров). Смоделированная сеть будет чувствительна к вариации входных параметров и, следовательно, может быть использована для прогнозирования состояния соединений «вал-втулка» деталей машиностроения. Сеть способна обобщить закономерность на новые данные. Разработанная информационная система позволит сделать выбор посадки обоснованным, более точным, выполняемым в автоматическом режиме. Это обеспечит надежность работы соединений и повысит качество изделий машиностроения. [3]

Список литературы

[1] Новиков М.П. Значение сборочных процессов в машиностроении. *Основы технологии сборки машин и механизмов*, 1980, №5, с. 5-16.

[2] [Электронный ресурс]. URL: http://www.mirsmazok.ru/blogs/modules.php?name=articles&id=1307 (дата обращения 11.10.2014).

[3] Е.В. Тесленко, Д.С. Тесленко, В.В. Андреев. Прогнозирование состояния соединений типа «вал-втулка» с помощью искусственной нейронной сети. URL: http://www.nntu.ru/trudy/2011/04/129-135.pdf (дата обращения 11.10.2014).

Газыев Руслан Ринатович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: marageal@yandex.ru.

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

Д.В. Артёмов, А.И. Быков, В.М. Масюк

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА БРИГ-10Б

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

Введение. Одна из современных проблем робототехники – адаптация оборудования и встраивание в технологическую цепочку. проблемы возникают на следующих участках: различия в форматах управляющих последовательностей, несоответствие уровней питающих напряжений, использование пневматических устройств разного назначения и с разным давлением. Соответственно модернизацию необходимо проводить по следующим направлениям: создание микроконтроллерных систем согласования данных, разработка систем электропитания, исследование и разработка управляющих систем подвода пневматики. В настоящее время данная задача решается для создания роботизированной ячейки на основе робототехнического комплекса второго поколения с роботом первого поколения БРИГ–10Б. В данной работе мы рассматриваем исследование пневматики и решение энергетической задачи.

На рисунке 1 представлена схема пневматической системы. Согласно работы [1], воздух от магистрали проходит через фильтр-влагоотделитель (ВД1), пневмоклапан (РГ1), фиксируется манометром (МН1) и одновременно идет в ресивер (РС1) (аккумулятор для подпития воздухом) и через маслораспылитель (МР1) и реле давления (РД1) в пневмораспределитель (Р1).

В нижнем положении PI воздух по магистрали проходит в блок воздухораспределителей (БВР), то есть в пневмораспеделители Р2, Р3 , Р4, Р5, Р6, Р7, Р8, и в пневмоцилиндр (РКА).

В верхнем положении Р1 воздух выходит в атмосферу. В нижнем положении пневмораспределителя Р1 воздух идет в следующие устройства.

В пневмоцилиндр (РКА), откуда посредством давления воздуха на поршень масло из правой полости подается в демпферы.

В пневмораспределитель (Р2, нижнее положение), откуда через дроссель с обратным клапаном (ДР1) подается в пневмоцилиндр продольного перемещения руки. Шток перемещается вправо, одновременно перемещая шток гидроцилиднра демпфера, и масло в демпфере из правой полости гидроцилиндра через дроссель (ДР3) переливается в левую полость. Происходит плавное затормаживание. Воздух из пневмоцилиндра продольного перемещения руки через дроссель с обратным клапаном (ДР2), через пневмораспределитель (Р2), через глушитель (Г1) уходит в атмосферу.

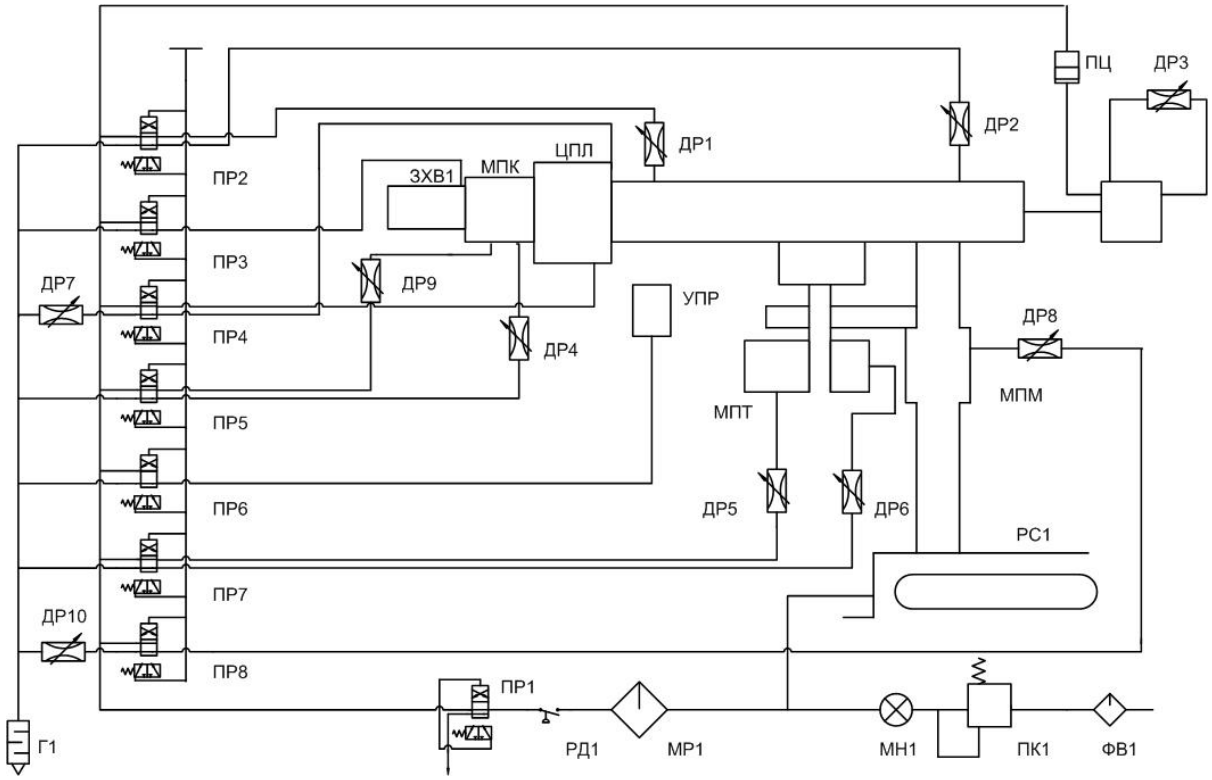

Рисунок 1

В пневмораспределитель (Р3, нижнее положение) проход воздуха закрыт.

В пневмораспределитель (Р4, нижнее положение), откуда в пневмоцилиндр ползуна (ПЛН) (перемещение кисти) и, перемещая шток, перемещает кисть в сторону, затем воздух из пневмоцилиндра ползуна (ПЛН) по другому трубопроводу, через пневмораспределитель (Р4), через дроссель (ДР7), через глушитель (Г1 уходит в атмосферу).

В пневмораспредитель (Р5, нижнее положение), откуда через дроссель с обратным клапаном (ДР3) подается в механизм поворота кисти (МПК); кисть поворачивается и воздух через дроссель с обратным клапаном (ДР4) через пневмораспределитель (Р5), через глушитель (Г1) уходит в атмосферу.

В пневмораспределитель (Р6, нижнее положение) проход закрыт.

В пневмораспределитель (Р7, нижнее положение), откуда через дроссель с обратным клапаном (ДР5) подается в механизм поворота руки (МПТ); рука поворачивается и воздух через дроссель с обратным клапаном (ДР6), через пневмораспределитель (Р7), через глушитель (Г1) уходит в атмосферу.

В пневмораспределитель (Р8, нижнее положение) проход закрыт.

Рассмотрим работу при переключении блока воздухораспределителя (БВР), то есть пневмораспределителей Р2, Р3, Р4, Р5, Р7, Р8 в верхнем положении. При этом происходят противоположные описанным движения рабочих органов.

Воздух через пневмораспределитель (Р2, верхнее положение), через дроссель с обратным клапаном (ДР2) поступает в правую полость пневмоцилиндра продольного перемещения руки; шток перемещается влево, одновременно перемещая шток гидроцилиндра демфера, и масло в демпфере из левой полости через дроссель (ДР3) переливается в правую полость. Происходит плавное затормаживание. Воздух из пневмоцилиндра продольного перемещения руки через дроссель с обратным клапаном (ДР1), через пневмораспределитель (Р2), глушитель (Г1) уходит в атмосферу.

Воздух через пневмораспрделитель (Р3, верхнее положение), затем через трубопровод подается к механизму схвата (ПСТ); шток двигается влево и кисть сжимается. В нижнем положении (Р3) воздух из цилиндра (ПСТ) через Г1 уходит в атмосферу. Кисть под воздействием пружины, возвращающей поршень в обратное положение, разжимается.

Воздух через пневмораспределитель (Р4, верхнее положение), через трубопровод подается в пневмоцилиндр ползуна (ПЛН) и , перемещая шток, перемещает кисть. Затем воздух из (ПЛН) по другому трубопроводу через пневмораспределитель (Р4), через дроссель (ДР1), через глушитель (Г1) уходит в атмосферу.

Воздух через пневмораспределитель (Р5, верхнее положение), через дроссель с обратным клапаном (ДР4) подается в пневмоцилиндр механизма поворота кисти (МПК), кисть поворачивается и воздух через дроссель с обратным клапаном (ДР9), через пневмораспределитель (Р5), через глушитель (Г1), уходит в атмосферу.

Воздух через пневмораспределитель (Р6, верхнее положение) подается к промежуточному упору (для установки руки при повороте в среднем положении) (УПР), шток упора выдвигается вверх.

В нижнем положении Р6 воздух от УПР через пневмораспределитель (Р6), через глушитель (Г1) уходит в атмосферу. Упор опускается под действием пружины.

Через пневмораспределитель (Р7, верхнее положение) воздух подается через дроссель с обратным клапаном (ДР6) в цилиндр механизма поворота руки (МПТ). Рука поворачивается, затем воздух через дроссель с обратным клапаном (ДР5), через пневмораспределитель, через глушитель (Г1) уходит в атмосферу.

Воздух через пневмораспределитель (Р8, верхнее положение), через дроссель с обратным клапаном (ДР8) подводится к пневмоцилиндру механизма подъема руки (МПМ). Рука поднимается. В нижнем положении (Р8) воздух от (МПМ) через дроссель с обратным клапаном (ДР8) через глушитель (Г1) уходит в атмосферу. Рука начинает опускаться под действием силы тяжести.

Результаты. По причине отсутствия другой документации по БРИГ–10Б пришлось устанавливать опытным путём порядковые номера пневмоцилиндров. Для этого было необходимо подать напряжение на электромагниты, отвечающие за работу пнемоцилиндров, согласно их маркировки.

Рабочее напряжение электромагнитов 127 В и 220 В. Чтобы запитать электромагниты был рассчитан трансформатор, от которого могли питаться электромагниты с соответствующими номинальными напряжениями.

Проанализировав полученные в ходе эксперимента результаты, можно сделать вывод: задать положение схвата манипулятора в пространстве для робота БРИГ–10Б можно с помощью 7 управляющих сигналов. Это даёт возможность построения системы управления на базе микроконтроллера ATmega8. В этом случае схема мехатронной робототехнической системы будет выглядеть так как представлено на рисунке 2.

Рисунок 2

Выводы. В ходе исследовательской работы была изучена пневматическая система промышленного робота БРИГ–10Б. Рассчитан трансформатор для питания электромагнитов пневмоклапанов. Выбрана микроконтроллерная база для системы управления.

Список литературы

[1] Сайфутдинов С.Р., Савельев А.А. *Наладка промышленного робота «БРИГ–10Б»: учебное пособие*. Челябинск, ЮУрГУ, 1997, 13с.

[2] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: учеб. для вузов. Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000, 400 с.

[3] Козырев Ю.Г. *Устройства управления роботами. Схемотехника и программирование.* Москва, Предко, 2004, 404с.

Артёмов Денис Вячеславович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Colt50rus@mail.ru.

Быков Артём Иванович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: bykov200@yandex.ru.

Масюк Владимир Михайлович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Мехатроника и робототехника» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: masyuk77@gmail.com.

В.В. Калмыков, К.Н. Юсупова

МЕРОПРИЯТИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ

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

Одним из качественных показателей машиностроительного производства является точность изготовления деталей машин. Под точностью обработки понимают степень соответствия изготовленной детали по форме, размерам, шероховатости поверхности, и другим техническим условиям, заданным на чертеже.

На точность оказывает влияние ряд факторов, таких как свойства обрабатываемого материала, их однородность, способы обработки, выбор технологических баз, точность оборудования, инструмента, технологической оснастки и т. д. Ужесточение допусков – это одно из мероприятий повышения качества производства, позволяющее повысить конкурентоспособность предприятия. Допуски назначаются в зависимости от условий работы детали в изделии [1].

Повышая точность механической обработки, устраняются пригоночные работы на сборке, что позволяет осуществить принцип взаимозаменяемости деталей и узлов, а также ввести поточную сборку. Обеспечение точности отверстий наиболее затруднено. Это обусловлено применением большой номенклатуры инструментов и трудоемкостью проведения операций и условиями протекания технологического процесса.

Основные виды погрешностей, возникающие при обработке отверстий, регламентирует ГОСТ Р 53442-2009 [2]. К наиболее важным техническим параметрам относятся параллельность и перпендикулярность осей, отклонение от круглости (овальность, огранка), соосности, концентричности, а также *допуск биения*.

Для повышения точности отверстий используют традиционные способы обработки лезвийным инструментом: сверление, зенкерование, развертывание, протягивание. Каждому способу соответствует предельная точность, приведенная в таблице 1.

Однако применение современных инструментов позволяет только на сверлильных операциях обеспечивать точность на 2-3 квалитета выше.

Применение последнего поколения высокопроизводительных сверл GARANT HiPer со сменными режущими головками позволит использовать усовершенствованную систему охлаждения. Улучшенный отвод тепла из зоны резания уменьшает погрешности, вызванные температурными деформациями. Сверла GARANT HiPer для обработки отвер-

стий глубиной 12xD имеют сменные сверлильные головки, охватывающие диапазон диаметров 13 — 32 мм и следующие значения глубины сверления: 1.5xD, 3xD, 5xD, 8xD и 12xD. Данный инструмент обеспечивает высокую концентричность, точность и прочность, а также отсутствие «увода» [3].

Таблица 1. Обеспечение точности

Квалитет	Маршрут обработки
12	Сверление без кондукторной втулки
11	Сверление с кондукторной втулкой. + Зенкерование. + Растачивание резцами.
9,8	Сверление + зенкерование.
7	Сверление + предварительное растачивание. + Тонкое растачивание. Сверление + протягивание. Сверление + шлифование.
6	Шлифование + алмазное точение или хонингование, доводка.

Новый тип заточки Jet Point Tip с максимально острым центром в виде «пирамидки» с очень острым углом заточки обеспечивает более точную зацентровку режущего инструмента. Использование спиральных сверл компании Irwin Turbomax исключает соскальзывание сверла в сторону в начале сверления, позволяя отказаться от зацентровки. Боковые резцы, сформированные наружными скосами и выемками по бокам центрального острия, тоже ускоряют выборку материала за счет большей длины режущей кромки, повышая ее стойкость[4].

Компанией Sandvik Coromant было разработано сверло CoroDrill 861, позволяющее получать точные отверстия (IT8) глубиной до 30xDC без вывода инструмента для удаления стружки. Высокие скорость резания и подача дают возможность повысить производительность, снижая стоимость изготовления детали[5].

Использование прогрессивных современных инструментов позволяет увеличить точность и производительность без ущерба себестоимости производства, а зачастую снижает затраты за счет использования дополнительных инструментов.

Список литературы

1. Повышение точности при сверлении отверстия спиральными сверлами путем управления динамическими составляющими процесса//Диссертации в Техносфере: http://tekhnosfera.com/povyshenie-tochnosti-pri-sverlenii-otverstiya-spiralnymi-sverlami-putem-upravleniya-dinamicheskimi-sostavlyayuschimi.html (дата обращения:10.10.14).

2. ГОСТ Р 53442-2009 Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения. М., 2009, 51с.

3. Усовершенствованные сверла GARANT HiPer от Hoffmann на выставке AMB 2014// Онлайн журнал «Твердый сплав»: http://tverdysplav.ru/usovershenstvovannye-sverla-garant-hiper-ot-hoffmann-na-vystavke-amb-2014.html (дата обращения:10.10.14).

4. Спиральные сверла Irwin Turbomax // Camping Manitoulin: http://www.campingmanitoulin.com/instrumenty/obychnye-instrumenty/487-spiralnye-sverla-irwin-turbomax.html (дата обращения:10.10.14).

5. CoroDrill 861// Sandvik Coromant:http://www.sandvik.coromant.html (дата обращения:10.10.14).

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

Юсупова К.Н. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lapylya9206@mail.ru.

А.В. Волков, И.К. Устинов

МОДУЛИ ЛОГИЧЕСКОГО СРАВНЕНИЯ И РАСЧЁТА ПЕРЕХОДОВ МОДЕЛИ ВОЛОЧЕНИЯ.

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

Ранее разработана и реализована в среде Mathcad математическая модель процесса многократного волочения микропроволоки со скольжением. Общая схема алгоритма состоит из четырёх математических модулей. Первый и второй модули алгоритма представлены в предыдущих работах. Здесь решали задачу разработки модулей логического сравнения и расчёта переходов по алгоритму, пригодному для реализации модели в универсальной программной среде.

В третьем модуле (III) проводится логическое сравнение парных критериев второго модуля (II): 9 – 9а, 10 – 10а, 11 – 11а, 12 – 12а, 13 – 13а, т.е. нахождение пересечения (общей части) рассматриваемых условий. Функции сравнения, которые обеспечивают проверку условий выполнения критериев многократного волочения K_{ij}, $K1_{ij}$; Ψ_{ij},$\Psi 1_{ij}$; H_{ij}, $H1_{ij}$; Θ_{ij} и $\Theta 1_{ij}$; A_{ij} и $A1_{ij}$, следующие:

$$K2_{i,j}(K_{i,j},K1_{i,j}) \equiv \left| \begin{array}{l} 1\ if\ \ K_{i,j}(B_{i,j},Б_{i,j},) = K1_{i,j}(B1_{i,j},Б1_{i,j}) = 1 \\ 0\ otherwise \end{array} \right. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 14);$$

$$\Psi 2_{i,j}(\Psi_{i,j},\Psi 1_{i,j}) \equiv \left| \begin{array}{l} 1\ if\ \ \Psi_{i,j}(B_{i,j},Б_{i,j},) = \Psi 1_{i,j}(B1_{i,j},Б1_{i,j}) = 1 \\ 0\ otherwise \end{array} \right. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 15);$$

$$H2_{i,j}(H_{i,j},H1_{i,j}) \equiv \left| \begin{array}{l} 1\ if\ \ \ H_{i,j}(F_{i,j},B_{i,j},) = H1_{i,j}(F1_{i,j},B1_{i,j}) = 1 \\ 0\ otherwise \end{array} \right. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 16);$$

$$\Theta 2_{i,j}(\Theta_{i,j},\Theta 1_{i,j}) \equiv \left| \begin{array}{l} 1\ if\ \ \Theta_{i,j}(F_{i,j},B_{i,j},) = \Theta 1_{i,j}(F1_{i,j},B1_{i,j}) = 1 \\ 0\ otherwise \end{array} \right. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 17);$$

$$A2_{i,j}(A_{i,j},A1_{i,j}) \equiv \left| \begin{array}{l} 1\ if\ \ A_{i,j}(\sigma_{i,j},F_{i,j},) = A1_{i,j}(\sigma 1_{i,j},F1_{i,j}) = 1 \\ 0\ otherwise \end{array} \right. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 18).$$

Пользователь на основании анализа условий сравнения 14-18 выбирает индекс $j = \rho$, т.е. равенство j величине, при которой процесс волочения реализуется ещё без нарушения, или без значительного нарушения, исполнения критериев волочения по всем переходам (здесь j - индекс варианта изменения относительного обжатия на каждом переходе). Таким образом,

производится выбор значений основных функций, обеспечивающих удовлетворение требований модели.

Завершает программную часть алгоритма четвёртый модуль (IV), предназначенный для определения коэффициента запаса и окончательного расчёта переходов в соответствии с функциями общего вида 19 - 21 и 19а - 21а, включая определение допусков на диаметры калибрующей части отверстий волок - $\Delta d_{i,\rho}$:

$$\begin{cases} \gamma_{3\,i,\rho}(S_{Tc_{i,\rho}}, \sigma_{i,\rho}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 19); \\ d_{i,j}(F_{i,j}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 20); \\ \Delta d_{i,\rho}(d_{i,0}, d_{i,\rho}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 21); \end{cases}$$

$$\begin{cases} \gamma_3 1_{i,\rho}(S_{Tc}1_{i,\rho}, \sigma_{i,\rho}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 19a); \\ d1_{i,j}(F1_{i,j}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 20a); \\ \Delta d1_{i,\rho}(d1_{i,0}, d1_{i,\rho}) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 21a). \end{cases}$$

Данный модуль базируется на сведениях, полученных в модулях I, III, а также – в модуле управления, т.е. модуле анализа и вывода результатов, который будет доступен пользователю только при непосредственной конкретизации программной среды.

Обозначения в модулях соответствуют нотации И.Л. Перлина, что позволяет обеспечить лучшую читабельность, по сравнению с нотацией среды Mathcad, принятой в ранних работах. Использование нотации И.Л. Перлина дало возможность привести функции к каноническому виду, доступному для реализации в универсальной программной среде.

Последовательное использование приведённого алгоритма в математической нотации (т.е. аналитического описания модели из четырёх модулей) позволяет обеспечить реализацию модели многократного волочения со скольжением микропроволоки из алюминиевых сплавов в универсальной программной среде.

В результате проведённой работы получена математическая нотация общего вида модулей логического сравнения парных критериев надёжности и расчёта переходов алгоритма модели процесса многократного волочения со скольжением микропроволоки из алюминиевых сплавов, пригодная для использования в универсальной программной среде, например, в свободной среде SciLab с MEPL-подобным интерфейсом.

Список литературы

1. *Волков А.В., Бондаренко Г.Г.* «Разработка и реализация модели процесса многократного волочения микропроволоки». Москва, Наукоёмкие технологии, №5, 2002, т. 3, стр. 19-23.

2. *Волков А.В., Бондаренко Г.Г.* «Совершенствование модели волочения микропроволоки. Часть I». Москва, Наукоёмкие технологии, №1, 2004, т. 1, стр. 14-18.

3. *Волков А.В., Бондаренко Г.Г.* «Совершенствование модели волочения микропроволоки. Часть II». Москва, Наукоёмкие технологии, №3-4, 2005, стр. 34-38.

4. *Волков А.В.* «Методика построения и анализа дискретных математических моделей». Наукоёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции 17-18 декабря 2009 г. Т. 1. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009 г. С. 27-28.

5. *Волков А.В.* «Методическая особенность математической модели волочения». Наукоёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции 7-9 декабря 2010 г. Т. 1. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010г., С. 11-12.

6. *Волков А.В.* «Общий вид модели волочения микропроволоки». Наукоёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции 30 ноября - 2 декабря 2011 г. Т. 1. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011 г. С. 4.

7. *Волков А.В.* «Критериальный модуль модели волочения». Наукоёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции 4-6 декабря 2012 г. Т. 1. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012 г. С. 4 - 5.

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

Устинов Игорь Кириллович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: volkovkfmgtu@yandex.ru.

А.Н. Прохоров, Е.Н. Малышев

МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП В ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СТАНКА

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

Рассматривается методика определения технологических возможностей станка. Особое внимание уделяется модульному принципу. Данный принцип позволяет наиболее точно определить технологические возможности станков.

Ключевые слова: *Производственная мощность, технологические возможности станка, поверхность, модуль поверхности.*

Для того чтобы определить производственную программу на календарный период или возможность выполнения каких-либо индивидуальных заказов, необходимо знать технологические возможности станков предприятия.

Обычно возможности производства оцениваются по производственной мощности. Под производственной мощностью предприятия (цеха, участка) понимается возможность максимального годового выпуска продукции определенного качества при заданной номенклатуре и ассортименте [1].

Таким образом, потенциал технологических возможностей станков предприятия это возможность выпуска деталей определенной номенклатуры в определенных объемах. В связи с этим необходимо разработать методику определения данного потенциала.

Существует две методики определения производственных мощностей, в основе которых лежит разработка технологических процессов: в первом случае — технологического процесса каждой детали, а во втором — деталей-представителей [2].

Обе методики имеют существенные недостатки [2]:

1. В обоих случаях необходимо разработать технологические процессы, что при широкой номенклатуре выпускаемых изделий требует больших затрат времени;

2. Методики не дают однозначного ответа и отличаются точностью расчетов, так как даже при известной производственной программе может быть множество вариантов технологических процессов. При широкой номенклатуре выпускаемых изделий стараются снизить объемы работ по разработке технологических процессов за счет того, что расчеты производственной мощности ведутся по изделиям-представителям, а это приводит к ошибкам в расчетах;

3. Данные методики не позволяют определить разнообразие конструкций деталей, которые можно изготовить на имеющихся станках.

Технологические возможности станков предприятия в целом определяются как совокупность технологических возможностей всех станков, поэтому необходимо в первую очередь установить технологические возможности каждого станка.

Определение технологических возможностей станка должно начинаться с установления предмета производства. Под предметом производства на станке понимают совокупность поверхностей детали, которые можно обрабатывать на данном станке. Это может быть одна поверхность или несколько поверхностей детали в зависимости от того, как построен технологический процесс.

Однако недостаточно только перечня изготовляемых поверхностей для оценки технологических возможностей станка. Необходимо также учитывать такие факторы как расположение поверхностей, их взаимосвязи, точность расположения поверхностей. В противном случае может получиться так, что не все детали, имеющие одинаковый перечень поверхностей, но разное их расположение, могут быть изготовлены на станках, предназначенных для изготовления этих поверхностей.

С другой стороны, из-за большого количества вариантов сочетаний поверхностей по составу, расположению, размерным и качественным параметрам возникает неопределенность в установлении перечня данных поверхностей. В паспортных данных станка могут отсутствовать многие значимые показатели, например, может не быть информации о том, какая точность расположения поверхностей может быть достигнута и др. Поэтому, при установлении технологических возможностей станка необходимо определять не поверхности, которые можно обработать на данном станке, а перечень конструкций поверхностей.

При установлении возможных вариантов конструкций поверхностей окажется, что их достаточно большое множество, так как оно определяется не только сочетанием поверхностей, но и их расположением. Для решения данной задачи предлагается в качестве конструкции поверхности принять модуль поверхности, построенный по функциональному признаку. Модуль поверхностей представляет собой сочетание поверхностей (или отдельная поверхность), предназначенных выполнять соответствующую служебную функцию детали и придавать детали конструктивную форму, обусловленную требованиями эксплуатации и изготовления [3]. На рис. 1 представлены некоторые примеры конструктивного оформления модулей поверхностей.

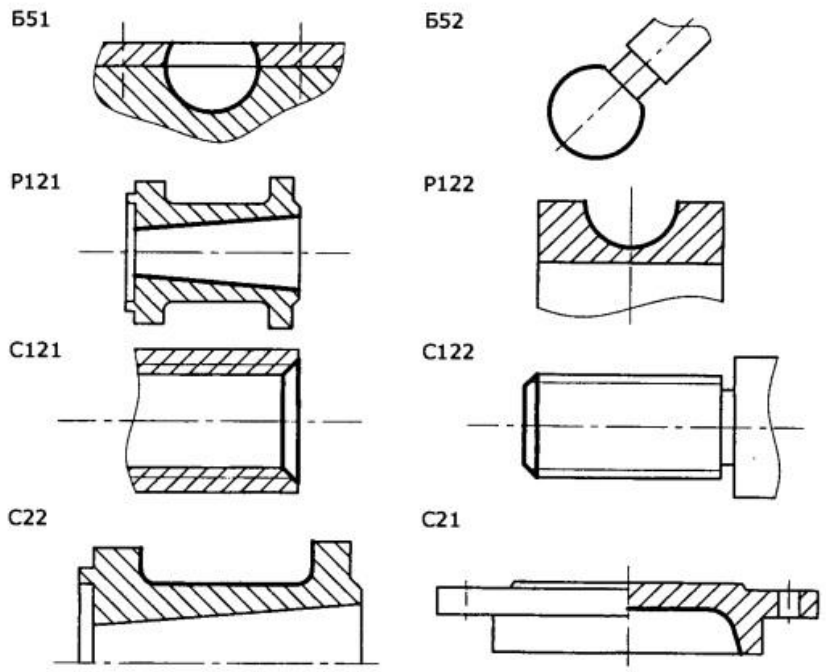

Рис. 1

Таким образом, технологические возможности станка будут определяться перечнем модулей поверхностей, их расположением, размерами, точностью изготовления, шероховатостью. Также при определении технологических возможностей станка следует учитывать модули технологического процесса обработки, трудоемкость изготовления модулей поверхностей, материал детали.

Методика определения технологических возможностей станков основывается на установлении их технических характеристик путем установления связей с характеристиками модулей поверхностей.

В техническую характеристику станка, определяющую изготовляемые на нем модули поверхностей, входят: метод обработки, кинематика рабочих органов, конструкция, точность, габаритные размеры рабочей зоны, рабочий ход, скорость вращения, подача, мощность.

Метод обработки определяет обрабатывающий инструмент и кинематику инструмента и заготовки. Также необходимо знать схему формообразующих движений станка. Формообразующие относительные движения заготовки и инструмента определяются простейшими движениями рабочих органов в системе координат станка: поступательными и вращательными.

Другим определяющим фактором является расположение модуля поверхностей относительно рабочих органов станка. По этому критерию, например, на токарно-винторезных станках в основном можно изготовлять только модули поверхностей, у которых торец расположен перпендикулярно к оси вращения шпинделя, а поверхности вращения соосны с осью шпинделя.

Максимальные габаритные размеры модуля поверхностей определяются размерами рабочей зоны станка и диапазонами перемещения рабочих органов станка.

К параметрам точности модуля поверхностей относятся: точность размеров, форм и расположения поверхностей, а также шероховатость этих поверхностей.

К показателям точности станка, влияющим на точность обработки детали, относятся:

1. Прямолинейность продольного перемещения суппорта в горизонтальной и вертикальной плоскостях относительно оси вращения шпинделя;

2. Осевое биение шпинделя; торцевое биение фланца шпинделя;

3. Радиальное биение оси внутренней центрирующей поверхности шпинделя у торца и на расстоянии от торца и др.

Для определения трудоемкости изготовления модуля поверхностей используется модуль технологической обработки, который устанавливает последовательность переходов, режимы обработки, включая величины снимаемых припусков, время обработки и необходимую технологическую оснастку. Модули поверхностей одной конструкции делятся на группы по размерам и степеням точности. Каждой группе соответствует свой модуль технологической обработки.

Таким образом, для определения технологических возможностей станка определяется совокупность конструкций модулей поверхностей, которые могут быть изготовлены на данном станке, их параметры и модуль технологической обработки.

Список литературы

1. Экономика предприятия: Учебник для вузов. 5-е изд. / Под ред. акад. Семенова В.М. – СПб.: Питер, 2008. – 416 с.: ил.

2. Базров Б.М., Демин А.Б. Определение технологических возможностей станка // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2007. – № 3. – с. 47–50.

3. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.: ил.

Прохоров Алексей Николаевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: P-r-o-l-e-X@yandex.ru.

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

В.К. Шаталов, Т.А. Пороваева

НАНЕСЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ

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

Перспективным направлением оптимизации судового энергооборудования является широкое внедрение в конструкции легких сплавов, в частности титановых. Однако высокий электродный потенциал с естественной оксидной пленкой на поверхности титана обусловливает коррозионное разрушение материалов ответных деталей из алюминиевых и магниевых сплавов, кадмированных и цинкованных сталей.

Наиболее распространенным способом защиты от гальванокоррозии деталей из различных сплавов, работающих совместно с титановыми сплавами, является нанесение устойчивых оксидных покрытий на изделия из титановых сплавов.

К современным, активно развиваемым и находящим все более широкое применение в промышленности, относится электрохимический метод формирования оксидного слоя, отвечающий требованиям прочности судового энергооборудования с учетом эксплуатационных условий и технологии изготовления.

Анодное окисление выполняется в растворе электролитов при высоких потенциалах, вызывающих протекание микроплазменных пробоев на аноде (искрового разряда или микродуги).

Оксидные покрытия, полученные таким способом, по составу и строению близки к оксидной керамике, что обусловливает их более высокую коррозионную стойкость в реакционных средах в сравнении с покрытием, полученным в доискровой области, обладают рядом важных электрофизических свойств, в частности высоким электрическим сопротивлением, коррозионной стойкостью, повышенной твердостью.

Среди множества методов нанесения защитных покрытий наиболее экономически целесообразным является применение неметаллических покрытий. Одним из перспективных способов создания защитных коррозионностойких, с высокими механическими свойствами покрытий на металлах и сплавах является их оксидирование в растворах и расплавах электролитов в режиме электрических разрядов на аноде [1,2].

На практике наибольшую перпективность показало микродуговое оксидирование (МДО). МДО представляет собой электрохимический процесс модификации поверхности вентильных металлов и их сплавов в электролитной плазме с целью получения оксидных слоев (покрытий). Оксиды этих металлов и сплавов получаются электрохимическим путем и обладают униполярной проводимостью в системе металл-оксид-электролит, на-

пример сплавы Al, Mg, Ti, Zr, Nb, Ta и др. [3]. В отличие от традиционного анодирования, когда оксидирование происходит в режиме электрических разрядов на аноде, при МДО, с повышением напряжения искрения переходят в микродуговые и дуговые разряды. Процесс МДО ведут либо при постоянной плотности тока (гальваностатический режим), либо при постоянной разности потенциалов, приложенной к электродам (потенциостатический режим). Применяют также и комбинированные режимы, например режим падающей мощности. Сущность МДО заключается в том, что под действием высокого напряжения, прикладываемого между находящейся в электролите деталью и электродом, на поверхности детали возникают мигрирующие точечные микродуговые разряды, под термическим, плазмохимическим и гидродинамическим воздействием которых поверхностный слой детали перерабатывается в керамическое покрытие, прочно сцепленное с основой.

Покрытия, полученные микродуговым оксидированием, представляют собой керамику сложного состава. Защитная пленка при МДО образуется за счет окисления поверхности металла, при этом формируются оксидные и гидроксидные формы этого металла. С другой стороны, покрытие растет за счет включения в его состав элементов из электролита. Элементы электролита входят в покрытие в виде солей, оксидов и гидроксидов сложного состава (рис. 1). При необходимости технология МДО позволяет ввести в покрытие любой нужный химический элемент. Чем дольше производить обработку, тем больше элементов из электролита накапливается в поверхностном слое [4]. Нижний слой покрытия, прилегающий к металлу-основе, состоит преимущественно из его оксидных соединений.

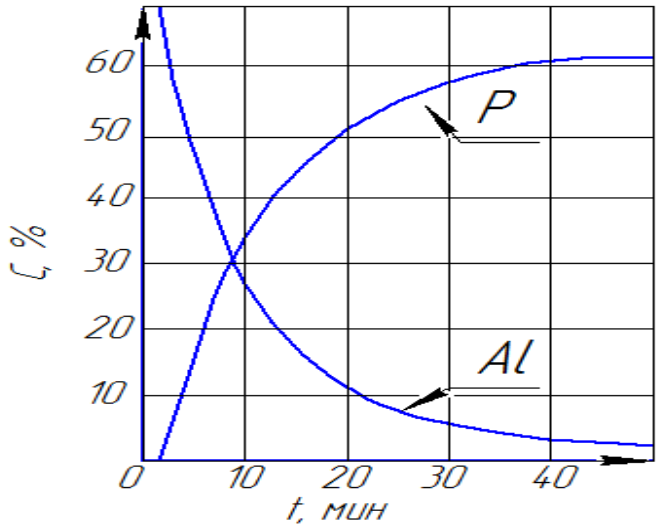

Рис. 1 График изменения содержания алюминия и фосфора на поверхности МДО-покрытия от времени обработки в фосфатном электролите.

Таким способом можно формировать состав покрытия электродов для наплавки на поверхность титановых деталей с целью микролегирования

металла наплавок, для обеспечения требуемых служебных свойств - износостойкости и коррозионной стойкости. Подобная технология разработана в нашем филиале. Количество необходимых технологических операций существенно меньше, чем при традиционных процессах анодирования. Это следует из отсутствия многочисленных подготовительных операций и экологичности применяемых растворов. Схема МДО показано на рис. 2. От источников питания на клеммы ванн подаются импульсы тока определенной формы, при этом деталь выполняет роль анода, в качестве катода служит ванна или дополнительные электроды, как правило, из нержавеющей стали.

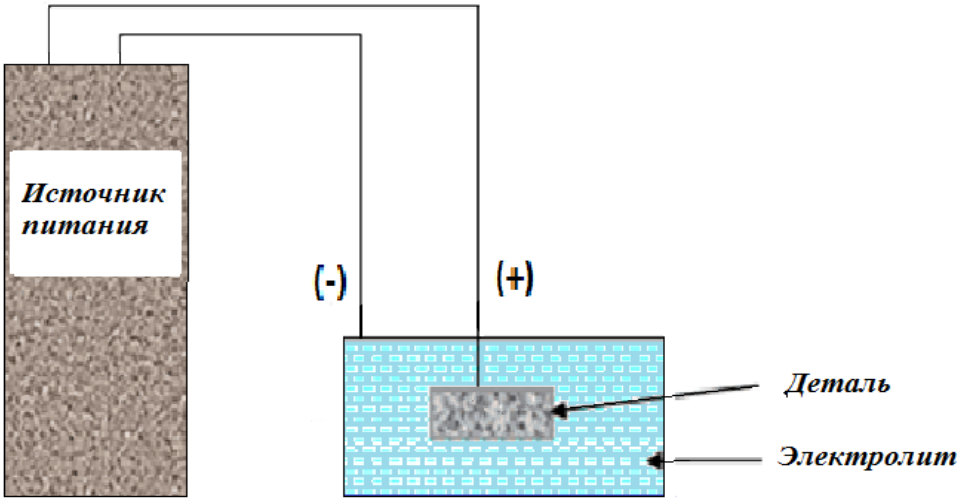

Рис. 2 Схема МДО.

Достоинства метода:

- Возможность создания сверхпрочных покрытий с уникальными характеристиками,
- Получение нескольких защитных характеристик в комплексе,
- Практически бесконечный срок службы электролита,
- Возможность обработки сложнопрофильных деталей,
- Высокая рассеивающая способность электролита (покрытие наносится в отверстия и полости с минимальными затруднениями),
- Нет необходимости в специальной подготовке поверхности перед нанесением покрытия и механообработке после нанесения покрытия,
- Получение разных покрытий на одном материале.

МДО представляет собой качественно новую ступень на пути совершенствования упрочняющей обработки материалов, в процессе которого совмещается плазменный и электрохимический механизмы формирования оксидного слоя. МДО является гибкой и экологически чистой технологией упрочнения поверхностного слоя вентильных металлов и их сплавов в оксидную керамику с уникальным комплексом свойств, позволяющих ис-

пользовать изделие в различных отраслях промышленности. Искусственно полученная оксидная пленка на деталях из титановых сплавов в отличие от естественной не ведет к коррозионному разрушению материалов ответных деталей, контактирующих с титановыми.

В настоящее время идет активное развитие метода МДО, включающее: разработку теоретических основ, совершенствование технологии получения МДО-покрытий с оптимальными характеристиками, создание новых технологических источников питания, расширение областей практического использования.

Список литературы

1.Gruss L.L.,McNeil W. Anodic spark reaction products in aluminate, tungstate and silicate solutions. Electrochem.Technol. 1963. Vol.1. №9. p.283-287.

2. Черненко В.И., Снежко Л.А., Чернова С.Б. Электролиты для формовки керамических покрытий на алюминии в режиме искрового разряда. Защита металлов. 1982. Т.18. №3. с.454— 458.

3. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М.: ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.

4.Шаталов В.К., Лысенко А.Л. Закономерности роста оксидных пленок при микродуговом оксидировании титановых сплавов: Учеб. пособие / Под ред. В.К. Шаталова. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 99 с.

Шаталов Валерий Константинович — д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Технологии обработки материалов» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vkshatalov@yandex.ru.

Пороваева Татьяна Александровна — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Glancet@yandex.ru.

А.А. Мазенков, М.В. Мусохранов

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ ГЛУБОКОМ СВЕРЛЕНИИ

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

Описаны основные проблемы получения глубоких отверстий. Рассмотрено влияние различных факторов на процесс сверления. Перечислены методы повышения точности.

Ключевые слова: *глубокое сверление, точность*

В настоящее время в конструкции многих деталей предусмотрены глубокие отверстия. Они встречаются почти во всех отраслях промышленности: авиастроении, судостроении, энергетическом машиностроении, производстве гидравлических и пневматических устройств и др. Как правило, к таким отверстиям предъявляются высокие требования точности.

Точного определения глубокого отверстия в машиностроении не дано.

Как правило, глубоким считается отверстие, длина которого превышает 7 диаметров. В некоторых источниках рекомендуют использовать методы и инструменты для обработки глубоких отверстия, начиная с длины, равной 4 диаметрам.

Главным признаком глубокого сверления следует считать не отношение длины к диаметру отверстия, а наличие принудительного отвода стружки.

При получении таких отверстий возникает ряд трудностей: сложность подачи СОТС и отвода стружки, снижение жесткости инструмента, возникновение вибраций. В результате возникают дефекты, такие как увод и непрямолинейность оси, огранка, волнистость профиля в продольном сечении.

Образование стружки при глубоком сверлении происходит при несвободном резании в условиях значительного изменения скорости резания по длине режущей кромки, что приводит к образованию нароста на отдельных участках. Нарост, в свою очередь приводит к образованию стружки сложной конфигурации. При глубоком сверлении имеет место стружка двух видов: сливная и дробленая.

Сливная стружка крайне не желательна при глубоком сверлении, т.к. по своей конфигурации она напоминает длинную мятую ленту, которая в любой момент может забить стружкоотводный канал.

Для дробления стружки по длине использую 2 способа: механическое и кинематическое дробление. Основой механического дробления является уступ на передней поверхности инструмента, заточенный вдоль режущей кромки. С помощью уступа стружка изгибается и обламывается, то есть

делится по длине. Кинематическое дробление более сложный способ и требует специального оборудования. Он основан на наложении осевых колебаний на заготовку и инструмент. Амплитуда колебаний выбирается такой, при которой достигается процесс прерывистого резания [1].

Принудительный отвод стружки из зоны резания обеспечивается потоком СОТС. Дробленую стружку выводят во «взвешенном» состоянии, для предотвращения скопления стружки около режущего лезвия. Сливная стружка цепляется своими концами за поверхность инструмента и затрудняется ее отвод. Для решения этой проблемы необходимо создать такой поток СОТС, который будет изгибать стружку и беспрепятственно выводить её по стружкоотводным каналам. Например, при сверлении отверстия диаметром 30мм расход СОТС составляет 90л/мин [2].

Негативным фактором, влияющим на точность отверстия, являются вибрации. На операциях глубокого сверления в системе СПИД возникают колебания двух групп – вынужденные и автоколебания. Инструмент более подвержен возникновению колебаний, так как он является наименее жестким звеном технологической системы. Он подвержен воздействию продольных, поперечных и крутильных колебаний. В настоящее время хорошо изучены крутильные и поперечные колебания. Поперечные колебания вызывают огранку, непрямолинейность оси; крутильные – снижение качества поверхности, преждевременный износ и поломку инструмента.

На величину крутильных колебаний влияют параметры процесса резания и характеристики инструмента.

Диаметр стебля инструмента можно варьировать в очень узких пределах, так как незначительное его увеличение приводит к увеличению давления СОТС и энергозатрат на ее подвод, а уменьшение снижает жесткость и надежность отвода стружки.

В работах [3] приводятся данные по исследованиям влияния параметров инструмента и процесса резания на величину крутильных колебаний. Важным параметром является сечение стебля инструмента. При переходе от сечения 16х3 к сечению 20х3.5 амплитуда крутильных колебаний сокращается почти вдвое, однако при этом давление СОТС возрастает почти в полтора раза.

Из геометрических параметров инструмента наибольшее влияние на величину вибраций оказывает угол в плане φ. Наименьшая величина амплитуды достигается примерно при 23-24 градусах.

Существенное влияние на величину колебаний оказывают скорость резания и подача.

На рис.1 [2] отражены графики зависимости амплитуды колебаний от ско-рости резания для разных величин подачи: а – s_o=0,03мм/об, б – s_o=0,02мм/об,
в - 0,01мм/об. С точки зрения повышения производительности нужно работать с минимальной подачей и максимальной скоростью резания, но

следует иметь в виду, что при скорости резания выше 90 м/мин резко повышается износ инструмента и тепловыделение.

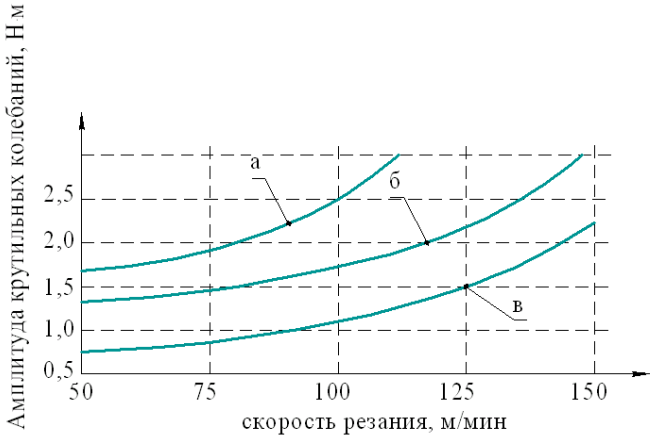

Рис.1

Причинами поперечных колебаний являются: изменение сил резания за один оборот сверла (заготовки); неравномерное воздействие внутренних напряжений; биение обработанного отверстия, на которое базируются направляющие элементы; биение инструмента или заготовки.

Последствиями поперечных колебаний являются увод и непрямолинейность оси отверстия.

На рис.2, а [3] приведены графики зависимости увода оси от диаметра инструмента одностороннего резания для разных схем установки: 1 – деталь неподвижна, сверло вращается; 2 – вращается деталь, сверло неподвижно; 3 – сверло и деталь вращаются в противоположных направлениях; Самой выгодной схемой обработки является схема с одновременным вращением и детали и инструмента в противоположные стороны. На рис.2, б [3] показан график зависимости отклонения оси от диаметра инструмента.

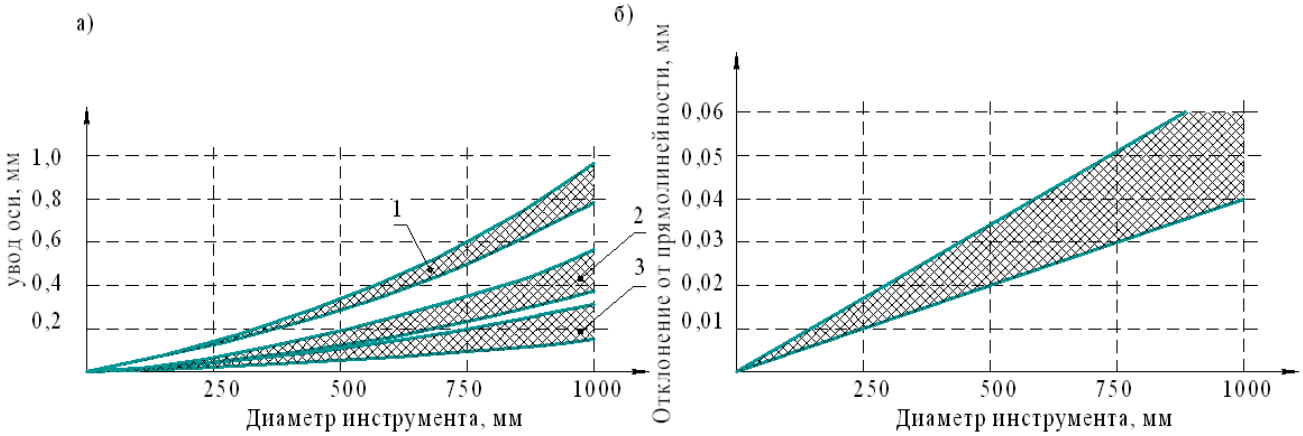

Рис.2

Управлять уводом оси можно, по крайней мере, двумя способами: наложением на инструмент вынужденных поперечных колебаний частотой

вращения заготовки; наложением на заготовку вынужденных поперечных колебаний с частотой вращения заготовки.

Одним из методов наложения вынужденных поперечных колебаний является применение капролоновых опор. Они закрепляются в диаметральном пазу на переднем торце заготовки с разным вылетом. Эти опоры обеспечивают упругую деформацию стебля в пределах диаметрального зазора. Таким образом, при вращении сверла или заготовки создавался эффект наложения колебаний на стебель поперечных колебаний с частотой вращений сверла(заготовки) [3].

Ещё одним дефектом при глубоком сверлении является огранка – вибрационный след, изменяющий форму отверстия.

На величину огранки влияет интенсивность поперечных колебаний и точность заправочного отверстия. Соответственно, для уменьшения огранки необходимо выполнить это отверстие с максимально возможной точностью.

Величину колебаний может снизить правильное расположение направляющих.

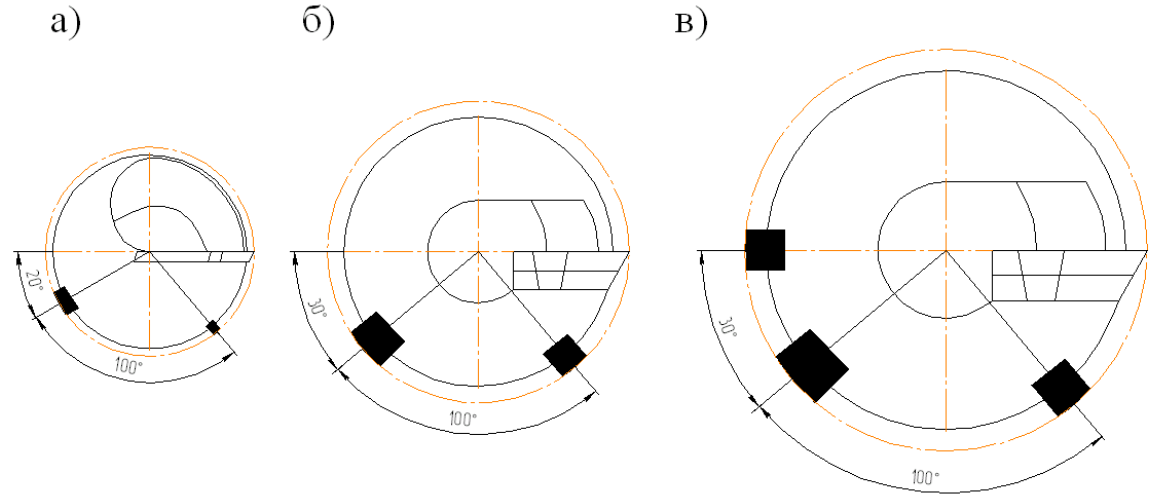

Рис.3

На рис.3 [3] показаны рекомендуемые угловые расположения направляющих для одностороннего инструмента, а – для инструментов диаметром до 30мм; б, в – для инструментов диаметром более 30мм. Опорную направ-ляющую в инструментах диаметром до 30 мм рекомендуется делать широкой. С увеличением диаметра инструмента целесообразно применять две или даже три направляющие.

В настоящее время существует множество инструментов, станков и оснастки для получения отверстий большой глубины. Среди инструментов можно отметить: пушечные, эжекторные сверла, сверла системы BTA. Компания Hammond&Company разработала сверла серии «Ventec» и серии «Speedfeed», которые позволяют обрабатывать отверстия глубиной до 30d.

Среди инновационных методов получения глубоких отверстия можно отметить метод прошивки малых отверстий высокой точности, разработанный компанией SARIX. Данный метод позволяет позволяет получать высокоточные отверстия диаметром 100мкм глубиной до 150мм.

Таким образом, для повышения точности глубокого сверления необходимо: выбрать наибольшее возможное для данных условий сечение стебля инструмента, что обеспечит высокую жесткость; назначить максимально возможную скорость резания и минимальную подачу; выбрать оптимальные значения углов заточки инструмента; расположить направляющие инструмента в соответствии с рекомендациями; обеспечить беспрепятственную подачу СОТС и процесс стружкоотвода; выбрать правильную схему обработки. Для уменьшения увода и непрямолинейности накладываются поперечные колебания, но это требует применение специальной оснастки и оборудования.

Список литературы

1. Звонцов И.Ф., Серебреницкий П.П., Схиртладзе А.Г. *Технологии сверления глубоких отверстий: Учебное пособие.* – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 496с.

2. Кирсанов С.В. и др. *Обработка глубоких отверстий в машиностроении: Справочник*. – М.: Машиностроение, 2010. – 352с.

3. Уткин Н.Ф., Кижняев Ю.И. и др. *Обработка глубоких отверстий.* – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 269с.

4. Daniel de Caussin. *Drilling Deep Holes On A Vertical Machining Center*. URL: http://www.mmsonline.com/articles/drilling-deep-holes-on-a-vmc/ (дата обращения: 10.10.2014).

Мазенков Андрей Александрович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mazenkov123@yandex.ru.

Мусохранов Марсель Владимирович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: marls77@ya.ru.

Н.С. Клюцева, В.В. Калмыков

ОБРАБОТКА КВАДРАТНЫХ ОТВЕРСТИЙ

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

Одной из интересных технологических задач является обработка квадратных отверстий. В данной работе проведен анализ наиболее распространенных способов получения квадратного отверстия. В качестве целевых функций, при проектировании технологического процесса, рассматривалась точность, производительность и качество поверхности. За объект исследования был взят прокат из Стали 20 с габаритными размерами 50×50×25 (рис1). Было спроектировано 5 вариантов технических операций для изготовления сквозного квадратного отверстия сечением 25×25.

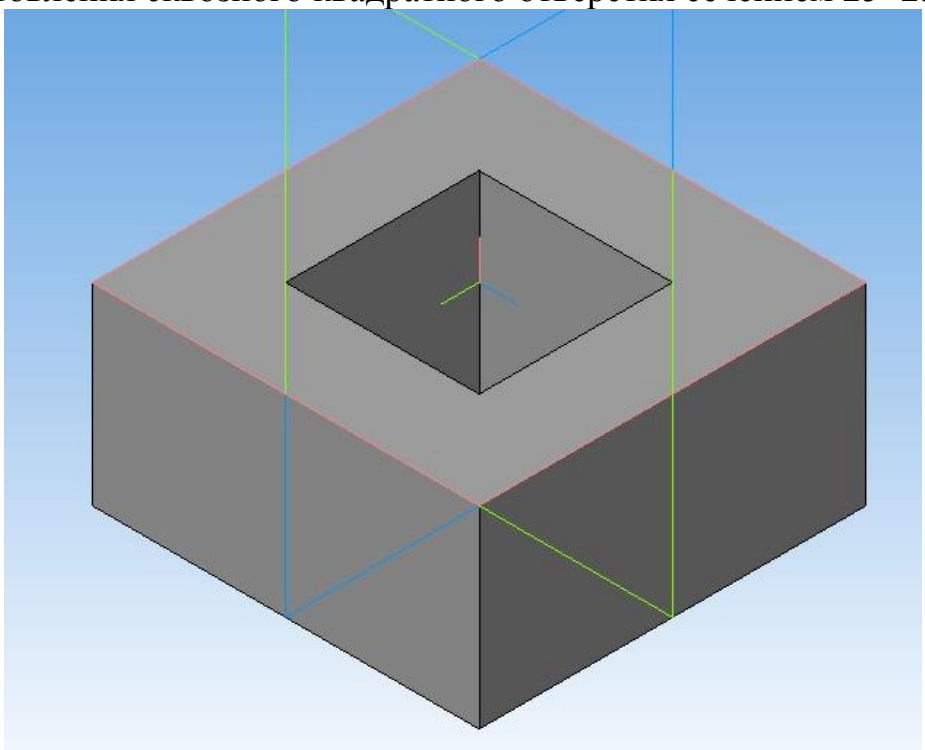

Рис.1. Деталь с квадратным отверстием.

1. Электроэрозионная.

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) широко применяется для изменения размеров металлических изделий - для получения отверстий различной формы, фасонных полостей, профильных канавок и пазов в деталях из твердых сплавов, для упрочнения инструмента, шлифования, резки и др.[1] В качестве электрода используется медная проволока.Стоимость данной проволоки 3000 руб. за катушку. Операция выполнялась на электроэрозионном станкеAP200L для получения данного отверстия.

2. Гидроабразивная.

Гидроабразивная резка – вид обработки материалов резанием, где в качестве режущего инструмента вместо резца используется струя воды или смеси воды и абразивного материала, испускаемая с высокой скоростью и под высоким давлением. В основе технологии гидроабразивной резки лежит принцип эрозионного воздействия смеси высокоскоростной водяной струи и твёрдых абразивных частиц на обрабатываемый материал.[2] Использовался австралийский гранатовый песок, стоимость данного песка 0,5€ за килограмм. Операция выполнялась на гидроабразивном станке Optima 210.

3. Протяжная.

Протягивание – вид обработки металлов резанием, при котором используется специальный режущий инструмент, так называемые протяжки. Применяется для обработки внутренних, либо наружных поверхностей, металлических и неметаллических материалов. [3] Каждая протяжка при своем изготовлении требует очень высокой точности и правильного расчета. И как следствие такой инструмент будет очень дорого стоить. Операция проводила на горизонтально-протяжном станке 7Б55.

4. Сверлильная.

Сверло с сечением в виде треугольника Рёло и режущими кромками, совпадающими с его вершинами, позволяет получать почти квадратные отверстия. Отличие таких отверстий от квадрата состоит лишь в немного скруглённых углах. Патрон, в котором зажато сверло, не должен препятствовать движению - центр при вращении не остаётся на месте, а описывает кривую, состоящую из четырёх дуг эллипсов.[4]

5. Долблежная.

Вид механической обработки металлов долблением, при которой основной инструмент, совершая возвратно-поступательные движения, ведёт обработку заготовки, достигая таким образом требуемого размера. Долбяк представляет собой специально приспособленный и заточенный резец устанавливаемый в резцедержателе долбежной головки. Инструменте совершает частые возвратно-поступательные движения и режущей кромкой срезает стружку на обрабатываемой поверхности материала.[5]. Операция проводилась на долбежномстаноке S200TGI.

При сравнении этих операций данные целевых функций сводилась в таблицу:

Варианты обработки квадратного отверстия

Таблица 1.

Метод обработки	Шероховатость	Точность	Трудоемкость
ЭЭО	Ra2.6 Ra0.4	0.06мм0.04мм	1.5 часа 5 часов
Гидроабразивный	Ra12.5(Ra6.3)*	14	6 мин
Протягивание	Ra12.5…0.8 Ra6.3…0.2	11-10 9-6	30мин – 1час
Сверление	Ra12.5 (Ra6.3)*	14	1-2 мин
Долбление	Rz50…25 Ra12.5…3.2	15, 14 13,12	20-30 мин

*Возможно получить такую шероховатость.

Важный фактор это затраты на инструмент. Протяжка самый дорогой инструмент, однако стоимость распространяется на большое количество на большое количество обработанных деталей.Сопло гидроабразивного станка следующий по стоимости и качество зависит от его износа.Каждая из представленных операций может иметь место на производстве. Предпочтение выбора конкретной операции окончательно зависеть от типа производства или программного выпуска. В крупносерийном следует применять протяжную операцию. В мелкосерийном - гидроабразивную и ЭЭО. С точки зрения обеспечения наивысшей точности - ЭЭО .

Список литературы:

[1] [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ Электроэрозионная_обработка (дата обращения 15.10.2014).

[2] [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ Гидроабразивная_резка (дата обращения 15.10.2014).

[3] [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ Протягивание (дата обращения 15.10.2014).

[4] [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ Треугольник_Рёло (дата обращения 15.10.2014).

[5] [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Долбление (дата обращения 15.10.2014).

Клюцева Нина Сергеевна — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: klyutseva@yandex.ru.

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

Е.Н. Малышев, В.В. Калмыков, Т.А. Пороваева

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАЛАДКИ УНИВЕРСАЛЬНОГО ЗАХВАТНО-ОРИЕНТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

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

Мерой эффективности технологической операции является время, затрачиваемое на изготовление изделия в условиях заданной программы выпуска. Время на изготовление одного изделия называется штучным. При использовании автоматического оборудования штучное время [2]:

$$t_{шт} = t_{оп}(1 + \alpha/ \quad (1)$$

где – оперативное время, а – определяет процентную долю времени технического обслуживания. Для сборочных работ принимают a.

При обработке заготовок партиями определяют подготовительно-заключительное время – , затрачиваемое на подготовку к выполнению технологической операции. В серийном производстве расходуется главным образом на наладку оборудования. Время, затрачиваемое на обработку партии заготовок, будет равно:

$$t_{пар} = t_{п.з} + t_{шт} \cdot \quad (2)$$

где – число заготовок в партии.

В современных машиностроительных предприятиях постоянно стремятся увеличить составляющую высокопроизводительного оборудования. Из формул (1,2) видно, что без сокращения подготовительно-заключительного времени экономический эффект от внедрения такого оборудования может, быть незначительным или даже отсутствовать, а в некоторых случаях это может привести к неоправданным затратам.

В массовом производстве для снижения оснащают автоматикой всю производственную цепочку. На сегодняшний день более 70 % всех машиностроительных предприятий относятся к серийному типу производства и с каждым годом их число непрерывно растет. Автоматизация серийного производства позволяет обеспечить мобильность и гибкость, что обеспечивает конкурентное преимущество среди производителей. Если автоматизация оборудования легко решается применением станков с ЧПУ и промышленный робот-манипулятор может заменить оператора, то автоматизация загрузочных операций, в серийном производстве, затруднена негибкостью загрузочных устройств или автоматов питания. Применяемые автоматические загрузочные устройства в массовом производстве, как правило, ориентированы на один типоразмер заготовок или деталей. Поэтому их использование в многономенклатурном серийном производстве ограничено сложностью или невозможностью их переналадки при изменении номенклатуры загружаемых и ориентируемых заготовок.

В данной работе предлагается путем минимальной доработки преобразовать специальное загрузочное устройство в универсальное, тем самым расширить область его применения до серийного производства. В качестве объекта взяты широко распространенные бункерные загрузочные устройства (БЗУ) с ориентированием заготовок на крючки (рис.1), так как они просты, производительны, надежны и не потребуют серьезных доработок.

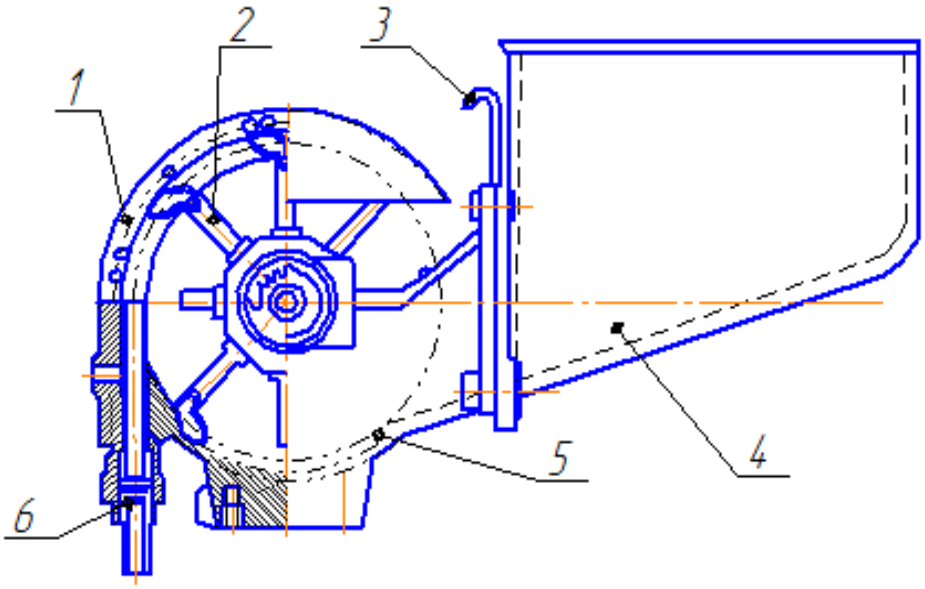

Рис. 1 Бункерное загрузочное устройство (БЗУ) с крючками

Данное БЗУ состоит из: предбункера 4, закрываемого задвижкой 3, в котором сваливаются заготовки, корпуса-механизма 5, где заготовки захватываются крючками 2, закрепленными на вращающемся диске. Захваченные заготовки передаются в приемник 1 в виде трубчатого лотка с разрезом. После этого они поступают в накопитель 6, отводящий их в питатель.

БЗУ с ориентированием заготовок на крючки используются для подачи деталей и заготовок типа «втулки» и «колпачки» (рис.2).

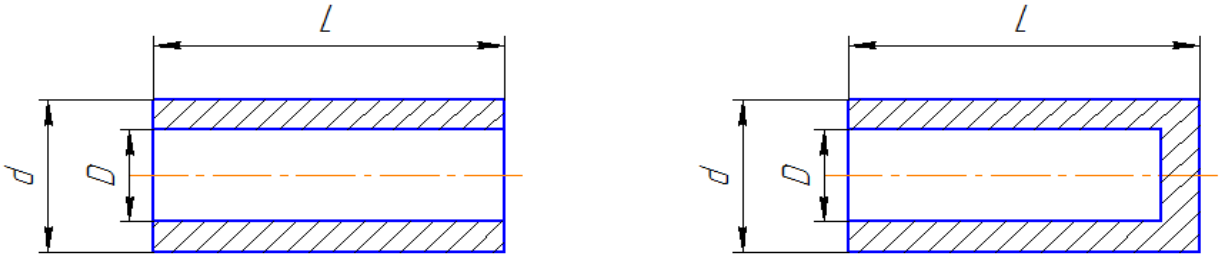

Рис.2 Типы заготовок

Путем незначительного изменения конструкции рассматриваемое БЗУ можно из специального перевести в разряд универсального. Это позволит с помощью одного устройства ориентировать и доставлять заготовки на об-

работку в широком диапазоне типоразмеров. Стандартные БЗУ предназначены для загрузки колпачков или втулок в диапазоне размеров высотой от 10 до 70 мм, с диаметром отверстия от 6 до 8 мм, причем для охвата всего диапазона требуется 13 различных специальных устройств [1]. Использование такого количества оснастки в серийном производстве экономически нецелесообразно. Необходимо разработать такую конструкцию БЗУ, которая позволила бы путем незначительной переналадки охватить весь диапазон загружаемых заготовок. Анализируя схему захвата заготовки крючком (рис. 3), очевидно, что ограничения для расширения диапазона использования связаны с диаметром захватной части крючка и его положением относительно оси ориентируемой заготовки.

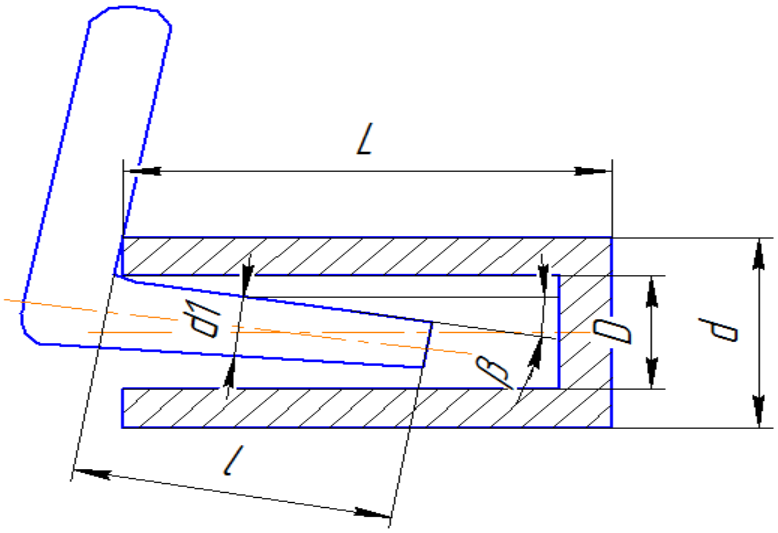

Рис. 3 Схема захвата заготовки крючком

При увеличении длины заготовки, лежащей в дисковом желобе, положение отверстия изменится и крючок, уперевшись в торец стенки колпачка или втулки и не сможет сориентироваться внутри заготовки. Следовательно, изменение вылета колпачка логично выбрать одним из параметров наладки. Однако, в этом случае настраивать вылет крючков придется после незначительного изменения типоразмера заготовок [3]. Для преобразования специального БЗУ в универсальное необходимо чтобы одной наладки хватало на больший диапазон размера ориентируемых заготовок. Для ориентации заготовок с отверстием диаметром 6 мм диаметр крючка назначается величиной 5 мм. [1]

Можно предположить, что крючком с захватной частью такого же диаметра можно ориентировать заготовки и с большим отверстием. Увеличивать диаметр заборной части, исходя из отсутствия изгибающих сил, так как заготовки направляются по желобу, не требуется. В этом случае станут возможны варианты положения крючка относительно отверстия заготовки.

Расчетная схема возможных положений представлена на рис 4.

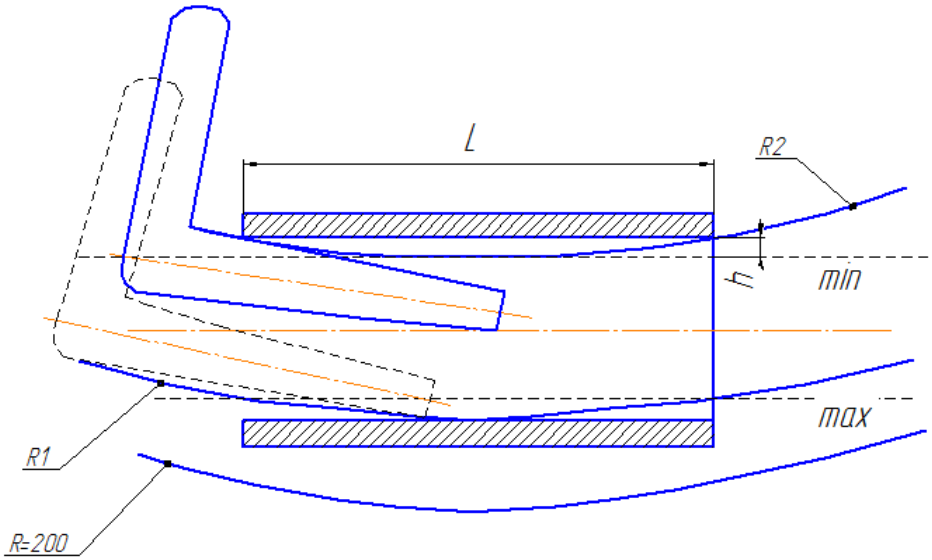

Рис.4 Расчетная схема

Диаметр корпуса механизма (5) также оказывает влияние на интенсивность изменения высоты положения заготовки относительно дна. Чем больше его значение, тем меньше влияние. Однако, увеличение корпуса БЗУ приведет к комплексному изменению конструкции, что противоречит поставленной задаче. В поперечном сечении корпус механизма обеспечивает направление перемещения заготовки для ориентирования в виде желоба с углом . (рис. 5). Изменение этого угла, аналогично радиусу кривизны желоба, влечет изменение степени влияния данного параметра на положение заготовки при изменении ее габаритных размеров.

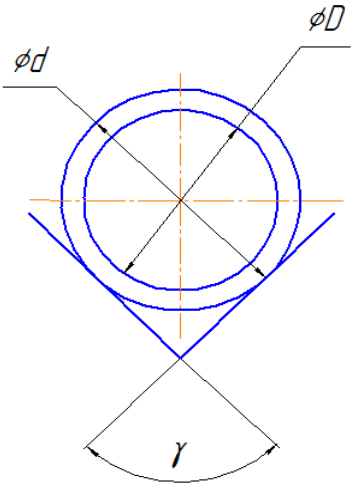

Рис. 5 Поперечное сечение корпуса механизма

Требуется экспериментально установить зависимость положения захватной части крючка относительно отверстия ориентируемых заготовок на надежность, а, как следствие, производительность работы БЗУ.

Эксперимент показал, что статистическая надежность работы БЗУ при изменении захватной части крючка относительно оси ориентируемой за-

готовки меняется в пределах 10 %. Подобное колебание в серийном производстве является незначительным. Исходя из этого, можно сделать вывод о возможности использовать автоматические БЗУ в серийном производстве, внеся незначительные изменение в конструкции, позволяющее менять вылет крючка.

Список литературы

1. Азаров А.С. *Механизация и автоматизация технологических процессов в машиностроении*. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963, 415 с.

2.Бурцев В.М., Васильев А.С., Гемба И.Н., Дальский А.М. *Технология машиностроения. Т. 1: Основы технологии машиностроения.* М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 478 с.

3. Малышев Е.Н., Калмыков В.В. *Переналадка загрузочных устройств гибких сборочных автоматов*. III международный научно-технический семинар «Современные технологии сборки», 2013, с. 68-74.

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

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

Пороваева Татьяна Александровна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Glancet@yandex.ru.

А.В. Барков, М.В.Крюков

ОСОБЕННОСТИ СТАНДАРТИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ.

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

Шероховатость представляет собой совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине. Шероховатость определяет важнейшие эксплуатационные свойства твердого тела. Прежде всего износостойкость, прочность, плотность (герметичность) соединений, химическую стойкость, внешний вид. Для количественной оценки характеристик поверхности используют различные параметры. Каждый из параметров отражает особенность поверхности, представленную числом. Поскольку существует много характеристик и особенностей поверхности, которые необходимо выразить в виде числа, то и число параметров шероховатости тоже велико: существуют стандартизованные и не стандартизованные, национальные и корпоративные параметры, которые описывают большое разнообразие особенностей поверхности и находят применение в производстве.[1,2]

В России основополагающим документом является ГОСТ 2789-73 (с учетом изменения №3 принятого Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 21 от 28.05.2002)), который устанавливает, какие параметры шероховатости поверхности должны применяться в нашей стране при установлении требований в технической документации и на чертежах и при контроле поверхности изделия. Данный стандарт устанавливает шесть параметров шероховатости поверхности для нормирования требований к качеству поверхности на чертежах:

Высотные параметры:

R_a – среднее арифметическое отклонение профиля.

R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам.

R_{max} – наибольшая высота профиля.

Шаговые параметры:

S_m – средний шаг неровностей профиля.

S – средний шаг местных выступов профиля.

t_p – относительнаяя опорная длина проф[4]

Большинство стран Европы и Азии используют стандарты ИСО. Они носят рекомендательный характер и действуют лишь в тех случаях, когда включены в национальные стандарты стран. Стандарты ИСО включают следующие параметры шероховатости:

Высотные параметры:

R_v – максимальная глубина впалины профиля.

R_c – средняя высота элементов профиля.

R_t – полная высота профиля.

Шаговые параметры:

R_{sm} – средняя ширина элементов профиля.

Параметр является наиболее распространенным параметром оценки шероховатости. Он может быть измерен любыми приборами. Но данный параметр не может дать информацию о типе профиля, поэтому часто в дополнение к нему назначаются другие параметры, например:

R_{sk} – асимметричность оцениваемого профиля.

R_{ku} – островершинность оцениваемого профиля.

Шаговый параметр R_{sm} – средняя ширина элементов проф[5]

В стандарты ИСО могут быть включены национальные стандарты. Примером являются французские Motif-параметры (R&W-параметры).[3] Данная группа включает в себя следующие параметры:

Высотные:

R_x – максимальная глубина профиля.

R – средняя глубина профиля.

Шаговые:

AR – средний интервал профиля.

Часто применяют гибридные параметры, которые характеризуют определенное свойство поверхности, например параметры $R_{\Delta q}$ – средний квадратичный наклон оцениваемого профиля – плотность выступов на единицу длины. Данные параметры характеризуют адгезионные свойства поверхности, что важно при покраске.

Соединенные Штаты Америки используют национальный стандарт ASME, который во многом схож со стандартами ИСО. Однако он содержит дополнительные определения и параметры, которых в ИСО нет, и не препятствует применению в Америке европейских и азиатских приборов.Преимущества ASME в том, что он удовлетворяет требованиям как производителей измерительный средств, так и их пользователей. Стандарт ASME включает в себя следующие параметры шероховатости:

Высотные:

R_{pm} – средняя максимальная высота выступа профиля.

P_c – плотность выступов.

Гибридные:

$R_{\Delta a}$ – средний абсолютный наклон.

Несмотря на огромное количество общепринятых параметров шероховатости, существую также специальные фирменные, функциональные и специальные параметры. Примером таких параметров может служить

R_k – семейство параметров, включенных в стандарт ИСО 13565 – 2:1998,
и группа параметров R_{pq}, включенныйх в стандарт ИСО 13565 – 3:1998.

В группу этих стандартов входят следующие параметры:

R_k – глубина сердцевины профиля.

R_{Pk} – высота уменьшенного выступа.

R_{mq} – опорное отношение пересечения плато к впадине.

R_{vq} – наклон линейной регрессии, проходящей через зону впадин.

Эти параметры применяются в основном для описания качества поверхности зеркала цилиндра двигателей внутреннего сгорания.

Еще одним примером отраслевого стандарта могу служить стандарты шероховатости для ультрачистых труб. Чистота поверхностей трубопроводов и соединений при производстве микрочипов является критической и обычных параметров шероховатости недостаточно полно описывают состояние поверхности. Поэтому была разработана серия специальных параметров и методика их измерения. Было введено три новых параметра:

RaCA – среднее значение из nзначений , рассчитанных на пяти отсечках шага.

RaCH–постоянно усредняемое наибольшее значение , измеренное на пяти отсечках шага.

RaCL – постоянно усредняемое наименьшее значение , измеренное на пяти отсечках шага.

Данные параметры и метод их измерения не признан никакими национальными или международными комитетами стандартов, однако учитывая полезность метода, он включен в отраслевой стандарт.

Увеличение числа параметров имеет и негативную сторону. Конструкторам, технологам, контролерам становится все труднее ориентироваться в большом разнообразии параметров и методах их измерений и оценки. Так, например, многие международные компании производят оборудование в одной стране со своим набором стандартов, а используют в другой со своими параметрами поверхности. Большое количество параметров помогает наиболее точно охарактеризовать поверхность и дать заключение о эксплуатационных характеристиках, но, вместе с этим, приводит к трудоемкости оценки и измерения параметров и невозможности изготовления универсальных приборов для международного использования.[2]

Список использованной литературы:

1. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с. С илл.

2. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт/Под ред. Канд. Техн. Наук Н.А. Табачниковой. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2007, 136 с.

3. http://www.digitalsurf.fr/en/guideprofileparameters.html

4. ГОСТ 2789-73 (с учетом изменения №3 принятого Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 21 от 28.05.2002).

5. ISO 4287:1997

Барков Александр Викторович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kryukovmaksimvikt@gmail.com.

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

УДК 53.043

Т.В. Попова, С.П. Сорокин, М.В. Мусохранов

ПОНЯТИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ В МЕТАЛЛАХ

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

В современном машиностроении значительное влияние уделяется качеству изготавливаемых деталей. Развитие науки позволяет рассматривать поверхностный слой на микро и нано уровне.

Под поверхностным слоем следует понимать специфическое кристаллическое твердое тело, обладающее анизотропией физико-механических свойств[1].

Свойства поверхностного слоя влияют на служебное назначение контакта двух и более тел. Возникает необходимость в более глубоком изучении данного влияния.

Процессы, протекающие в поверхностных слоях на микроскопическом уровне: искажение кристаллической решетки, появление вакансий, дислокаций и т.д., являются основой, определяющей поведение материалов на нано уровне в процессе эксплуатации. Появление каждого дефекта влечет за собой соответствующее изменение общего состояния поверхностного слоя, характеризуемого внутренней энергией[2].

С позиции кинетической теории поверхностный слой рассматривается как тело, состоящее из множества структурных составляющих - кинетических единиц, в качестве которых могут приниматься атомы и молекулы вещества[3].

Так как тепловое поле кристаллов на микроуровне не является однородным, в результате случайного взаимодействия отдельные атомы могут приобрести избыточную кинетическую энергию, достаточную для самостоятельного преодоления энергетического барьера и перехода в новое устойчивое состояние.

Поверхностный слой является сложной системой. Уникальность ее состоит в том, что поверхностный слой обладает как свойствами объемного твердого тела, с присущими ему структурой, составом, плотностью, твердостью и т.д., так и свойствами мембраны, являясь посредником между внешней средой и нижележащими слоями тела. Кроме того, поверхностный слой является открытой системой, что обусловлено его способностью пропускать и обменивать через границы раздела энергию и вещество. Как мембрана, поверхностный слой передает через себя тепловые, механические и другие воздействия, испытываемые телом извне, из среды вглубь материала и наоборот. Вместе с тем, как объемное твердое тело, поверхностный слой способен запасать в себе некоторую часть пропускаемой им

энергии в виде тепла и микродефектов, что приводит к образованию специфических диссипативных структур.

Одной из важнейших функций состояния термодинамической системы является внутренняя энергия. Эта функция аддитивна; ее величина определяется суммой энергий, сосредоточенных в массе, а также в излучении вещества системы[4]. В поверхностном слое, не затрагивая уровни ниже атомарного, эта энергия включает потенциальную энергию межатомных взаимодействий, кинетическую (тепловую) энергию атомов, энергию дефектов кристаллической решетки, а также свободную энергию, обусловленную несовершенством кристаллической решетки на границе «металл-среда».

Любое кристаллическое тело обладает внутренней и поверхностной энергией. Работа по перемещению частиц металла в процессе механического воздействия переходит в энергию положения - потенциальную энергию поверхностной частицы. Таким образом, возникает избыток потенциальной энергии поверхностного слоя. Этот избыток энергии, отнесенный к единице поверхности, называется удельной поверхностной или просто поверхностной энергией.

Список литературы

1.МиграновМ.Ш., ШустерЛ.Ш. Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. Москва, Машиностроение, 2005, 200 с.

2. Хает Г.Л. Прочность режущего инструмента. Москва, Машиностроение, 1975, 168 с.

3. Крагельский И.В. Трение и износ. Москва, Машиностроение, 1968, 480 с.

4.Мусохранов М.В. Поверхностная энергия как показатель качества поверхностного слоя.Справочник. Инженерный журнал. 2005, №12, С.62-64.

5. Мусохранов М.В. Роль поверхностной энергии при формировании деталей в прецизионном машиностроении. Сборка в машиностроении, приборостроении. 2005, № 6, С.9-11.

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

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

Мусохранов Марсель Владимирович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: marls77@ya.ru.

Ю.Н. Скорская

ПУТИ ДОСТИЖЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

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

Под эффективностью процесса понимают наилучшее использование, имеющихся ресурсов с тем, чтобы при минимальных затратах произвести максимально возможный объем продукции необходимого качества. В разные годы развивались и использовались методики оценки экономической эффективности технических решений: методика ЮНИДО, Методика-88, методика сравнительной экономической эффективности. Показатели эффективности позволяют определить узкие места технологического процесса.

Экономический эффект достигается совершенствованием техпроцесса, выбором рациональных схем резания, повышением устойчивости резания, стойкости и производительности инструмента, сокращением времени. При выборе схемы обработки обычно сравнивают время резания при одинаковой величине силы. Выбор конкретно технологического процесса осуществляют с использованием многочисленных критериев оптимизации процессов резания [2]. Однако достижение эффективности по одному из критериев оптимизации не обеспечивает эффективность процесса по другим критериям. Ю.М. Ермаковым установлена связь между силовой и стойкостной зависимостями и сформулирован критерий оценки эффективности резания, по которому определен оператор удельной разрешающей силы, позволяющий оценивать способ обработки по минимальной энергии резания при экономической стойкости [1].

Основная доля затрат на обработку обратно пропорциональна стойкости инструмента. Поэтому стойкость является одним из основных показателей, определяющих оптимальные режимы резания. Определение стойкости режущего инструмента является одной из основных задач исследования процесса резания и внедрения новых процессов обработки резанием в производстве. В основу методов определения этой зависимости легли различные технологические и физические критерии, такие как, например, интенсивность изнашивания инструмента, температура и силы резания, качество поверхностного слоя и др.

Все многочисленные научные исследования и производственный опыт по определению зависимости стойкости режущего инструмента от режимов резания можно классифицировать по нескольким направлениям. Однако на сегодняшний день зависимости имеют эмпирический характер и характеризуют только конкретные случаи обработки. Поэтому важно раз-

вивать теоретический подход к обобщению влияния условий резания на стойкость режущего инструмента.

При анализе процесса резания особое внимание уделяется исследованию силы резания. Именно сила определяет работу формообразования, следовательно, и количество выделившейся теплоты, температуру деформируемых слоев, термоЭДС, характеризует механические свойства материала и заготовки, степень их взаимодействия в зоне резания. В свою очередь, любое изменение этих параметров влияет на силу резания. Сила резания является индикатором всего комплекса физико-механических факторов.

При выборе варианта технологического процесса часто применяется графоаналитический метод. Однако Ю.М. Ермаков обосновал целесообразность выбора схемы резания при помощи обобщенного графика зависимостей силы резания и стойкости от скорости резания. Максимальным значениям линейной стойкости, расположенным на изоанабазах, соответствуют минимальные значения силы резания, расположенные на изокатабазах. Произведение линейной стойкости на подачу дает производительность резания, а оптимальное произведение их значений по изолиниям – максимальную производительность резания.

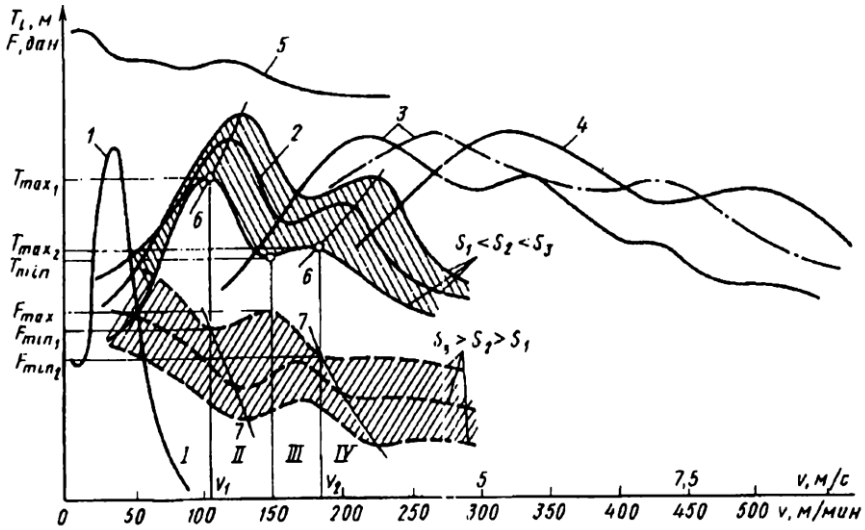

Рис. 1

На рис. 1 приведены типовые зависимости стойкости T (сплошные линии) и силы резания F (штриховые линии) от скорости резания v и подачи S: 1 – быстрорежущая сталь, 2 – твердый сплав, 3 – керамический материал; 4 – композит; 5 – алмаз и СТМ, 6 – изоанабазы стойкости, 7 – изокатабазы силы резания [1]. Сравнение удельных затрат сил и работы резания при различных схемах срезания припуска позволяет выбрать наиболее эффективный способ обработки.

Список литературы

1. *Ермаков Ю.М.* Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.

2. *Базров Б.М.* Модульная технология в машиностроении. М.: Машиностроение, 2001. 368 с.

Скорская Ю.Н. – ст. преп. КФ МГТУ им Н.Э. Баумана E-mail: sun978@yandex.ru.

Е.А. Курлович, М.Н. Чернецова, В.М. Масюк

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТОРСКОЙ ЧАСТИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СКЛАДСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЯЧЕЙКИ

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

В современных логистических системах комплексная автоматизация складов ответственного хранения, промышленных складов и терминалов, распределительных центров играет чрезвычайно важную роль, так как внедрение подобны систем позволяет уменьшить стоимость выполнения складских операций, оптимизировать размещение товара по местам хранения с учетом оборачиваемости товара, удаленности от мест отгрузки, наличия аналогичного товара на складе (уплотнение); маршрут сбора товара оптимизируется по критериям наибольшего освобождения мест хранения с учетом партионности (FIFO), срока годности товара или минимизации накладных расходов или времени выполнения операций.

Целью данной работы является разработка конструкторской части роботизированной складской промышленной ячейки, построение входной системы сортировки товара, исследование алгоритмов управления интеллектуальной роботизированной складской промышленной ячейки. В качестве основной подзадачи построения складской ячейки можно считать исследование и проектирование входного узла контроля и распределения (сортировки). Для этого используется несколько роботизированных манипуляторов, датчиков, исполнительных устройств. Для построения систем логического управления (введения определенной бизнес-логики), необходимо исследовать характеристики системы, обозначить ее реакцию на единичное воздействие, рассчитать цикловые диаграммы работы.

Для проведения исследовательских задач на первом этапе необходимо построить цикловые диаграммы, оценить рабочую область манипуляторов, для чего исследуем систему согласно алгоритму Денавита-Хартенбергадля каждого звена промышленного робота; определимсоотношения для нахождения координат схвата в глобальной системе координат, связанной с основанием и промоделируем полученные результаты.

Для удобства дальнейшего моделирования и визуализации результатов на первом этапе построим 3D модель манипулятора, в дальнейшем модель расширим для всего комплекса (рис. 1).

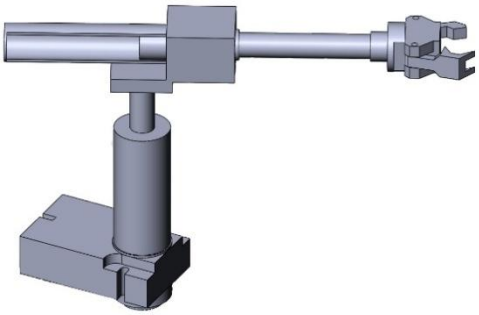

Рис. 1. 3Dмодель робототехнического манипулятора.

Введем систему координат согласно алгоритму Денавита-Хартенберга[1] для каждого звена промышленного робота (рис. 2.):

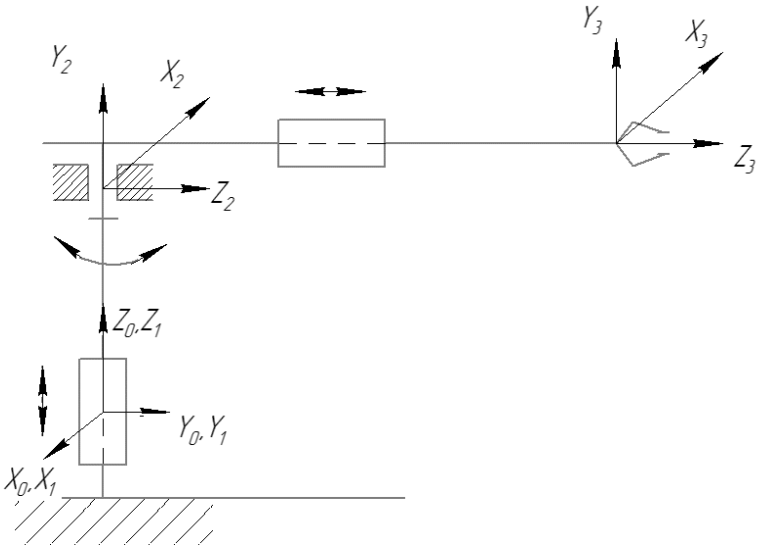

Рис. 2. Система координат согласно алгоритму Денавита-Хартенберга для каждого звена манипулятора.

Определим соотношения для нахождения координат схвата в глобальной системе координат, связанной с основанием.Положение схвата определяется матрицей однородного преобразования:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{p} \\ 000 & 1 \end{pmatrix}, \text{или } \mathbf{T}_4 = \mathbf{A}_1\mathbf{A}_2\mathbf{A}_3 , \qquad (1)$$

где матрицы перехода от системы координат i-го звена к системе координат $(i-1)$-го звена.

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} \cos(q_2) & 0 & \sin(q_2) & 0 \\ \sin(q_2) & 0 & -\cos(q_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 50 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{A}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \qquad (2)$$

В результате умножения матриц получим:

$$\mathbf{T}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(q_2) & 0 & \sin(q_2) & 0 \\ \sin(q_2) & 0 & -\cos(q_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 50 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(q_2) & 0 & \sin(q_2) & q_3 \sin(q_2) \\ \sin(q_2) & 0 & -\cos(q_2) & -q_3 \cos(q_2) \\ 0 & 1 & 0 & 50 + q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Однородный вектор положения $\mathbf{r} = \mathbf{T}_3 \boldsymbol{\rho}$ в базовой системе координат, где $\boldsymbol{\rho}$ - вектор однородных координат точки твердого тела в системе координат $O_3 X_3 Y_3 Z_3$:

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T. \quad (4)$$

Тогда однородный вектор положения:

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} \cos(q_2) & 0 & \sin(q_2) & q_3 \sin(q_2) \\ \sin(q_2) & 0 & -\cos(q_2) & -q_3 \cos(q_2) \\ 0 & 1 & 0 & 50 + q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_3 \sin(q_2) \\ -q_3 \cos(q_2) \\ 50 + q_1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Для моделирование траектории перемещения схвата было разработано приложение в программе Matlab. Результатом его работы являются графики изменения $\mathrm{x}(t)$, $y(t)$, $z(t)$ (рис. 3-5), где указаны траектории перемещения точки схвата по всем трем осям. В качестве примера мы задаем единичное воздействие (подаем питание на пневмоцилиндры) и отслеживаем конечные координаты и время перехода из одного положения в робототехнического манипулятора в другое по концевому датчику обратной связи. Это, в дальнейшем, позволит построить цикловые диаграммы рабаты склада с учетом реальных характеристик манипуляторов.

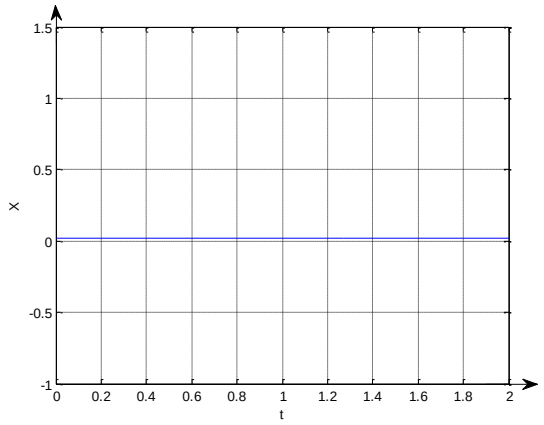

Рис. 3. Траектории перемещения схвата по оси x.

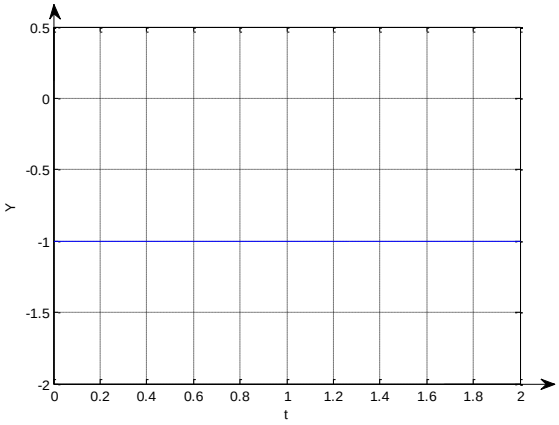

Рис. 4. Траектории перемещения схвата по оси y.

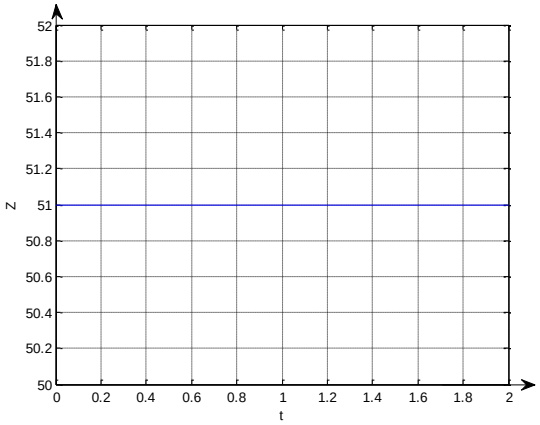

Рис.5. Траектории перемещения схвата по оси z.

Выводы и результаты. В результате расчетов и моделирования решены следующие задачи: получена конструкторская модель робототехнического манипулятора, рассчитаны основные характеристики согласно алгоритму Денавита-Хартенберга и построена его математическая модель, разработан программный продукт в среде Matlab, позволяющий получить значение координат точки схвата в любой момент времени для любого задающего воздействия, написан прошивка для микроконтроллера, позволяющая оценивать динамические характеристики манипулятора и строить цикловые диаграммы.

Список литературы:

[1] Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. *Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами. Учебник для вузов.*– М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана,2000.–400 с., ил.

[2] Козырев Ю.Г. *Устройства управления роботами. Схемотехника и программирование.* М.: Изд-во Предко, 2004, 404с.

[3] Накано Э. *Введение в робототехнику: Пер. с япон*. – М.; Мир, 1988. – 334 с., ил.

[4] Википедия свободная энциклопедия, https://ru.wikipedia.org/wiki/Координаты_схвата(дата обращения 16.10.2014)

Курлович Екатерина Анатольевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: katrin9009@yandex.ru.

Чернецова Мария Николаевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: mashulia_chernecova@mail.ru.

Масюк Владимир Михайлович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Мехатроника и робототехника» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: masyuk77@gmail.com.

Д.М. Беспалов, Е.Н. Малышев

СБОРКА РОТОРОВ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТНЫМ МЕТОДОМ

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

Приводится описание метода сборки роторов, обеспечивающего увеличенную точность балансировки и минимизацию начального дисбаланса. Использование уравновешивающих грузов позволяет минимизировать погрешности предварительной балансировки. Метод позволяет добиться снижения стоимости производства и уменьшения объема работ.

Ключевые слова: *дисбаланс, балансировка, виброустойчивость, коррекция, ротор, эксцентриситет*

При изготовлении сборных роторов, особенно большой массы, метод сборки и дисбаланс устанавливаемых элементов в значительной степени влияют на распределение их дисбалансов [1].

Поскольку распределение дисбалансов в роторе, как правило, случайно, то распределение начального и остаточного дисбалансов вдоль оси однотипных роторов не только не совпадает, но обычно в значительной степени различается. Распределение дисбалансов определяет степень возбуждения различных собственных мод вибрации ротора, так как неуравновешенные силы определяют динамический прогиб ротора [1].

Наиболее предпочтительно такое распределение плоскостей коррекции, которое в точности повторяет распределение локальных дисбалансов по длине ротора, а величина корректирующих масс соответствует величинам дисбалансов [2].

Если плоскости коррекции не совпадают с плоскостями, в которых имеется дисбаланс, это может вызывать вибрацию на частотах вращения, отличных от тех, на которых производили балансировку. При этом уровень вибрации может превосходить допустимое значение, особенно на критических частотах вращения. Исходя из всего вышесказанного, возникают задачи точной и оптимальной балансировки роторов, а также разработки новых методов балансировки.

Для описания дисбалансов ротора и его элементов при балансировке, которая исключает учет сложных массогабаритных и координатных данных, при известной массе Mi удобно пользоваться расчетной характеристикой начального дисбаланса Di устанавливаемого элемента — эксцентриситетом его массы:

$$\varepsilon = \frac{D_i}{M_i}. \qquad (1)$$

Установим элемент 1 на вал ротора 2, а сам вал при этом установим в призмы 3. При установке элемента ротора на вал (рис. 1, а) без взаимного ориентирования эксцентриситета посадочной поверхности В относительно балансировочных поверхностей А, Б на валу, определяющего монтажный дисбаланс Dε и положение начального дисбаланса элемента Dн, происходит сложение дисбалансов (рис. 1, б).

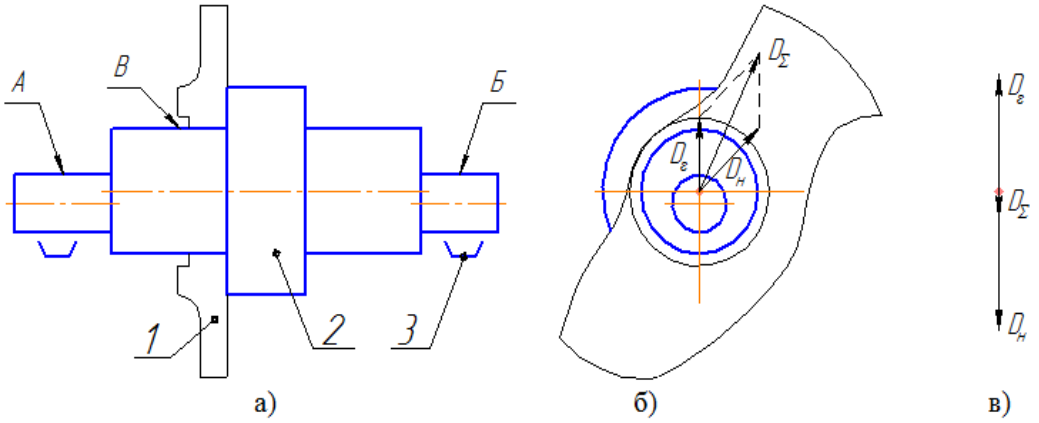

Рис. 1.

Эксцентриситет установки элемента ротора, находящийся в пределах технических требований на изготовление вала, т.е. 10 мкм, создает дисбаланс, сопоставимый с его собственным начальным дисбалансом. Устранение суммарного дисбаланса DΣ достигается путем снятия металла с периферии элемента вручную. Для подобной работы требуется высококвалифицированный специалист, что приводит к росту затрат на производство.

Между тем установка элемента в такое положение, когда эксцентриситет посадочной поверхности диаметрально противоположно развернут с "тяжелой" точкой несбалансированного элемента, обеспечит начальный эксцентриситет его массы порядка 5—10 мкм. Такой способ установки позволяет сократить величину суммарного дисбаланса (рис. 1, в), а также время и объем работ по его коррекции в 3–4 раза.

Определить величину и положение начального дисбаланса ротора можно, опираясь на данные о начальном дисбалансе устанавливаемого элемента и измеренном радиальном биении посадочной поверхности. Направление вектора дисбаланса установки элемента достаточно удобно описывать графически, а векторное суммирование позволит вполне точно описать положение реального начального дисбаланса Dнэ устанавливаемого элемента ротора:

$$\overline{D}_{нэ} = \varepsilon \overline{M}_i + \overline{D}_i. \qquad (2)$$

При сборке ротора взаимное диаметрально противоположное ориентирование эксцентриситета посадочной поверхности и положения начального дисбаланса устанавливаемого элемента обеспечит прирост начального дисбаланса ротора:

$$\Delta D_{нр} = \varepsilon M_i - D_i. \qquad (3)$$

При этом величина начального дисбаланса элемента, измеренная на балансировочном станке с использованием оправки 1 (рис. 2), обладает погрешностью, определенной эксцентриситетом посадочной поверхности В относительно балансировочных поверхностей А, Б. Для обеспечения требуемой точности величину эксцентриситета определяют, используя любой измерительный прибор 2 с ценой деления не более 2 мкм.

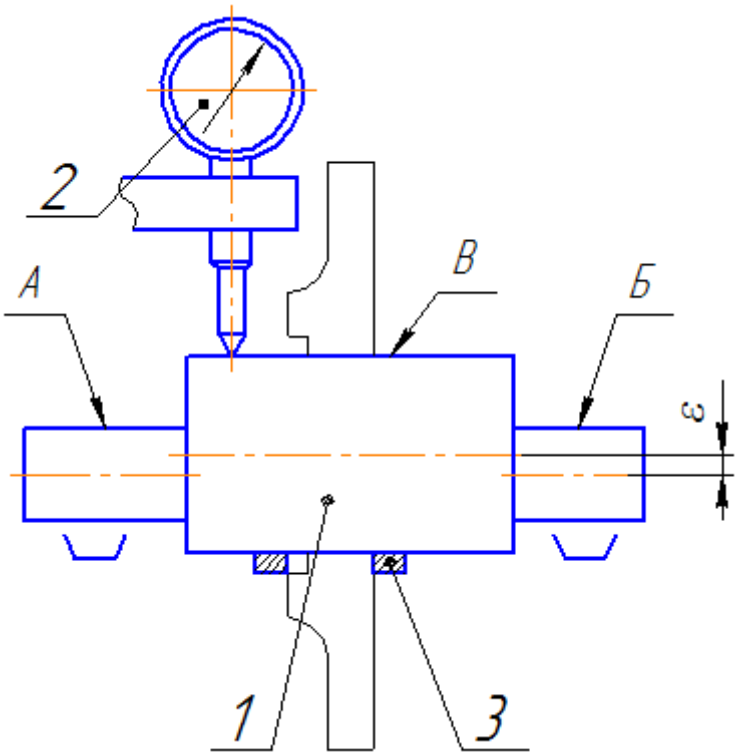

Рис. 2.

При измерении эксцентриситета необходимо вводить поправку дисбаланса на эксцентриситет установки элемента на посадочную поверхность оправки:

$$\Delta D = \varepsilon_{пп} M_i, \tag{4}$$

где εпп – эксцентриситет посадочной поверхности.

Минимизировать эту погрешность можно, используя уравновешивающие грузы 3, которые устанавливают на поверхность В. В этом случае они обеспечивают минимизацию дисбаланса установки элемента ротора, определяемого эксцентриситетом посадочной поверхности элемента на оправке. Данный технологический прием разработан с использованием изобретения [3].

Уравновешивающие грузы устанавливают после определения их массы:

$$m_{\Sigma} = \frac{M_i \varepsilon}{r_{опр}}, \tag{5}$$

где rопр – радиус установки грузов на посадочной поверхности оправки.

На практике удобнее использовать два уравновешивающих груза, устанавливаемых по обе стороны элемента ротора.

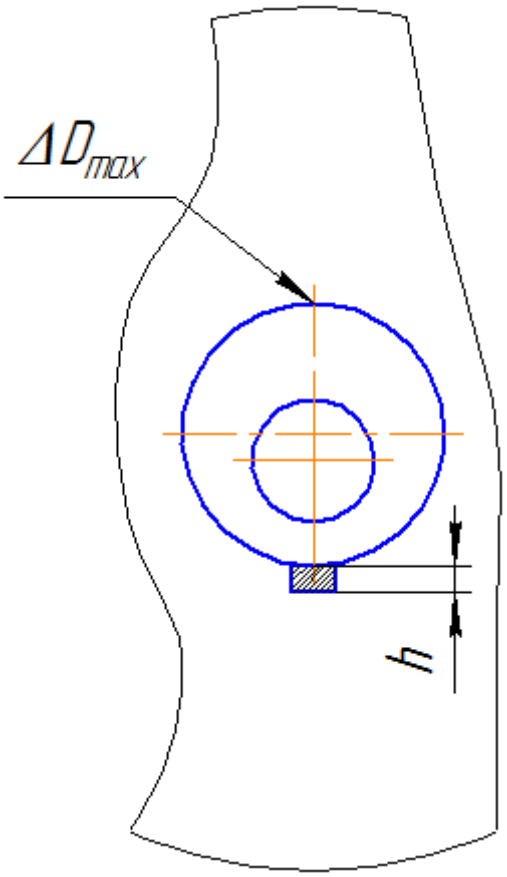

Рис. 3.

Масса каждого груза определяется из следующей формулы:

$$m_{\Sigma} = \frac{M_i \Delta D_{\max}}{2(D+h)}, \qquad (6)$$

где ΔDmax – величина измеренного максимального радиального биения посадочной поверхности;

h – высота уравновешивающего груза;

D – диаметр посадочной поверхности оправки.

Грузы устанавливаются на оправку со стороны, противоположной диаметрально измеренному максимальному биению (рис. 3).

Предложенный метод сборки роторов обеспечивает минимизацию начального дисбаланса, повышение точности балансировки и минимизацию погрешности предварительной балансировки, при этом уменьшаются объем работ и затраты на производство.

Список литературы

1. ГОСТ ИСО 11342—95. Вибрация. Методы и критерии балансировки гибких роторов.

2. Гусаров А.А., Диментберг Ф.М., Шаталов К.Т. Колебания машин. — М.: Машиностроение, 1964. 125 с.

3. Патент РФ № 2372595.

4. Белобородов С. М. Расчетно-эксцентриситетный метод сборки роторов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – №6. – с. 21 – 23.

Беспалов Дмитрий Михайлович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: bespalovjr@gmail.com.

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

И.Ю. Беляев, В.В. Калмыков

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ

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

Рассмотрены факторы, влияющие на точность обработки на станках с ЧПУ, а также специфические погрешности станков с ЧПУ.

Ключевые слова: *станки с ЧПУ, погрешности, точность.*

Конструктивные особенности станков с ЧПУ, специфика проектирования процессов и управляющих программ для них вносят по сравнению с оборудованием с ручным управлением дополнительные погрешности. При обработке на станках с ЧПУ погрешности, связанные с упругими отжатиями технологической системы, несколько меньше (не более 10 % в общем балансе), а погрешности настройки приспособления и инструмента – существенно больше (до 60 %), чем на станках с ручным управлением.

Работая в полуавтоматическом или автоматическом режиме, станок с ЧПУ прежде всего должен обеспечить точность обработки, которая зависит от суммарной погрешности обработки. На нее влияет ряд факторов: точность станка, точность системы управления, погрешность установки заготовки, погрешность наладки инструмента на размер, погрешность изготовления инструмента, размерный износ режущего инструмента, жёсткость технологической системы. Почти все эти погрешности встречаются в станках с ручным управлением, кроме погрешности управления. А погрешность точности станка содержит ряд специфических проявлений.

Все параметры точности обработки на станках с ЧПУ можно разделить на две группы:

- параметры не связанные с точностью отсчета координатных перемещений рабочих органов станка (точность диаметральных размеров и геометрической формы отверстий и т. д.);
- параметры, связанные с точностью отсчета координатных перемещений рабочих органов станка (точность расстояний между поверхностями, точность линейных размеров и т. д.).

В зависимости от точности станки с ЧПУ подразделяются на четыре класса: Н (нормальной точности), П(повышенной точности), В (высокой точности), А(особо высокой точности). Станки классов В и А изготавливают в специальном конструктивном исполнении с высокой точностью ответственных деталей и узлов. Точность станков с ЧПУ характеризую дополнительно следующие специфические проявления: точность линейного позиционирования рабочих органов; величину зоны нечувствительности, и

т. д.; отставание в смещении рабочих органов при смене направления движения; точность возврата рабочих органов в исходное положение; стабильность выхода рабочих органов в заданную точку; точность отработки в режиме круговой интерполяции; стабильность положения инструментов после автоматической смены. При проверках выявляют как точность, так и стабильность, т.е. многократную повторяемость прохода рабочих органов в одно и то же положение, причем зачастую стабильность важнее для достижения точности обработки на станках с ЧПУ, чем сама точность.Для сохранения точности станка в течение длительного времени эксплуатации нормы геометрической точности при изготовлении станка по сравнению с нормативными ужесточают на 40%. Тем самым завод-изготовитель резервирует в новом станке запас на изнашивание.

Погрешностьуправления связана с ошибками интерполятора. Для интерполяторов характерны некоторые отклонения от заданной траектории. Интерполятор системы ЧПУ – это вычислительный блок системы ЧПУ, задающий последовательность управляющих воздействий для перемещения рабочих органов станка по осям координат в соответствии с функциональной связью между координатами опорных точек, заданных программой управления. Отклонение δ зависит от угла наклона траектории к координатным осям и не превышает цены импульса Δ на участке любой протяженности в одну из сторон от заданной траектории или $\pm 0,$ на ограниченном участке в обе стороны от заданной траектории. Станкам первого поколения с дискретной до 0,1 мм и более были присущи значительные погрешности обработки, связанные с работой интерполятора. Геометрическая погрешность интерполяции для современных станков является величиной малой, не оказывающей существенного влияния на точность обработки, но проявляющейся в виде шероховатости обрабатываемой поверхности.

Аппроксимация - процесс замены одной функциональной зависимости другой с определенной степенью точности. При использовании УЧПУ с линейными интерполяторамидля обработки деталей по круговом контуру, при расчете координат опорных точек в процессе подготовки УП применяют аппроксимацию окружностей, что связанно с погрешностью – погрешностью аппроксимации. Путь повышения точности в указанном случае лежит в уменьшении шага аппроксимации поскольку уменьшение дуги в два раза уменьшает погрешность аппроксимации в четыре раза.

Для успешной работы на станках с ЧПУ нужно учесть целый ряд погрешностей, многие из которых встречаются при работе на станках с ручным управлением, а также специфические погрешности, присущие только данному виду станков, которые также оказывают влияние на точность. Только в том случае если все эти погрешности будут учтены, будет достигнута наилучшеекачество изготовлениядеталей.

Список литературы

1. *Гжиров Р.И., Серебреницкий П.П.*Программирование обработки на станках с ЧПУ: Справочник. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990.- 588с.: ил.

2. *Мартинова Л.И., Пушков Р.Л., Козак Н.В., Трофимов Е.С.*Решение задач синхронизации и точного позиционирования осей в системе ЧПУ // Автоматизация в промышленности. – 2011.– № 5.

3. *Сосонкин В.Л.* Программное управление технологическим оборудованием. Учебник для вузов. - М.: Машиностроение, 1991.

4. *Лещенко В.А., Богданов Н. А., Вайнштейн И.В.*Станки с числовым программным управлением (специализированные). - М.: Машиностроение, 1988.

Беляев Игорь Юрьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: justhiigor@yandex.ru.

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

В.В. Калмыков, О.С. Федорова

ФАКТОРЫ, ОБУСЛАВЛИВАЮЩИЕ УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

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

С повышением требований к надежности машин, значительно возросли требования к качеству изготавливаемых деталей.Под действием переменных напряжений деталь накапливает повреждения, что изменяет её свойства, приводит к образованию трещин и разрушению детали. Этот процесс называется усталостью. Способность же материала воспринимать эти напряжения без разрушений называется сопротивлением усталости. Исследования в этой области очень актуальны, так как решение проблемы усталостного разрушения материалов определяет прогресс в повышении надежности конструкций, машин и механизмов.

В настоящее время процесс накопления деформаций и разрушения принято делить на два основных периода: зарождение и распространениетрещин.В свою очередь период зарождения можно разделить на три стадии. (Рис. 1)

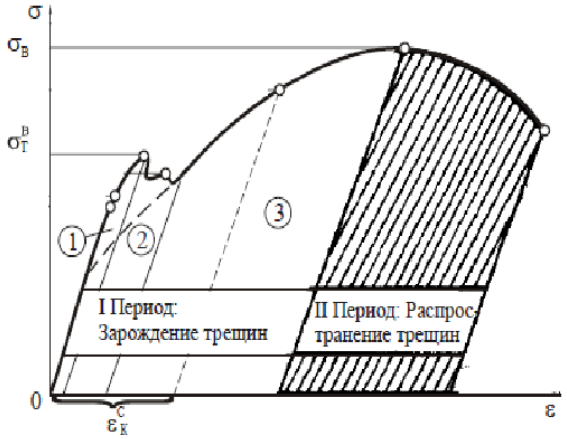

Рис. 1

Первая стадия- стадия микротекучести. Здесь происходит микропластическая деформация металла, в большей степени в приповерхностных слоях глубиной порядка размера зерна.

Вторая стадия- стадия текучести, на которой наблюдается пластическая деформация.

Третья стадия- стадия деформационного упрочнения. На этой стадии впластичных металлах и сплавах интенсивно повышается плотностьдислокацийи формируется дислокационная ячеистая структура, а приопределенном критическом напряжениина поверхности металла появляютсясубмикротрещины размером порядка1-2 мкм.Завершается эта стадия шейкообразованием.

Сложность прогнозирования поведения материалов при нагружении связана с тем, что оно зависит от многих факторов:

1. структурного состояния, термической обработки;
2. состояния поверхностного слоя;
3. температуры и среды испытания;
4. масштабного фактора;
5. частоты нагружения.

Состояния поверхностного слоя оказывает большое влияние, так как усталостное разрушение начинается с поверхности материалов. Это связано с тем, что наиболее интенсивная пластическая деформация при усталости протекает в приповерхностных слоях глубиной порядка размера зерна. Поведение и состояние этого слоя определяет долговечность до зарождения усталостных трещин, и обусловливает уровень предела выносливости, а также уровень порогового коэффициента интенсивности напряжений, необходимого для старта усталостной трещины. Наличие концентраторов напряжений (например, от грубой механической обработки) и других дефектов на поверхности, остаточных напряжений растяжения, агрессивной среды и ряда других факторов приводит к снижению предела выносливости. Поверхностное пластическое деформирование и различные виды химико-термических обработок повышают предел выносливости металлических материалов.

Важнейшим структурным параметром является размер зерна (фактор структурного состояния). В легких сплавах большое влияние, наряду с размером зерна, на сопротивление усталости также оказывает степень рекристаллизации. Чаще всего с уменьшением размера зерна предел выносливости возрастает, однако измельчение структуры металла не всегда приводит к изменению долговечности.

Известно, что шероховатость обработанной поверхности, наклёп и остаточные напряжения в поверхностном слое детали значительно влияют на ее эксплуатационные свойства, такие как: износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность, стабильность посадок, герметичность соединений и др.

Важнейшими эксплуатационными характеристиками деталей машин являются износостойкость и усталостная прочность.

Шероховатость поверхности уменьшает площадь фактического касания двух сопрягаемых поверхностей, поэтому в начальный период работы соединения возникают значительные удельные давления, которые ухудшают условия смазки и, как следствие, вызывают более интенсивное изнашивание поверхностей.

Так как микронеровности поверхности являются местом концентрации напряжений, то более шероховатые поверхности имеют меньшую усталостную прочность в условиях циклической нагрузки. Особенно сильно шероховатость поверхности влияет на предел выносливости детали в мес-

тах концентрации напряжений. Коэффициент концентрации напряжений для поверхностей, обработанных резанием, составляет 1,5 - 2,5. Установлено, что прочность стальных деталей, обработанных резанием, по сравнению с полированными деталями в условиях знакопеременной нагрузки составляет 40 – 50 %

Шероховатость и волнистость поверхности сильно влияют на контактную жесткость стыков сопрягаемых деталей. Уменьшая шероховатость и волнистость путем тонкого шлифования, шабрения или тонкой притирки, удается повысить несущую поверхность детали на 80 - 90% и тем самым повысить контактную жесткость.

Состояние поверхностного слоя детали отражается на ее эксплуатационных свойствах. Установлено, что создание в поверхностном слое наклепа и остаточных напряжений сжатияв большинстве случаев повышает усталостную прочность и износостойкость, но одновременно в 1,5 - 2 раза уменьшает коррозионную стойкость деталей. Последнее обстоятельство объясняется тем, что первичная защитная пленка на сильно деформированном металле легче разрушается под влиянием внутренних напряжений, что ускоряет процесс коррозии. В зависимости от характера наклепа и шероховатости поверхности детали предел усталости у наклепанных образцов благодаря действию сжимающих напряжений повышается на 30 – 80 %, а износостойкость металла – в 2 - 3 раза. Под действием растягивающих напряжений предел усталости для сталей повышенной твердости снижается на 30 % и одновременно уменьшается износостойкость детали.

Опыт автомобилестроительных предприятий Германии показывает, что включение в технологический процесс операций выглаживания позволяет повысить усталостную прочность детали. Особенность такой операции заключается в синергии поверхностно пластической деформации и уменьшения шероховатости, что за одну операцию позволяет увеличить жизнестойкость детали и изделия в целом.

Список литературы

1. Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. *Циклическая прочность металлических материалов*: Учеб. пособие. Новосибирск: Издательство НГТУ,2001.-61с.

2. http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/AKTT/2012/AKTT812/Biblik.pdf

3. http://studopedia.ru/3_175614_vliynie-kachestva-obrabotannoy-poverhnosti-detaley-na-ih-ekspluatatsionnie-svoystva.html

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

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

СЕКЦИЯ 2.

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Н.Н. Максимов, Д.А. Ткачев

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СВАРОЧНОГО КОНТУРА НА ОРИЕНТАЦИЮ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ ПО КРОМКАМ

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

Бурное развитие электропривода на транспорте, в машино- и судостроении требует применения новых конструктивных решений при разработке электродвигателей. Наглядным примером является технология соединения плоских медных полуобмоток торцевого асинхронного двигателя. Замена пайки при соединении контактных площадок на контактную точечную сварку по кромкам даст значительный экономический эффект. Основной сложностью контактной точечной сварки электродами с вольфрамовыми вставками является низкое качество, обусловленное тем, что формирование соединений происходит в твердой фазе в узком диапазоне режимов. Отсутствие систематизированных данных не позволяет решить задачу получения неразъемных соединений без проведения определенных исследований. В данном исследовании рассмотрены вопросы получения сварных соединений деталей из листовой меди контактной точечной сваркой электродами с вольфрамовыми вставками. Описан механизм получения сварного соединения в твердой и жидкой фазе. Произведена оценка влияния электродинамических сил на расплавленный металл в зоне соединения. Доказана невозможность вытекания жидкого металла при совмещении образующей электродов и адиабатических кромок деталей. Показано, что ключевую роль в удержании расплавленного металла играют электродинамические силы, создаваемые токоведущими элементами сварочного контура. Установлено, что для повышения качества соединений, детали при сварке следует ориентировать так, чтобы их адиабатические кромки совмещались с внешней образующей электродов (вставок).

Ключевые слова: *Контактная сварка; электродинамические силы; магнитное поле; жидкая фаза.*

Бурное развитие электропривода на транспорте, в машино- и судостроении требует применения новых конструктивных решений при разработке электродвигателей и другого электрооборудования. Характерным, в этом отношении, является конструкция торцевого асинхронного двигателя с плоской торцевой обмоткой. Такая обмотка изготавливается методом штамповки полуобмоток из листовой меди. С целью получения электриче-

ски замкнутой волновой обмотки две полуобмотки необходимо соединить по контактным площадкам, расположенным на наружной и внутренней образующих.

В КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана разработана технология контактной точечной сварки волновых обмоток торцевых асинхронных двигателей, изготавливаемых методом штамповки из листовой меди толщиной 0,25-0,5 мм.

По данной технологии контактную точечную сварку площадок осуществляют электродами с вольфрамовыми вставками, совмещая кромки деталей с образующими вставок. При этом формируется сварная точка, сочетающая литую зону на кромках с соединением в твердой фазе по остальной площади контакта деталь-деталь (рис.1). По наличию или отсутствию оплавления на кромках судят о качестве сварного соединения.

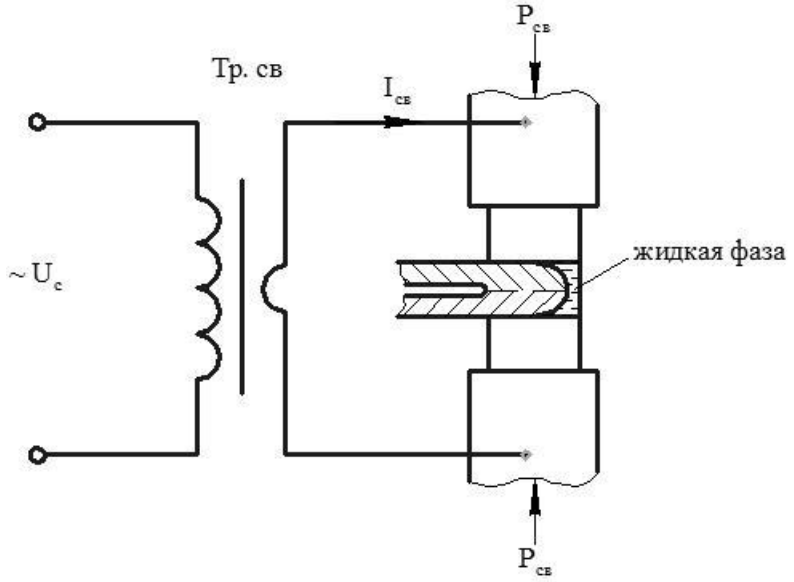

Рис. 1

Наличие жидкой фазы на кромках деталей определяет жесткие требования к выбору параметров режима сварки. При классическом способе контактной точечной сварки жидкая фаза формируется в контакте деталь-деталь и удерживается в зоне соединения уплотняющим пояском деформированного металла в зазоре и твердым материалом деталей между электродами и литым ядром.

В рассматриваемом же случае жидкая фаза сварного соединения формируется непосредственно под вольфрамовыми вставками и на совмещенных (адиабатических) кромках соединения. При этом возникают опасения, что она может быть выдавлена из условного цилиндра металла под электродами за пределы сварного соединения. Выдавливанию жидкой фазы может препятствовать объем твердого нерасплавленного металла в условном цилиндре (рис. 2), а также электродинамические силы вызванные взаимодействием тока, протекающим через зону сварки (F_K) с собствен-

ным магнитным полем. Электродинамические силы ($F_{Т.В.Э.}$), вызванные взаимодействием сварочного тока с результирующим вектором магнитной индукции ($B_{Т.В.Э.}$), наведенным в зоне соединения всеми токоведущими элементами сварочного контура, будут стремиться сместить расплавленный металл из зоны сварки на периферию.

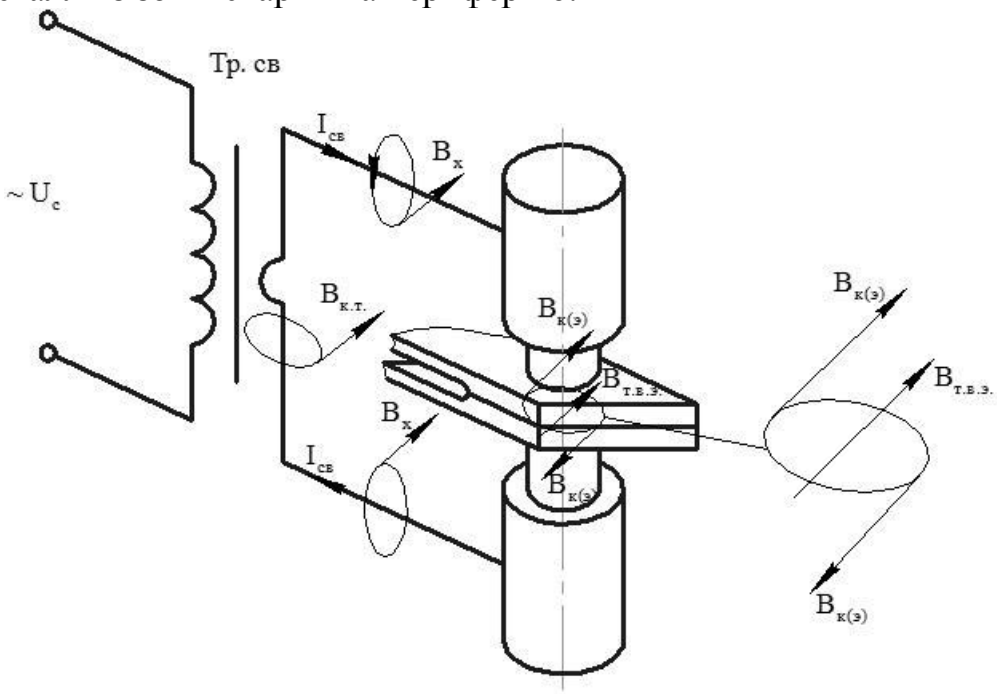

Рис. 2

Из ранее проведенных исследований известно, что радиальнонаправленное сжимающее поле сил F_K на периферии сварной зоны превышает величину поля сил $F_{Т.В.Э.}$, стремящихся сместить жидкую фазу за пределы сварочного контура на два порядка. Однако ассиметричность рассматриваемого соединения (рис. 1) требует более подробного анализа кинетики его формирования. В этом аспекте было бы ошибкой не учитывать влияние поля сил $F_{Т.В.Э.}$ в связи с их малостью.

Так, например, если рассматривать случай предельного теплового состояния когда слой жидкого металла занимает всю площадь контакта электрод-деталь, но анализ проводить не для отдельных единичных объемов (рис. 3а), а для всего объема слоя жидкого металла толщиной Δl в сечении условного цилиндра, проходящего в непосредственной близости к контактам электрод – деталь, то интегральное значение силового поля F_K, рассчитанного по формуле:

$$F_K = \int_0^V B_K j dV \tag{1}$$

будет равно нулю ($\sum F_K = 0$). В то время, как $F_{Т.В.Э.}$ примет вполне определенное значение, зависящее от плотности тока j и объема слоя жидкой фазы V.

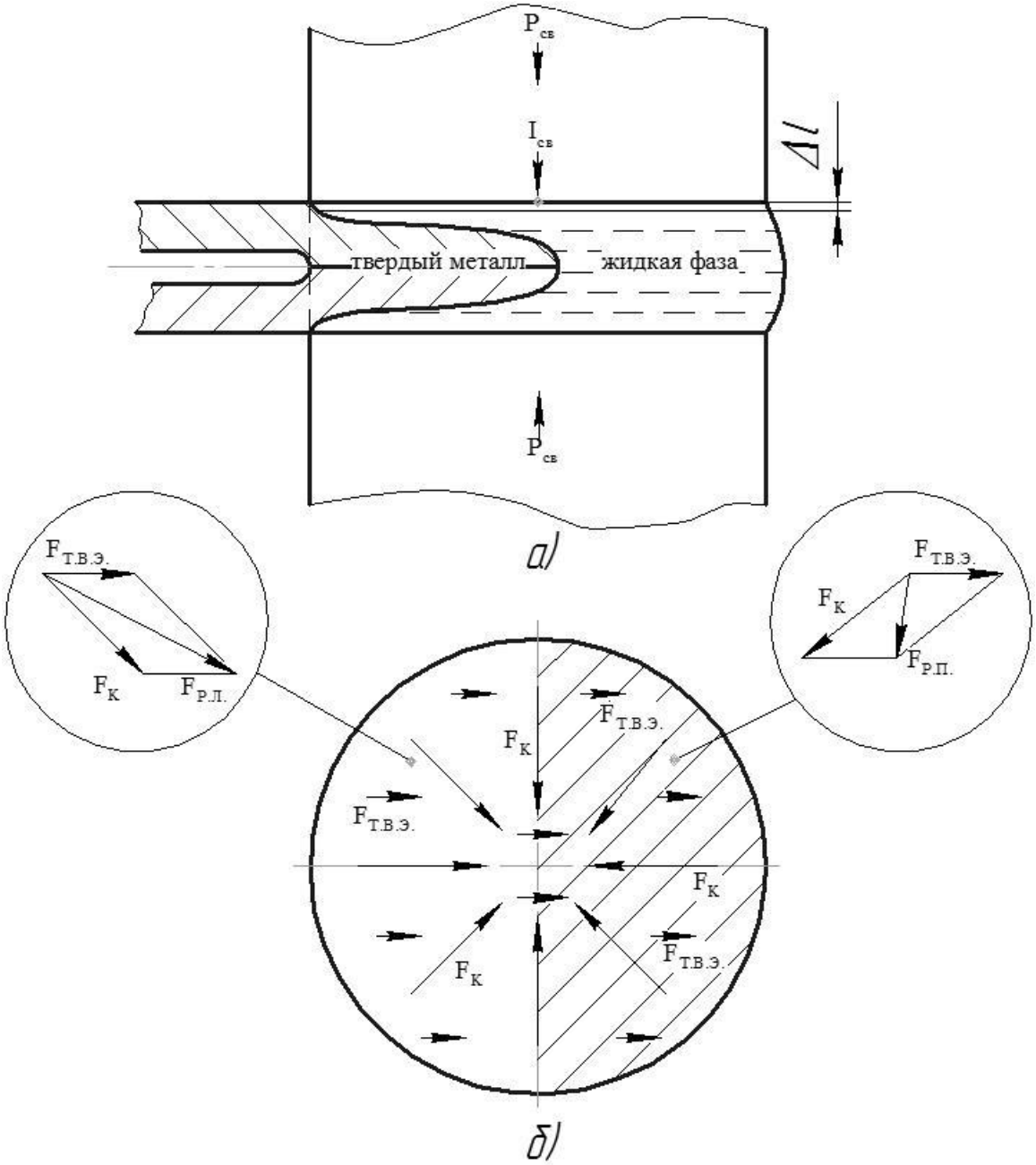

Рис. 3

В реальных условиях сварки тепловое состояние зоны соединения будет отличаться от предельного, в основном, в сторону снижения протяженности изотермы плавления как в контакте электрод – деталь, так и в других сечениях условного цилиндра материала деталей под электродами. В этих условиях интегральное значение величины силы F_K, действующей на объем жидкой фазы, вычисленное по формуле (1) будет отличаться от нуля.

Несимметричность расположения литой зоны соединения в сочетании с особенностями силовых полей рассмотренных электродинамических сил предъявляют определенные требования к ориентации деталей в магнитном поле контура при сварке.

На примере одного из сечений, представленного на рис. 3б, рассмотрим возможные варианты перемещения жидкой фазы в зависимости от ориентации деталей в сварочном контуре. При этом практическое значение имеют два способа ориентации.

Так, в случае совмещения адиабатических кромок деталей с внешней образующей электродов вставок (внешней образующей сварочного контура) в левой, незаштрихованной, полуокружности сечения на рис. 3б значительную часть ее площади занимает твердый, нерасплавившийся металл деталей, на котором не сказывается воздействие электродинамических сил. Результирующая электродинамических сил $F_{Р.Л.}$ будет определяться суммой векторов $F_К$ и $F_{Т.В.Э.}$.

В правой заштрихованной полуокружности, располагается основная масса подвижной жидкой фазы, а результирующая $F_{Р.П..}$ определяется разностью векторов $F_К$ и $F_{Т.В.Э.}$, рис. 3б.

$$F_{Р.Л.} = F_К + F_{Т.В.Э.}, \quad (2)$$

$$F_{Р.П.} = F_К - F_{Т.В.Э.}. \quad (3)$$

То есть для левой и правой областей справедливо неравенство:

$$F_{Р.Л.} > F_{Р.П.}. \quad (4)$$

В противоположенном случае, когда адиабатические кромки деталей совмещаются с внутренней образующей электродов-вставок твердый, нерасплавившийся металл оказывается в правой полуокружности, т.е. со стороны внешней образующей контактов, а направление действия силовых полей и их результирующей не изменяется (рис. 3б). Основная масса подвижной жидкой фазы при этом располагается в области левой полуокружности, где результирующая $F_{Р.Л.}$ определяется суммой векторов (2, 3).

Приведенный выше анализ показывает, что эффект смещения жидкой фазы наиболее значительно должен проявляться при совмещении адиабатических кромок с внутренней образующей электродов-вставок (рис. 4б), и менее заметно – при совмещении кромок с внешней образующей (рис. 4а).

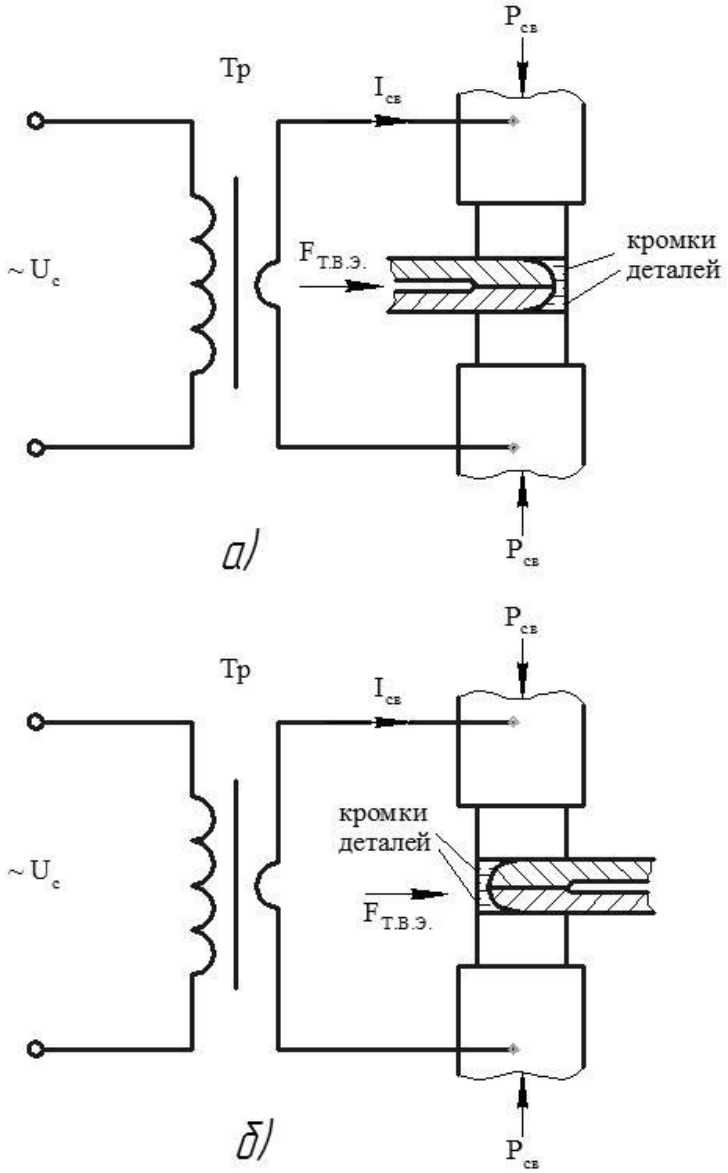

Рис. 4

При развитии процессов плавления, в результате деформирования, жидкая фаза соединения будет выдавливаться из под электродов (вставок) на периферию контактов электрод-деталь.

Со стороны, противоположной адиабатическим кромкам выдавливанию жидкой фазы будет препятствовать деформируемый твердый металл деталей, играющий роль уплотняющего пояска. В других периферийных областях контактов силовое поле F_K будет стремиться прижимать выдавливаемый металл к кромкам электродов в то время, как поле $F_{Т.В.Э.}$ - сместить его на внешнюю сторону (образующую) сварочного контура.

Представляется целесообразным сориентировать детали так, чтобы жидкий металл, выдавливаемый из под электродов, смещался преимущественно на адиабатические кромки. При этом он может несколько увеличить размер литой зоны без соответствующего увеличения тепловложения,

что позволит сохранить достаточный объем твердого нерасплавившегося металла под электродами, препятствующего деформации. Данное обстоятельство должно в значительной мере повысить качество соединений. Для этого детали при сварке необходимо располагать в контуре так, чтобы их совмещенные адиабатические кромки совпадали с внешней образующей (или внешними кромками) электродов-вставок и были нормальны к плоскости, проходящей по осям элементов контура.

Ориентация кромок, в каких либо других доступных направлениях, не позволит эффективно использовать совместное воздействие электродинамических сил и деформационных процессов для повышения прочности соединения (при одинаковом тепловом состоянии во всех сравниваемых случаях). И для достижения такого же объема жидкой фазы на кромках необходимо будет увеличивать нагрев соединения, что приведет к соответствующему снижению объема твердого металла под электродами, увеличению деформации и снижению качества.

Окончательные выводы о влиянии электродинамических сил на кинетику формирования сварной точки, сочетающей соединение в твердой фазе с литой зоной на кромках, можно будет сделать после экспериментальной проверки выдвинутых в данной статье положений.

Все вышеприведенные доказательства были сформулированы при условии строго совпадения каждой из кромок деталей с внешней образующей сварочного контура (или электродов вставок). Однако, в процессе сварки в связи с неточностью установки деталей относительно электродов или самих электродов, могут возникнуть различные отклонения, заключающиеся, чаще всего, в смещении кромок деталей относительно образующей электродов в ту или иную сторону (рис. 5 а, б). Другими словами, кромки могут либо выступать за пределы образующей электродов, такое смещение назовем положительным (a_{CM}), либо утапливаться, назовем его отрицательным ($-a_{CM}$). Где a_{CM} и $-a_{CM}$ - расстояние от внешней или наружной образующей электродов (вставок) до адиабатических совмещенных кромок деталей. И в том и в другом случае изменяются условия формирования соединения. Поэтому требуется оценить, как изменится воздействие полей электродинамических сил на жидкую фазу соединения, т.е. на условия формирования самого соединения, при смещении кромок и различной ориентации деталей относительно внешней или внутренней образующих контура. Для этого необходимо проанализировать возможные изменения плотностей тока и полей электродинамических сил в наиболее распространенных ситуациях.

Рассмотрим случай, когда кромки выступают за пределы образующей на расстояние a_{CM} при их ориентации по внешней образующей контура (рис. 5 а).

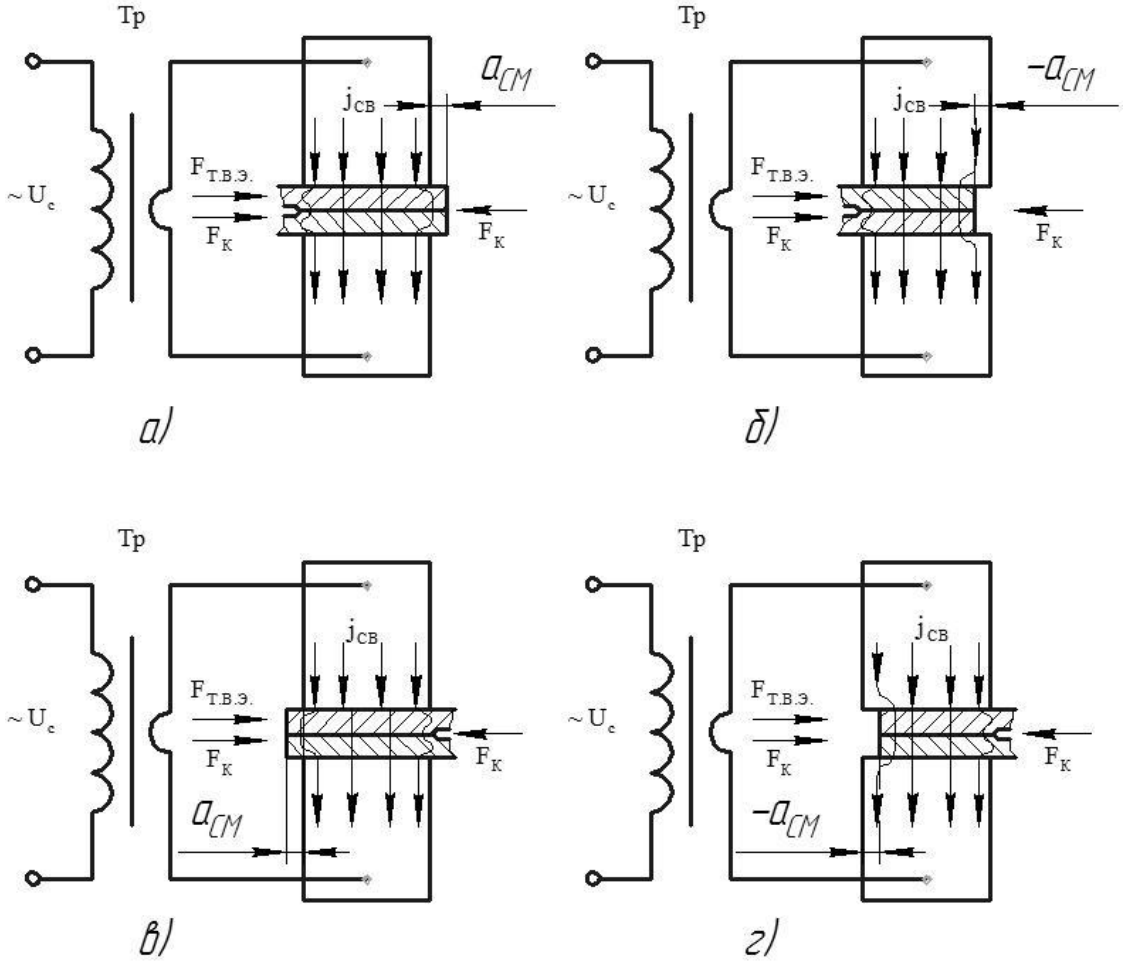

Рис. 5

Опираясь на опыт, полученный при расчете электрических и тепловых полей, можно с достаточной степенью достоверностью сказать, что если величина смещения a_{CM} равна $\frac{2}{3}\delta$, то распределение плотностей токов в осевом сечении будет соответствовать картине, представленной на рис. 5 а. На периферии зоны соединения в области кромок в сечении, прилегающем непосредственно к контактам электрод (вставка) – деталь, за счет искривлений линий тока величина электродинамических радиальносжимающих сил F_K будет в два-четыре раза ниже, чем в случае идеального совмещения (когда $a_{CM} = 0$). Увеличение значения сил F_K за счет некоторого увеличения площади сечения будет скомпенсировано снижением плотности тока за счет растекания линий тока.

Величина поля сил $F_{T.B.Э.}$, стремящихся сместить жидкую фазу на внешнюю сторону контура относительно поля сил F_K в интересующей нас области адиабатических кромок, уменьшится лишь на 25-50%. Такое незначительное отклонение связано с тем, что величина сварочного тока в контуре машины при совмещении деталей останется практически неизменной. Следовательно, неизменной будет и величина результирующего

вектора индукции $B_{Т.В.Э.}$ в зоне соединения. Некоторое уменьшение величины $F_{Т.В.Э.}$ будет вызвано лишь искривлением линий тока (т.е. появлением поперечной составляющей) непосредственно в зоне соединения.

При этих условиях смещающее воздействие поля сил $F_{Т.В.Э.}$ будет проявляться в большей степени, чем в случае строгого совмещения кромок с образующей электродов. В результате следует ожидать более сильного проявления эффекта смещения жидкой фазы из области контактов электрод (вставка) – деталь к адиабатическим кромкам и формирования достаточного объема жидкой фазы, обеспечивающего необходимую прочность соединения, а также условия визуального контроля.

В случае ориентации кромок по внутренней образующей сварочного контура и описанного выше смещения (рис. 5 б) все приведенные доводы остаются справедливы. Разница заключается лишь в том, что жидкая фаза будет перемещаться в противоположенном от кромок направлении. При этом образование достаточного объема жидкой фазы на кромках без перегрева металла в условном цилиндре сверх критической величины будет возможно лишь при очень малых значениях величины смещения $a_{СМ}$.

Рассмотрим случай, когда смещение кромок относительно образующей произошло в противоположенном (отрицательном) направлении (рис. 5 б, г). При этом некоторая часть площади торцов электродов (вставок) зависает и контактирование осуществляется по неполной поверхности.

В результате, как в контактах, так и в любом из сечений условного цилиндра, увеличивается плотность тока, снижается объем металла условного цилиндра. Вследствие этого возникает перегрев в зоне соединения, что неминуемо приведет к изменению оптимальных пропорций между объемами жидкой фазы и твердого нерасплавившегося металла под электродами в сторону уменьшения последнего. Это, в свою очередь, может вызвать увеличение деформации вплоть до сквозной.

Увеличение плотности тока в условном цилиндре металла под электродами будет также способствовать некоторому увеличению радиальносжимающих сил $F_К$. В то же время величина сил $F_{Т.В.Э.}$, стремящихся переместить жидкую фазу в сторону внешней образующей, изменится в гораздо меньшей степени, т.к. величина тока в токоведущих элементах контура останется практически неизменной.

Искривление линий тока в электродах (вставках) за счет эффекта усечения площади контактов приведет к увеличению электродинамических сил отталкивания.

Совокупность воздействия этих сил с радиальносжимающими силами $F_К$ будет способствовать противодействию деформации в процессе протекания сварочного тока и может несколько скомпенсировать отрицательное воздействие от ошибки смещения.

Очевидно, при условии, что величина отрицательного смещения оказалась достаточно малой и не произошло сквозной деформации деталей, ориентация кромок по наружной или внутренней образующей не обеспечивает каких-либо существенных преимуществ в процессе формирования соединения за исключением некоторого незначительного увеличения объема жидкой фазы на кромках в случае их ориентации по внешней образующей сварочного контура.

Рассмотренные варианты показывают, что при ориентации деталей по внешней образующей электродов (вставок) в случае положительного смещения кромок может происходить некоторая компенсация ошибки неправильной установки деталей. В случае отрицательного смещения такая ориентация также может позволять получить некоторые преимущества, проявляющиеся в несколько увеличенном объеме жидкой фазы на кромках.

В то время как при ориентации деталей по внутренней образующей, с случаях положительного или отрицательного смещения, ошибки от неточной установки могут лишь усугубить отрицательные последствия и затруднить формирование оптимального объема жидкой фазы соединения.

Для адаптации полученных в работе к конкретным технологическим процессам, необходимо провести экспериментальные исследования и выявить зависимость между протяженностью оплавления кромок и прочностью соединения, а так же протяженность оплавления в зависимости от ориентации деталей в сварочном контуре статистическими методами.

Влияние магнитного поля на жидкий металл сварочной ванны или жидкую фазу соединения при контактной сварке описано в работах [2, 3]. Представленные результаты согласуются с известными данными и дополняют исследования в части особенности сварной точки, сочетающей литую зону в области кромок с соединением в твердой фазе по остальной площади контакта деталь – деталь.

Выводы. 1. Проведенный анализ подтвердил возможность существенного влияния магнитного поля на процесс формирования рассматриваемого соединения. Это связано с особенностями соединения, заключающимися в наличии некоторого объема жидкого металла непосредственно под электродами (вставками) и в области кромок. Показано, что жидкая фаза испытывает на себе влияние электродинамических сил как подвижный проводник с током в магнитном поле.

2. Применение графоаналитического метода позволило выразить результирующий вектор индукции ($B_{Т.В.Э.}$), токоведущими элементами, через величину сварочного тока I, раствор H и вылет L сварочного контура и вычислить его значение.

Расчет составляющих магнитного поля позволил определить величину и распределение полей электродинамических сил в зоне соединения и сделать важный вывод о том, что при сварке соединений с формированием жидкой фазы на кромках деталей, совмещенных с образующей электродов,

нет оснований для возникающих ранее опасений о возможности срыва жидкой фазы за пределы соединения, т.к. величина радиальных сжимающих сил (F_K), на периферии соединения в области формирования жидкой фазы, на два порядка превышает величину сил ($F_{Т.В.Э.}$), стремящихся сместить жидкую фазу за пределы внешней образующей контура.

3. Несимметричность сварной точки, сочетающей соединение в твердой фазе с литой зоной на кромках, требует учета воздействия электродинамических сил, стремящихся сместить жидкую фазу ($F_{Т.В.Э.}$), при ориентации деталей в сварочном контуре.

Установлено, что для повышения технологичности процесса и качества соединений, при сварке детали следует ориентировать так, чтобы их адиабатические кромки совмещались с внешней образующей электродов (вставок). При этом, без увеличения тепловложения и деформации соединения, используя совместные процессы деформирования и смещения выдавливаемого из под электродов жидкого металла на внешнюю образующую контура, т.е. на расплавленные кромки, можно несколько увеличить объем жидкой фазы, что должно повысить качество соединения.

Такая ориентация деталей будет способствовать повышению устойчивости процесса формирования литой зоны в случае смещения кромок деталей относительно образующей электродов (вставок) при их установке и сварке.

Список литературы

1. Брон О. Б. К вопросу об электродинамических силах в контактах // Электротехника. – 1965.-№1.-С. 21-23.

2. Кочергин К. А. Сварка давлением.-М.: Машиностроение, 1972.-216 с.

3. Попов В. А. Влияние магнитного поля на формирование соединения при контактной точечной сварке // Сварочное производство. – 1992.-№10.-С. 28-29.

4. Решетников В. Е. Разрывающие силы сварившихся контактов // Электротехника. – 1968.-№4.-С. 35-38.

5. Решетников В. Е. Расчет электродинамических сил в контактах // Электротехника. – 1963.-№10.-С. 33-36.

6. Справочник по расчету и конструированию контактных частей сильноточных электрических аппаратов / Под ред. Н. М. Адоньева, В. В. Афанасьева.- М.: 1989.- 256с.

7. Таев И. С. Электрические аппараты. Общая теория. – М.: Энергия, 1977. – С. 263-268.

8. Теория электрических аппаратов / Под ред. Г. Н. Александрова. – М.: Высшая школа, 1985. – С. 46-67.

Максимов Николай Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры "Технологии сварки" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: paramonov231992@mail.ru.

Ткачев Дмитрий Анатольевич – ассистент кафедры "Технологии сварки" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tkachoff88@mail.ru.

N.N. Maximov, D.A. Tkachev

INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD OF THE WELDING CIRCUIT ON THE ORIENTATION PARTS IN SPOT WELDING AT THE EDGES

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

The rapid development of electric transport, engineering and shipbuilding requires new design solutions in the design of electric motors. A good example is the welding technology of flat copper halfwindings of frontal induction motor. Replacement soldering connection contact pads on the resistance spot welding on edges will give a significant economic effect. The main difficulty of spot welding by electrodes with tungsten inserts is of poor quality due to the fact that the formation of weld in the solid phase occurs in a narrow range of conditions. Lack of systematic data does not allow to solve the problem of obtaining permanent connections without a defined studies. The problems of obtaining welded joints of copper sheet by resistance spot welding by electrodes with tungsten inserts were examined. The impossibility of escaping liquid metal when combined forming surfaces of electrodes and adiabatic edge parts was proved. It has been shown that a key role in maintaining the molten metal the electrodynamics forces generated by conductive elements of the welding circuit play. Found that for improving the quality of connections, welding parts should be oriented so that their edges align with the adiabatic outer forming electrodes (inserts).

Keywords: *Spot welding; electrodynamic forces; magnetic field; the liquid phase.*

Maximov Nikolai Nikolayevich – ph. D., assoc. Professor of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: paramonov231992@mail.ru.

Tkachev Dmitriy Anatolyevich – assistant lecturer of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: tkachoff88@mail.ru.

УДК 631.924.093

А.Г. Орлик, К.В. Зайцев

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ СЛОЁВ

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

Композиционные металлокерамические покрытия на основе металлов группы железа и тугоплавких фаз применяют для нагруженных деталей, которые одновременно подвергаются действию умеренных ударов, например: спусковые лотки гравийных и песчаных карьеров, транспортирующие шнеки.

В настоящее время для защиты от абразивного изнашивания и коррозионных повреждений применяют композиционные покрытия из класса так называемых «твердых металлов», состоящие из дефицитных компонентов. Сплавы на железной основе в качестве матрицы не применяются, так как растворимость и смачиваемость кобальтом частиц вольфрама весьма ограниченна.

Возможные варианты нанесения покрытий относятся к металлургическим методам, когда формирование в структуре покрытий компонентов наноразмерного масштаба определяется исходным шихтовым составом применяемых для нанесения покрытия материалов, тепловыми условиями и межфазным взаимодействием в процессе нанесения и последующей термической обработки покрытий.

Общим недостатком методов напыления, даже при условии проведения последующих термомеханических обработок, является недостаточная прочность связи на поверхности раздела «покрытие/подложка», не позволяющая реализовывать полностью влияние твердых компонентов на износостойкость покрытий. Лучшим решением может быть наплавка износостойких покрытий – дуговая, плазменная, лазерная - при условии подбора оптимальных композиций наплавляемых материалов и термического цикла процесса. Важным вопросом остается и определение оптимального размера высокопрочных фаз в покрытиях, подвергаемых абразивному изнашиванию. Согласно [1] размер таких частиц должен быть соизмерим с размером частиц абразивов, то есть составлять десятки и более микрон, если ориентироваться на абразивы из минерального сырья.

Для получения композиционных покрытий на железной основе с высокой износостойкостью необходимо выполнение следующих условий:

1. Армирующие фазы, определяющие стойкость против абразивного изнашивания, должны иметь максимальную твердость;

2. Размер армирующих фаз должен быть согласован с размером частиц абразива;

3. Матрица композиционных покрытий должна быть пластичной и одновременно высокопрочной, что достигается методами наноструктурирования;

4. Для обеспечения высокой адгезии по межфазным границам матрица должна иметь минимальное несоответствие решёток с армирующим наполнителем. Следовательно, предпочтительны методы когда при формирование композиционной структуры покрытия наполнитель формируется в процессе

нанесения покрытия.

5. Для реализации в покрытии свойств твердых фаз, обеспечивающих сопротивление абразии, прочность по границе раздела покрытие/подложка должна быть не ниже прочности материала подложки, что достигается методами наплавки покрытий с эпитаксией при кристаллизации.

6. Стоимость покрытий и способов их нанесения должна быть снижена посравнению со стоимостью покрытий класса «твёрдых металлов», то есть

стратегия в создании покрытий должна быть нацелена на повышения

показателя «свойства/цена».

Исследования структуры и свойств покрытия производилось на примере шнека (рис.1), работающего в условиях гидроабразивного износа.

Рис.1, Внешний вид шнека.

В базовой технологии наплавка реборды шнека производилась электродами Т-590 на постоянном токе прямой полярности. При этом твёр-

дость наплавленного слоя составляла 56 HRC. Химический состав шва наплавленного метла представлен в таблице№1.

Таблица№1

Химический состав металла наплавленного электродами Т-590 (Э-320Х25С25Р) %:

C	Si	Mn	B	Cr	Ti	S	P
2.9-3.5	2.0-2.5	1.0-1.5	0.5-1.5	22-24	0.5-1.5	<=0,035	<=0,040

С целью снижения, при изготовлении покрытия расхода дефицитных карбида вольфрама и кобальта, предлагается использовать для дуговой полуавтоматической наплавки использовать проволоку DO*390N, позволяющую получить требуемую твёрдость и износостойксть, соизмеримую со стойкостью твёрдых материалов.

Проволока имеет диаметр 1,6 мм и оболочку толщиной 0,2 мм. Состав наплавленного проволокой металла по данным изготовителя [2] при использовании смеси газа 98%Ar + 2% CO_2 позволяет получить твёрдость наплавленного слоя 71HRC. Дуговую наплавку износостойкого покрытия производили на установке фирмы «Fronius», оборудованного источником питания TPS-2700 со встроенными четырьмя подающими роликами для порошковой проволоки. Для механизированного перемещения образца используется манипулятор, позволяющий регулировать скорость в диапазоне от 10 до 150 м/ч.

С целью подбора оптимальных параметров режима наплавки, для обеспечения требуемых свойств наплавленного слоя, была произведена экспериментальная наплавка на Ст3, толщиной 8мм. В качестве защитного газа использовались сварочные смеси 98%Ar + 2%CO_2 и 80%Ar + 20%CO_2.

Для металлографических исследований и механических испытаний была подготовлена серия образцов с валиками, наплавленными на Ст3. Производилась наплавка образцов за один проход, с применением колебательной головки, для обеспечения наплавки определённой ширины и с принудительным охлаждением образца.

Применение сварочной смеси 98%Ar+2%CO_2 позволило снизить разбрызгивание и увеличить поверхностное натяжение, что привело к уменьшению значение краевых углов между поверхностью подложки и профилем наплавки до $\varphi < 90^0$.

При визуальном осмотре выявлены поперечные трещины которые проходят по всему сечению наплавленного металла, но не проникают в материал подложки (рис 3).

Рис.3. Внешний вид наплавленного валика на Ст3.

Наличие макротрещин в покрытии было отмечено также изготовителем проволоки при описании особенностей формирования покрытия. Вероятнее всего, они возникают в процессе релаксации сварочных напряжений. Полагают, что покрытие с микротрещинами сохраняет высокую износостойкость, но рекомендуется для эксплуатации только при умеренных ударных нагрузках [2].

Список литературы.

1. K.S. Al-Rubaie et al/ Three-body abrasion of Al-SiC-composites. Wear, 1999,225-229,p.p. 163-173/

2. Castolin Eutectic, Flux-cored Wire EnDOtec DO*390, Test Report EN 10204-2.2, 1672/2007

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

Зайцев Кирилл Владимирович – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: a.g.orlik@yandex.ru.

УДК 599.722

Г.В. Орлик, А.А. Гордеев, А.С. Буркевич

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ МОНТАЖА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

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

Магистральный газопровод – это комплекс сооружений, который в большей степени состоит из сваренных труб различного диаметра, для транспортировки газа из района его добычи или хранения в места его потребления. **Магистральные газопроводы находятся под постоянным давлением (до 10МПа) на протяжении всего длинного участка передачи от места хранения к месту потребления.** Поэтому сварные швы должны удовлетворять определенным технологическим требованиям.

Прокладка и сварка стальных газопроводов проходит в разных районах. Для каждого из них характерны свои климатические, а, следовательно, и температурно-влажностные условия, которые необходимо учитывать при разработке технологического процесса сварки.

Строительство газопровода включает в себя не только процесс сварки труб, но и монтажа, в зависимости от климатических условий. Поэтому весь строительный комплекс должен быть мобильным для обеспечения прокладки трубопровода. Если в обычном грунте разработка траншеи не вызывает проблем, то в болоте данные работы сопряжены с целым рядом трудностей, а разработку скальных пород приходится вести буровзрывным способом. Далее, перед укладкой трубы, делают песчаную подушку. Одновременно с подготовкой траншеи вдоль трассы выкладываются трубы (рис. 1).

Для прокладки магистрального трубопровода применяются трубы, удовлетворяющие следующим требованиям (табл. 1).

Рис. 1. Выкладка труб вдоль трассы.

Таблица 1.

Характеристика труб

№ п/п	№ ТУ	Диаметр, мм	Толщ. Стенки, $S_{ст}$, мм	Класс прочности (марка стали)	Норм. Предел прочности, Мпа	Эквивалент углер., %	Тип трубы
1.	Труба ТУ 75-86	1420	23,2	Сталь 60 кгс	589	0,42	одношовная

При монтаже, в зависимости от погодных условий, устанавливаются мобильные комплексы: передвижная сварочная колонна плюс система для орбитальной автоматической и механизированной сварки труб (рис. 2).

Рис. 2. Мобильный комплекс.

Подготовка свариваемых кромок в соответствии с определёнными требованиями (рис. 3).

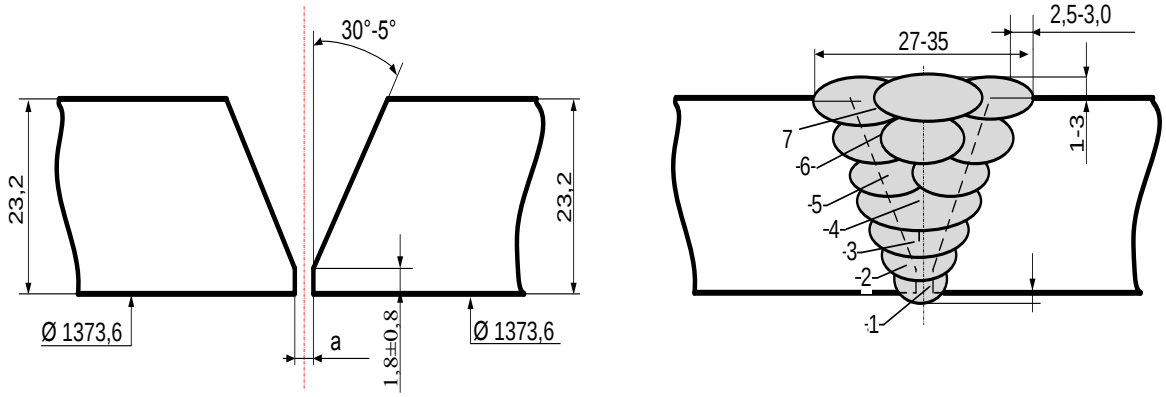

Рис. 3. Подготовка под сварку, сборка и параметры сварного шва.

Подготовленные трубы вывешиваются трубоукладчиком в монтажное положение при помощи мягких строп — лент, исключающих повреждение заводского изоляционного покрытия.

При монтаже нового трубопровода используются как внутренние так наружные центраторы, а при ремонтных работах только наружные (рис. 4).

Центратор — устройство, которое центрирует кромки новой трубы с уже готовым участком трубопровода. С помощью раздвигаемых зажимов центратора, расположенных симметрично по окружности, трубы фиксируются относительно друг друга, при этом выставляется необходимый зазор между кромками, необходимый для сварки корневого слоя шва.

а) б)

в) г)

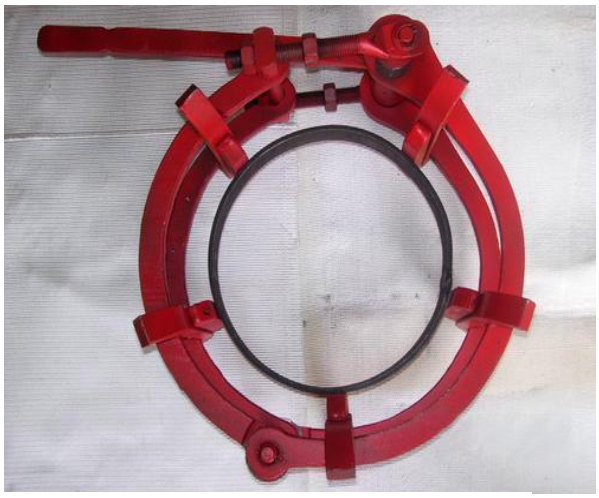

Рис. 4. Виды центраторов: внутренний - а, наружние – б (цепной), в (экцентриковый), г (звенный).

После монтажа трубы на стык опускается сварочный пост — палатка, в которой размещена часть сварочного и вспомогательного оборудования, а также имеется индивидуальное освещение и вентиляция. Кроме того, работы в палатке могут вестись в любое время года, предотвращая попадание атмосферных осадков и влияние ветра на сварное соединение. Рекомендуемые параметры режимов сварки приведены в таблице 2.

Первый корневой шов делается механизированным способом в среде защитных газов. Этот способ увеличивает скорость сварки более чем в три раза по сравнению с ручным и повышает качество сварного соединения.

После сварки корневого шва сформированный обратный валик контролируется, и в случае необходимости устраняются отдельные дефекты. Подвариваются места с допустимыми смещениями кромок, которые не-

возможно было выправить при помощи внутреннего центратора (рис. 4-а). Далее следует заполнение разделки с применением автоматических способов сварки.

После того, как стыки полностью заварены необходимо нанести клейма сварщиков (клеймо бригады), на расстоянии 100-150 мм от шва в верхней полуокружности трубы несмываемой краской, маркером. Зафиксировать данные в сварочном журнале по объекту. Затем провести визуальный и измерительный контроль. Облицовочный шов должен иметь усиление 1-3 мм с плавным переходом к основному металлу без образования подрезов по кромкам глубже 0,5 мм, а также наплывов. Наружные поры, свищи и не заваренные кратера не допускаются.

Таблица 2

Сварочные материалы, режимы сварки и прокалки

№ п/п	Сварочные слои	Марка электрода	Диаметр электрода	Полярность	Положение	Сварочный ток,	Температура (время) прокалки, ч
1.	Корневой (сварка прихваток)	LB-52U (Э50А)	2,6 (3,2)	Обратная («+» на электроде)	Н	80-90 (90-120)	350-380 (1-2)
					В	70-90 (90-110)	
					П	70-80 (80-110)	
2.	Заполняющий первый	ОК 74.70 (Э60)	3,2		Н	90-120	
					В	90-110	
					П	80-110	
3.	Заполняющие последующие	ОК 74.70 (Э60)	4,0		Н	130-180	
					В	110-170	
					П	110-150	
4.	Облицовочный	ОК 74.70 (Э60)	4,0		Н	130-180	
					В	110-170	
					П	110-150	
5.	Заварка подрезов	ОК 74.70 (Э60)	3,2		Н	90-120	
					В	90-110	
					П	80-110	

Произвести радиографический и ультразвуковой контроль качества сварки в соответствии с СТО Газпром 2-2.4-083-2006. Непровары и трещины любой длины и глубины не допускаются.

На основании приведенных данных следует, что для строительства и ремонта магистральных газопроводов применяются разные технологии с применением специализированного оборудования.

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

Гордеев Андрей Андреевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: G.V.Orlik@yandex.ru.

Буркевич Анатолий Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: G.V.Orlik@yandex.ru.

С.С. Парамонов, Н.Н. Максимов

РАСЧЁТ СОСТАВЛЯЮЩИХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СВАРОЧНОГО КОНТУРА КОНТАКТНОЙ МАШИНЫ В ЗОНЕ СОЕДИНЕНИЯ

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

В КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана разработана технология контактной точечной сварки волновых обмоток торцевых асинхронных двигателей, изготавливаемых методом штамповки из листовой меди толщиной 0,25÷0,5мм.

По данной технологии контактную точечную сварку площадок осуществляют электродами с вольфрамовыми вставками, совмещая кромки деталей с образующими вставок. При этом формируется сварная точка, сочетающая литую зону на кромках с соединением в твёрдой фазе по остальной площади контакта деталь – деталь (рис.1). По наличию или отсутствию оплавления на кромках судят о качестве сварного соединения.

Кроме оптимальных геометрических соотношений между толщиной деталей δ с диаметром вставок d_W и их длиной l_W необходимо тщательно выбирать сварочное усилие, величину сварочного тока $I_{СВ}$ и длительность его протекания $t_{св}$. Указанные параметры определяют объём жидкой фазы соединения в области кромок (рис.1) и способность соединения противостоять деформированию от воздействия сварочного усилия.

Однако кроме этого фактора жидкая фаза испытывает значительное воздействие магнитного поля сварочного контура, и её можно рассматривать как подвижный проводник с током в магнитном поле.

Данная работа посвящена изучению влияния магнитного поля контура на поведение жидкого металла сварной точки и его смещение в условном цилиндре под электродами в сторону оплавленных совмещенных кромок контактных площадок обмоток или в противоположном направлении, что влияет на протяжённость зоны оплавления кромок. По протяженности оплавленных кромок можно судить о качестве сварного соединения. Процесс формирования соединения при влиянии магнитного поля и проявляющихся при этом электродинамических сил, воздействующих на жидкую фазу соединения, требуют подробного изучения.

Общую картину магнитного поля в зоне соединения можно охарактеризовать двумя составляющими: результирующим вектором индукции, наведённым всеми токоведущими элементами $B_{Т.В.Э.}$ (рис. 1) и концентричными линиями индукции B_K, наведёнными сварочным током, проходящим непосредственно через сварное соединение. Вектор индукции от всех токоведущих элементов можно выразить уравнением:

$$B_{T.B.Э.} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{H^2 + L^2}{HL\sqrt{H^2 + L^2}} \qquad (1)$$

где: μ_0 – магнитная проницаемость контура; I – сварочный ток; H – раствор контура; L – вылет контура.

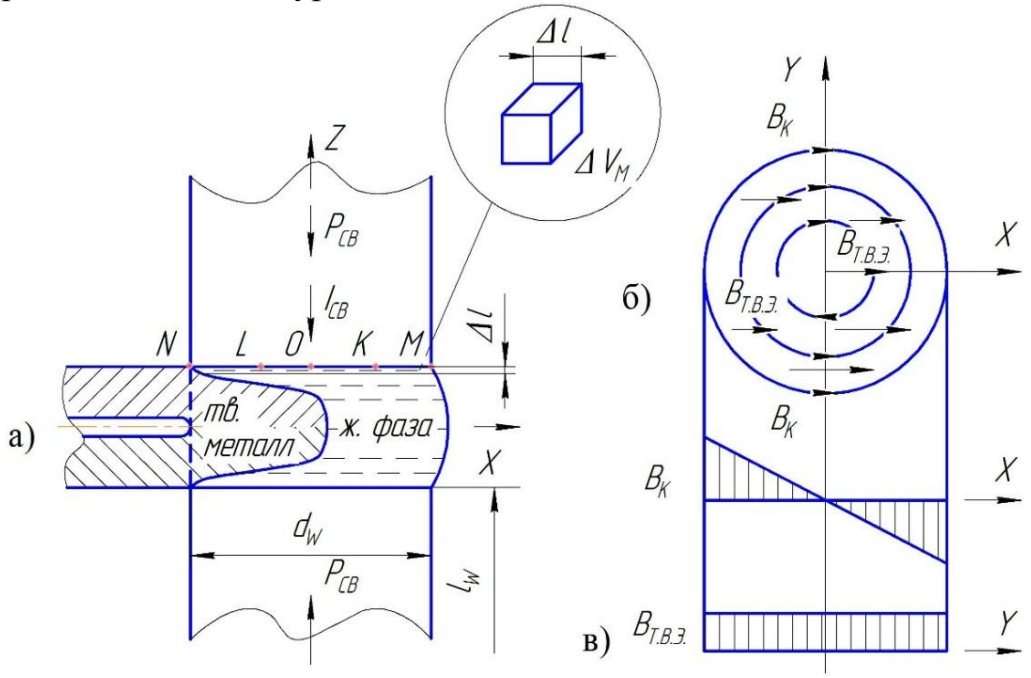

Рис.1 Тепловое состояние соединения, при котором жидкая фаза достигает периферии контактов электрод-деталь (т. N) а), линии индукции $B_К$ и $B_{Т.В.Э.}$, характеризующие магнитное поле в условном цилиндре металла под электродами, в его сечении б) и эпюры полей в)

Формула (1) позволяет вычислить индукцию магнитного поля, наведённого токоведущими элементами контура, в зоне соединения, располагая лишь данными о размерах сварочного контура: вылетом L и раствором контура H; величиной сварочного тока $I_{СВ}$ и магнитной проницаемостью $\mu_С$ – воздуха и $\mu_Д$ – детали. В нашем случае, когда материалом деталей является медь (диамагнетик), можно принять $\mu_С = \mu_Д$. ($\mu_С$=1,0000004, $\mu_Д$=0,9999904). При подстановке этих параметров в (1) получим значение $B_{Т.В.Э.}=4{,}32\cdot10^{-3}$Тл.

На рис.1 б) показано направление (в одном из полупериодов) и распределение линий индукции $B_{Т.В.Э.}$ в зоне соединения. На рис.1 в) построена эпюра распределения линий индукции $B_{Т.В.Э.}$.

Для определения составляющих магнитного поля в зоне соединения, созданных током, протекающим непосредственно через детали – $B_К$, рассмотрим условный цилиндр материала деталей под электродами (рис. 1). С учётом того, что нас интересует влияние электродинамических сил на кинетику формирования сварного соединения, т. е., в основном, качественная картина их проявления, для снижения громоздкости вычислений примем следующие допущения [1, 2]:

1) Так как диаметр электродов-вставок d_W, а соответственно, и площадь контактов электрод (вставка) – деталь и деталь – деталь $S_К$ малы

($d_W \leq 5 \cdot 10^{-3}$ м, $S_К \leq 2 \cdot 10^{-}$), материалы электродов-вставок и деталей – диамагнетики, частота сварочного тока f=50Гц, явление поверхностного эффекта не учитываем и принимаем, что отдельные нити тока распределены по сечению условного цилиндра равномерно. 2) В связи с малой толщиной деталей (δ=2,5÷6·10^{-4} м) растеканием линий тока в массу деталей пренебрегаем. 3) В связи с высокой электропроводностью материала деталей, принимаем сопротивление жидкого и разогретого твёрдого металла деталей одинаковым. 4) Пульсации тока в полупериоде не рассматриваем, т. е. принимаем, что поле квазистационарно. 5) Влияние ферримагнитных масс в силу их удалённости от зоны соединения не учитываем.

Принимая во внимание указанные допущения, величину индукции в любом из сечений условного цилиндра металла под электродами можно выразить формулой [3]:

$$B_K = \frac{2Ir}{R^2} \tag{2}$$

где r – расстояние от оси проводника (условного цилиндра металла под электродами) до точки, в которой определяется индукция B_K; R – радиус проводника (условного цилиндра, по которому протекает ток I.

Анализ формулы (2) показывает, что в центре сварной точки (на оси условного цилиндра, r = 0) индукция B_K = 0. При удалении от центра индукция линейно возрастает до значения B_K=2·10^{-1} Тл.

На рис.1 б представлена эпюра распределения линий индукции по сечению условного цилиндра материала деталей под электродами.

Взаимодействие составляющих магнитного поля с током, протекающим в условном цилиндре металла под электродами вызовет появление соответствующих электродинамических сил F_K и $F_{Т.В.Э.}$, стремящихся сместить жидкую фазу. Согласно правилу левой руки первые направлены радиально – от периферии к центру сварной точки. Вторые действуют в направлении от трансформатора на внешнюю сторону контура [2] (рис. 2 б).

После некоторых преобразований результирующее значение F_P можно выразить:

$$F_P = j\int_0^V (B_K + B_{Т.В.Э})dV \tag{3}$$

В данном случае наиболее рациональным представляется провести расчёт величин электродинамических сил F_K и $F_{Т.В.Э.}$, действующих на единичные объёмы жидкой фазы, расположенные в наиболее характерных областях соединений. (Силы, действующие на единичный объём dV=ΔV, обозначим ΔF_K и $\Delta F_{Т.В.Э.}$). Затем оценив величину и направление полей указанных сил, провести анализ полученных данных и учитывая действие других технологических факторов, дать предварительные прогнозы относительно влияния магнитного поля на процесс формирования соединения. Правильность выдвинутых положений проверить экспериментом.

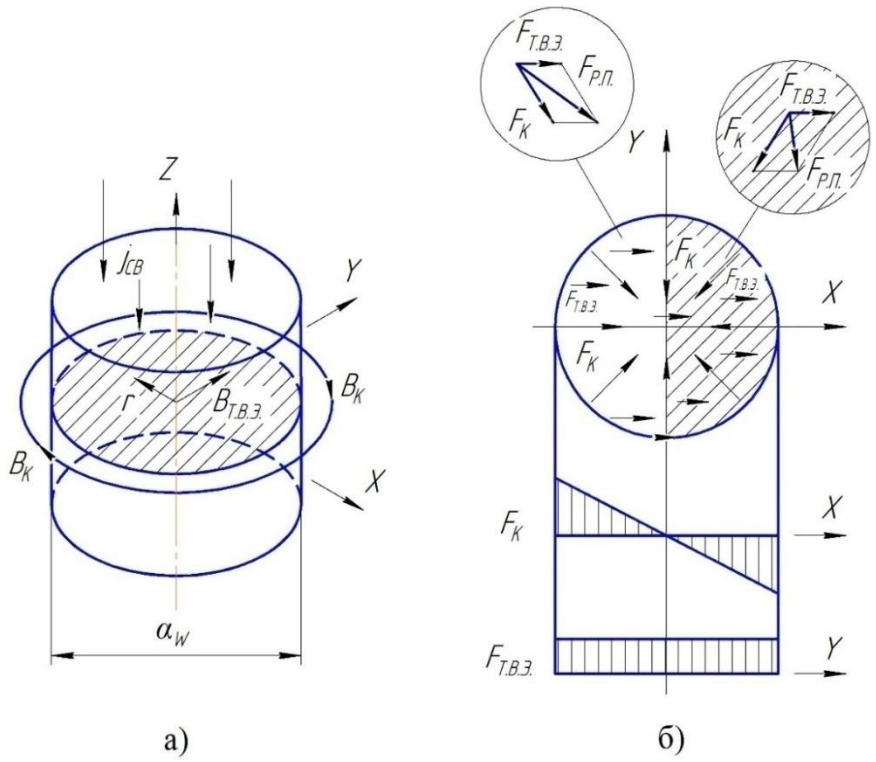

Рис. 2 Магнитное поле, характеризуемое линиями индукции B_K и $B_{T.B.Э}$ в условном цилиндре металла под электродами а), поле сил F_K и $F_{T.B.Э.}$ в сечении условного цилиндра и эпюры сил по оси X и У б)

Опираясь на данные электротеплового расчёта, в качестве наиболее характерных, можно принять области, расположенные в осевом сечении, образованном плоскостью симметрии на периферии контактов электрод-деталь, в центре этих контактов и на расстоянии, равном четверти диаметра сварной точки от центра соединения.

Обозначим единичные объёмы жидкой фазы ΔV в этих областях соответствующими буквами ΔV_M, ΔV_N, ΔV_O, ΔV_K и ΔV_L (рис.1 а).

Рассмотрим случай теплового состояния сварного соединения, когда изотерма плавления достигает периферии контакта электрод-деталь (область ΔV_N) со стороны основной массы деталей. При этом, задавшись некоторой величиной слоя жидкого металла $\Delta l=1\cdot10^{-4}$м в контактах электрод-деталь, вычислим значение индукции B_K, в обозначенных областях, и величину ΔF_K.

Расчёты проводили для тока I_{CB}=2500А, диаметра электрода – вставки $d_W=4\cdot10^{-3}$м, при вылете L= 0,25м и растворе H=0,015м (машина МТ-809). Полученные значения индукции подставляли в соответствующие формулы и рассчитывали электродинамические силы, действующие на единичные объёмы в соответствующих областях соединения. Результаты занесены в таблицу 1.

На основании рассчитанных данных были построены силовые поля электродинамических сил ΔF_K и $\Delta F_{T.B.Э.}$, действующих в одном из сечений

условного цилиндра материала деталей под электродами. На рис.1 в) представлены эпюры соответствующих силовых полей.

Анализ полученных данных показывает, что на периферии сварного соединения (области, соответствующие т. M и т. N) радиально направленные сжимающие силы ΔF_K на два порядка превышают силы $\Delta F_{Т.В.Э.}$, стремящиеся сместить жидкую фазу на внешнюю сторону контура ($\Delta F_K=3{,}2\cdot10^{-5}$Н, $\Delta F_{Т.В.Э.}=6{,}9\cdot10^{-7}$Н); величина радиально направленного сжимающего поля сил F_K уменьшается от максимально значения на периферии контактов $\Delta F_K=3{,}2\cdot10^{-5}$Н до нуля в центре по линейному закону. В точках L и K величина силы ΔF_K составляет половину от максимального значения; поле сил $\Delta F_{Т.В.Э.}$ неизменно по величине и направлено всегда на внешнюю сторону сварочного контура (внешнюю образующую); в левой, относительно оси ОУ, незаштрихованной половине любого из сечений условного цилиндра металла под электродами (рис.2 б), сопрягаемой с внутренней образующей электродов, силовые поля F_K и $F_{Т.В.Э.}$ суммируются; в правой, заштрихованной, сопрягаемой с внешней образующей, - силовые поля F_K и $F_{Т.В.Э.}$ вычитаются.

Таблица 1

Область контакта электрод-деталь, где расположен объём, $1\cdot10^{-12}$м	N	L	O	K	M
Значения электродинамической силы, ΔF_K, $Н\cdot10^{-5}$	3,18	1,6	0	-1,6	-3,18
Значения электродинамической силы, $\Delta F_{Т.В.Э.}$, $Н\cdot10^{-7}$	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9

Главный обобщающий вывод заключается в следующем: так как радиальнонаправленное сжимающее поле сил F_K на периферии сварной зоны (на образующей условного цилиндра под электродами) превышает величину поля сил $F_{Т.В.Э.}$, стремящихся сместить жидкую фазу за пределы сварочного контура на два порядка, то нет оснований для возникших ранее опасений в том, что действие электродинамических сил $F_{Т.В.Э.}$ может привести к значительным перемещениями и срыву жидкой фазы за пределы соединения, что казалось особенно вероятным в случае совмещения адиабатических кромок деталей с внешними образующими вольфрамовых вставок.

Список литературы

1. Справочник по расчёту и конструированию контактных частей сильноточных электрических аппаратов. Адоньева Н. М., Афанасьева В. В., ред. Москва, 1989, 256 с.

2. Холявский Г. Б. Расчёт электродинамических усилий в электрических аппаратах. – Л.: Энергия, 1971, 156 с.

3. Орлов Б. Д., Марченко А. Л. Формирование литой зоны при точечной электросварке алюминиевых сплавов // Надёжность сварных соединений и конструкций: Сб. статей кафедр «Сварочное производство» в учебных заведениях Москвы. Москва, 1967. – С. 186-197.

Парамонов Сергей Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: paramonov231992@gmail.com.

Максимов Николай Николаевич — доцент, к.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: paramonov231992@gmail.com.

СЕКЦИЯ 3.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Н.Н. Чернова, В.В. Андреев, А.А. Столяров

ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ ПОДЛЕГИРОВАНИЯ КАНАЛА МДП-ТРАНЗИСТОРА НА ВЕЛИЧИНУ ТОКА СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СТАБИЛИЗАТОРА ТОКА

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

В настоящее время высоковольтные слаботочные стабилизаторы тока на основе МДП-транзисторов широко используются в устройствах телефонии, пожарной сигнализации и др. электронных системах, работающих в «дежурном» режиме [1-3].

Целью данной работы являлся выбор оптимального режима легирования области канала МДП-транзистора высоковольтного слаботочного стабилизатора тока для обеспечения необходимой величины тока стабилизации (тока стока МДП-транзистора $I_{сток}$).

Для изготовления высоковольтного слаботочного стабилизатора тока (КЖ-101А) использовались пластины, с исходной структурой $100\frac{35КЭФ27}{420КЭС0,01(100)}$.

Подлегирование канала МДП-транзистора этих стабилизаторов осуществляется в установке ионного легирования «ЛАДА-30».

Было принято решение подобрать режимы легирования для получения максимально возможного выхода годных изделий КЖ-101А.

Для этого на одной рабочей пластине партии СТ-1 (пластина №1) было выполнено подлегирование канала со следующими режимами: $Д = 1,1\cdot 10^{13}\frac{ионов}{см^2}$, $E = 75кВ$. Легирование осуществлялось после проведения фотолитографии в кремний свободный от окисла.

Подлегированная пластина была отправлена на следующие операции в соответствии с технологическим маршрутом:

- химическая обработка,
- окисление под затвор,
- фотолитография контактные окна,
- химическая обработка,
- напыление алюминия,
- фотолитография по алюминию,
- отмывка в горячей воде,
- вжигание алюминия,
- измерение электрических параметров.

На участке измерения электрических параметров были получены следующие параметры пластины: ток стока $I_{сток} = 4 - 5мА$, напряжение пробоя $U_{пр} \geq 250В$ при норме $I_{сток} = 90 - 120мкА$.

Было принято решение пустить сигнальную пластину с уменьшенной дозой подлегирования.

Для этого на выбранной пластине партии СТ-1 (пластина №2) было выполнено подлегирование канала со следующими режимами: $Д = 1{,}1 \cdot 10^{11} \frac{ионов}{см^2}, E = 75кВ$.

Подлегированная пластина так же, как и пластина №1, была отправлена на следующие операции в соответствии с технологическим маршрутом.

На участке измерения электрических параметров были получены следующие параметры пластины: ток стока $I_{сток} = 200 - 250мкА$, напряжение пробоя $U_{пр} \geq 250В$, что не соответствует норме.

После анализа полученных результатов было принято решение пустить сигнальную пластину меньшей дозой подлегирования. Для этого на выбранной пластине партии СТ-1 (пластина №3) было выполнено подлегирование канала со следующими режимами: $Д = 7 \cdot 10^{10} \frac{ионов}{см^2}, E = 75кВ$.

Подлегированная пластина так же, как и пластины №1 и №2, была отправлена на следующие операции в соответствии с технологическим маршрутом.

На участке измерения электрических параметров были получены следующие параметры пластины: ток стока $I_{сток} = 80 - 150мкА$, напряжение пробоя $U_{пр} \geq 250В$, что соответствует норме.

По результатам проведённой работы был сделан вывод, что при выполнении подлегирования канала со следующими режимами: $Д = 7 \cdot 10^{10} \frac{ионов}{см^2}$, $E = 75кВ$ существенно повышается выход годных изделий.

Было принято решение о подлегировании пластин партии СТ-1 с использованием полученных режимов. Полученные параметры пластин партии СТ-1 аналогичны параметрам пластины №3 и соответствуют норме.

Таким образом, полученная зависимость тока стока от дозы легирования канала МДП-транзистора (Рис.1) позволит повысить выход годных кристаллов стабилизатора тока (КЖ-101А). А также выпускать стабилизаторы тока с другим током стабилизации от 50 до 500 мкА (необходимые заказчику для питания различной электронной аппаратуры).

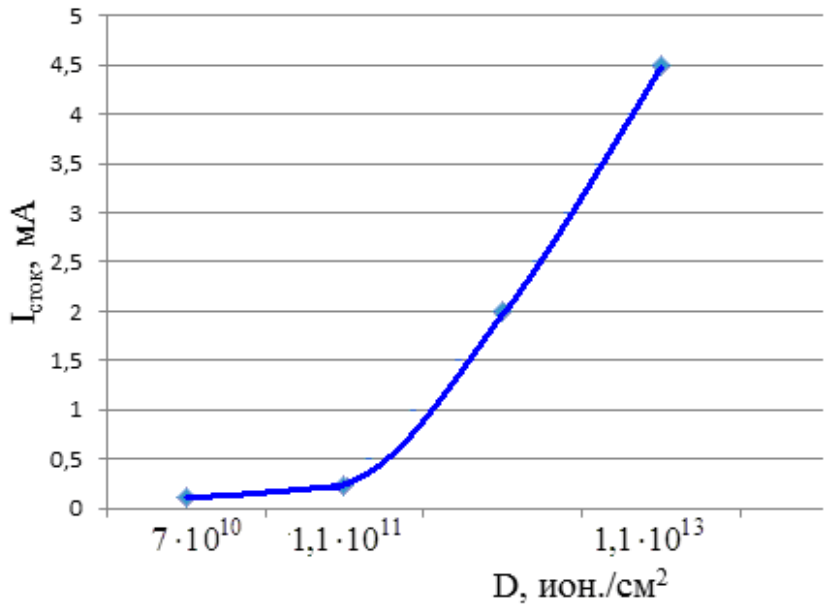

Рис. 1. Зависимость среднего тока стока ($I_{сток}$) от дозы легирования канала МДП-транзистора

Результаты работы были использованы для оптимизации технологического процесса изготовления кристалла высоковольтного стабилизатора тока на ОАО «Восход» - Калужский радиоламповый завод.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ (проект № 1117).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник: Монография.− М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

[2] Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Васютин М.С., Коротков С.И. Влияние температуры на инжекционную модификацию диэлектрических пленок МДП-структур. Перспективные материалы. 2008, № 5, с. 26–30.

[3] Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. Кн.1/ Пер. с англ. Под ред. Р.А.Суриса. - М.: Мир, 1984. - 456 с.

Чернова Наталья Николаевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nataly_mrr@gmail.com.

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

Столяров Александр Алексеевич – д-р техн. наук, заместитель директора по научно-исследовательской работе КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alalstol@mail.ru.

В.В. Кузнецов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МДП-ТРАНЗИСТОРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА С ПЕЧАТНОЙ ПЛАТОЙ

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

Рассматривается поведение и порог отказа силовых МДП-транзисторов при воздействии на них электростатического разряда с печатной платой.

Ключевые слова: электростатический разряд, МДП-транзистор, печатная плата.

Если электронный компонент, несущий статический заряд, затем прикоснётся к какому-либо металлическому предмету, например к установочной головке, то произойдёт быстрый разряд. Соответствующая модель известна как CDM-модель или модель заряженного компонента [1].

Имеются данные [2] о том, что при соединении электронных компонентов с печатной платой, их порог отказа при CDM тестах снижается в несколько раз. Ассоциация ESDA [3] предлагается ввести особую модель ЭСР — модель заряженной платы (CBM — Charged board model).

На кафедре РЭТ МИЭМ НИУ ВШЭ в 2011 – 2013 годах проводилось моделирование и экспериментальной исследование воздействия CBM ЭСР на полевые транзисторы. В ходе исследований была разработана методика схемотехнического моделирования воздействия CBM ЭСР на полевые транзисторы [4], основанная на замене физических параметров объекта воздействия ЭСР на параметры компонентов эквивалентной электрической схемы воздействия CBM и ЭСР.

Целью данного исследования является экспериментальное исследование формы тока CBM ЭСР и сравнение с результатами моделирования эквивалентной схемы CBM ЭСР.

Воздействие ЭСР на полевой транзистор описывается следующей эквивалентной схемой (рис.Рис.1). Ёмкость C_{pcb} подключается к выводу истока транзистора.

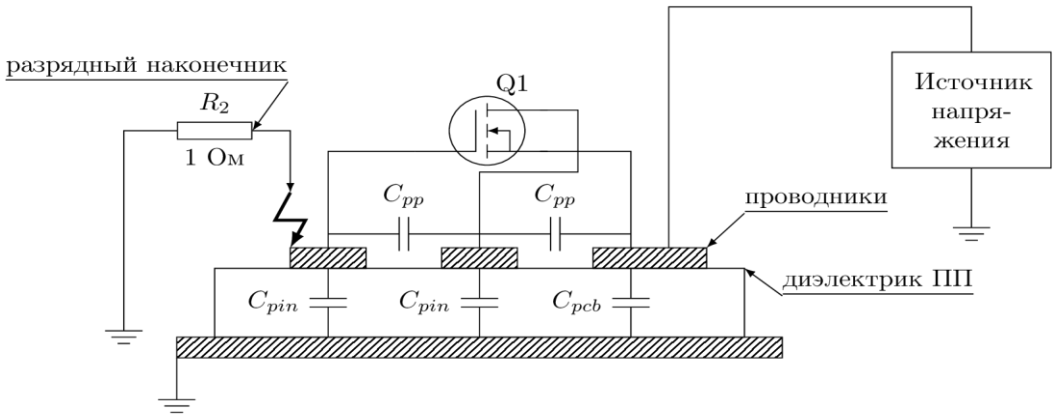

Рис.1. Схема воздейсвия CDM ЭСР на МОП-транзистор.
C_{pin} — ёмкость вывода; L_{pin} — индуктивность вывода;
C_{pp} — ёмкость между выводами; C_{pcb} — ёмкость печатной платы;
R_2 — датчик тока.

ЭСР инициируется при контакте заземлённого разрядного наконечника с выводом транзистора. Если после ЭСР с данным напряжением V_{tets} произошёл отказ транзистора, то это напряжение можно рассматривать как порог отказа транзистора при CBM ЭСР. Датчиком тока ЭСР служит резистор R2. Подключив к нему осциллограф, можно наблюдать на его дисплее форму тока импульса ЭСР. Паразитные индуктивности могут быть определены по данным [5], а сопротивление дуги — по данным [6, 7].

Имея в распоряжении параметры эквивалентной схемы можно провести её моделирование в программе Qucs [8] и исследовать форму тока ЭСР.

Отличием формы тока при CBM ЭСР от формы тока CDM ЭСР является то, что переходный процесс затянут и более высокая пиковая амплитуда тока.

Форма тока в виде затухающих колебаний свидетельствует о высокой добротности контура, по которому течёт ток ЭСР.

В результате проведения тестов на имитаторе CBM ЭСР известно, что транзистор IRF630, установленный на тестовую печатную плату отказывает при ЭСР с напряжением 480 В.

Критерием отказа транзистора служит равенство заряда, накопленного ёмкостью подзатворного диэлектрика C_{gs} пробивному значению заряда Q_{bd} при постоянном токе:

$$Q_{bd}=C_{gs}V_{bd} \qquad (1)$$

Проведём ЭСР тесты для МОП-транзисторов, установленных на тестовых печатных платах. Для этого используем стенд согласно схеме на рис.Рис.1. Форма измеренного и смоделированного тока показана на рис.2.

Результаты моделирования хорошо согласуются с результатами экспериментов.

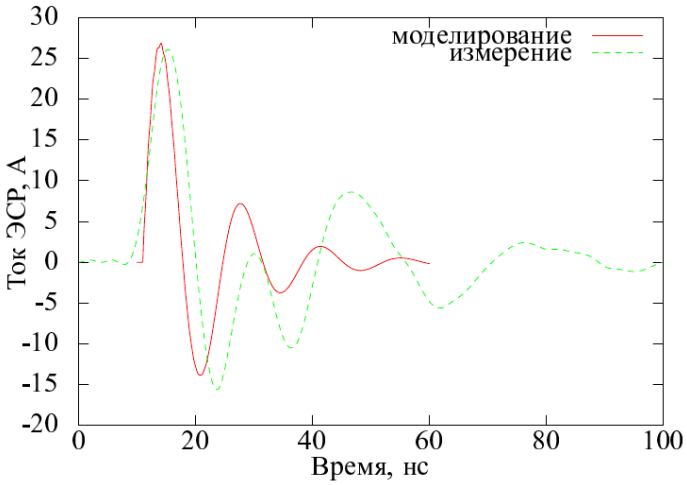

Рис. 2. Осциллограммы формы тока ЭСР. Напряжение ЭСР 430В.

На основании сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования можно заключить, что схемотехническая модель СВМ ЭСР, предложенная в [4] воспроизводит физические процессы при СВМ ЭСР корректно. Разработанная методика моделирования может применяться для расчёта порога отказа МОП-транзистора при CDM ЭСР. Для применения данной методики необходимо знать эквивалентную ёмкость печатного монтажа (измеряется при помощи RCL-метра общего назначения), эквивалентную ёмкость печатного монтажа (рассчитывается на основании КД) и иметь в распоряжении параметры МОП-транзистора, предоставляемые производителем.

В результате исследований получены экспериментальные данные по форме тока ЭСР с печатной платой, которые практически отсутствуют в работах по тематике ЭСР.

Список литературы

1. Кечиев Л. Н., Пожидаев Е. Д. Защита электронных стредств от воздействия статического электричества. — М.: ИД «Технологии», 2005. — 352 с.

2. Colnar J., Trotman J., Petrice R. Decreased CDM ratings for ESD-sensitive devices in printed circuit boards // In Compliance. — 2010. — September. — Pp. 38 – 41.

3. Industry Council on ESD Target Levels. — White Paper 2: A Case for Lowering Component Level CDM ESD Specifications and Requirements, April, 2010. http://www.esda.org/documents/IndustryCouncilWhitePaper2.pdf.

4. Кузнецов В. В., Кечиев Л. Н. Исследование стойкости печатных узлов к воздействию электростатического разряда // Технологии ЭМС. — 2013. — №1. — С. 29–38.

5. Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. — М.: Группа ИДТ, 2007. — 618 с.

6. Bonisch S., Kalkner W., Pommerenke D. Modeling of short-gap ESD under consideration of different discharge mechanisms // Plasma Science, IEEE Transactions on. — 2003. — aug. — Vol. 31, no. 4. — Pp. 736 – 744.

7. Bönisch S. Die Electrostatische Entladung bei kleinen Abständen und Spannungen. Dr.-Ing. genehmigte Disseration. — TU Berlin, 2004. — 153 pp.

8. Brinson M. E., Jahn S. Qucs: A GPL software package for circuit simulation, compact device modelling and circuit macromodelling from DC to RF and beyond // International Journal of Numerical Modelling (IJNM): Electronic Networks, Devices and Fields. — 2008. — September. — Vol. 22, no. 4. — Pp. 297 – 319. http://www3.interscience.wiley.com/journal/121397825/abstract.

Кузнецов Вадим Вадимович – канд. техн. наук, доцент кафедры "Конструирование и производство электронной аппаратуры" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ra3xdh@gmail.com.

В.В. Андреев, А.А. Столяров, И.В. Соловьев,
Д.М. Ахмелкин, А.В. Романов

КОНТРОЛЬ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МДП-СЕНСОРОВ

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

В последнее время в качестве датчиков интегральной поглощенной дозы ионизирующих облучений широко используются МДП-транзисторы [1-4]. Под действием радиационного облучения в подзатворном диэлектрике таких транзисторов накапливается положительный заряд, приводящий к смещению порогового напряжения, по величине которого и оценивается интегральная поглощенная доза [1,3]. Для повышения чувствительности и метрологических характеристик таких датчиков необходима разработка специальных транзисторов с заданным значением порогового напряжения и подзатворным диэлектриком, чувствительным к воздействию ионизирующих облучений.

В данной работе разработан специальный МДП-сенсор с инжекционно-модифицированными диэлектрическими слоями, параметры которого можно изменять после его изготовления, получая требуемые значения порогового напряжения.

Разработанный транзистор изготавливается на пластине монокристаллического кремния, имеет длину канала 2 мкм и соотношение длины канала к ширине $2 \cdot 10^4$ с толщиной подзатворного диэлектрика до 150 нм. Отличительной особенностью данного полевого прибора является то, что в качестве подзатворного диэлектрика используется многослойный диэлектрик на основе термической пленки диоксида кремния, пассивированного слоем фосфорно-силикатного стекла (ФСС), содержащего электронные ловушки [5]. Использование в качестве подзатворного диэлектрика SiO_2-ФСС с плёнкой ФСС около 20 нм, полученной диффузией фосфора в термический SiO_2, и концентрацией фосфора от 0,5 до 2% даёт возможность с помощью сильнополевой туннельной инжекции электронов по Фаулеру-Нордгейму корректировать пороговое напряжение непосредственно на готовых приборах в диапазоне от 0,5 до 4 В. Корректировка производится за счёт накопления в объеме подзатворного диэлектрика требуемой плотности термостабильного отрицательного заряда [5-8]. Данная компонента получается в результате отжига инжекционно модифицированных МДП-транзисторов при температуре 200° С в течение 1 часа. Топология разработанного МДП-транзистора с инжекционным управлением пороговым напряжением со стурктурой Si-SiO_2-ФСС-Al показана на рисунке 1.

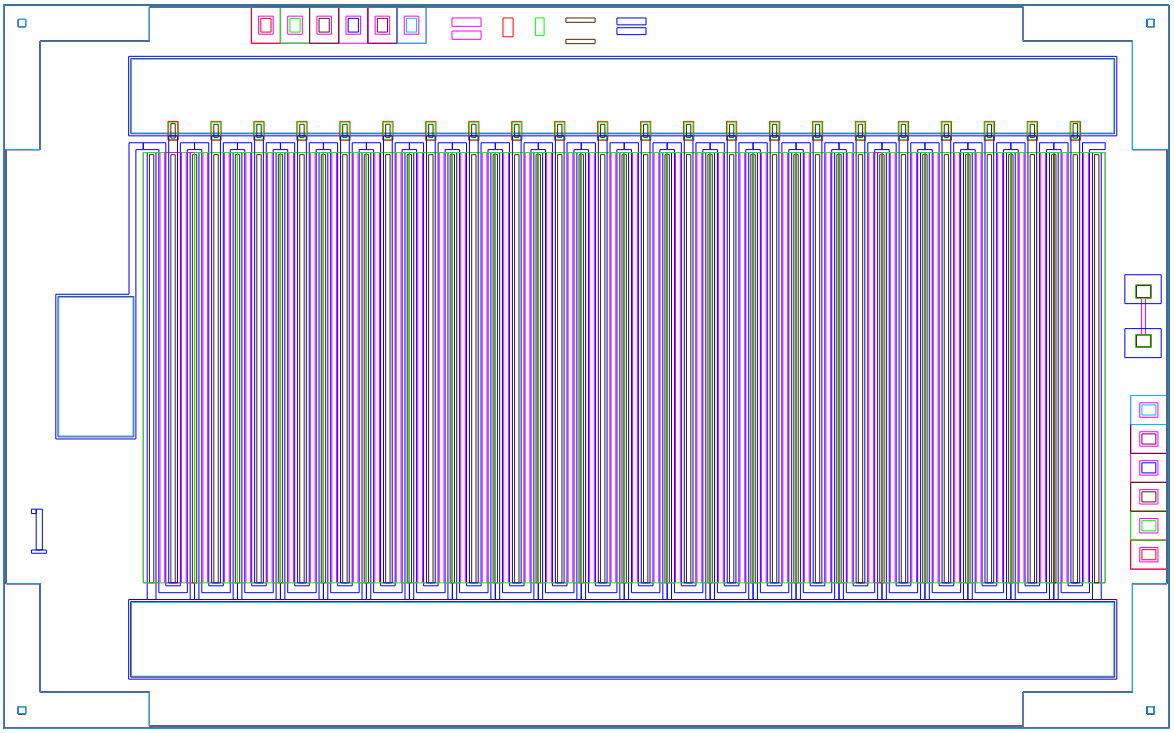

Рис. 1. Топология МДП-транзистора с инжекционным управлением пороговым напряжением со стурктурой Si-SiO_2-ФСС-Al

На рис. 2 приведена структура разработанного МДП-транзистора с инжекционным управлением пороговым напряжением. Как видно из рис. 2, транзистор полностью совместим с КМДП технологией и может быть включен в состав единого микросистемного изделия, имеющего схему обработки сигнала, изготовленную на том же полупроводниковом кристалле по технологии КМДП ИМС 564 серии.

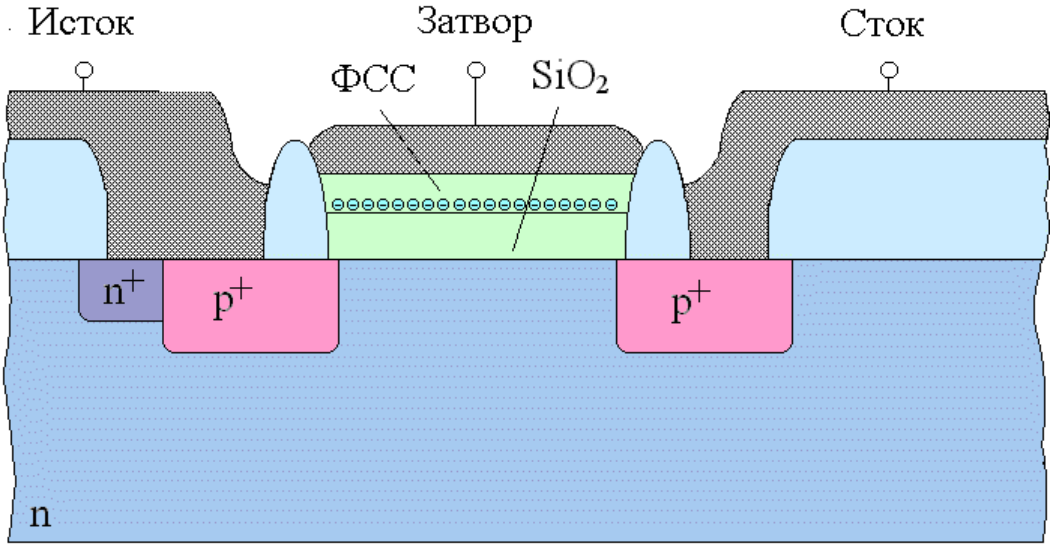

Рис. 2. Структура низковольтного управляемого источника напряжения на основе МДП-транзистора с инжекционным управлением напряжением стабилизации

На рисунке 3 приведены зависимости сдвига порогового напряжения МДП-транзистора после сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремниевой подложки (кривая 1) и последующего отжига (кривая 2) от времени инжекции. Для реализации режима сильнополевой инжекции электронов из кремниевой подложки к затвору МДП-транзистора прикладывалось положительное напряжение 73 В.

Кривая 2 на рисунке 3 характеризует термостабильную компоненту отрицательного заряда, для получения которой после инжекционной модификации МДП-транзисторы отжигались при температуре 200 °С в течение 1 часа. Как видно из рисунка 3, термостабильная компонента отрицательного заряда составляет около 60 % от общей плотности заряда, накопленного в диэлектрике в процессе инжекции.

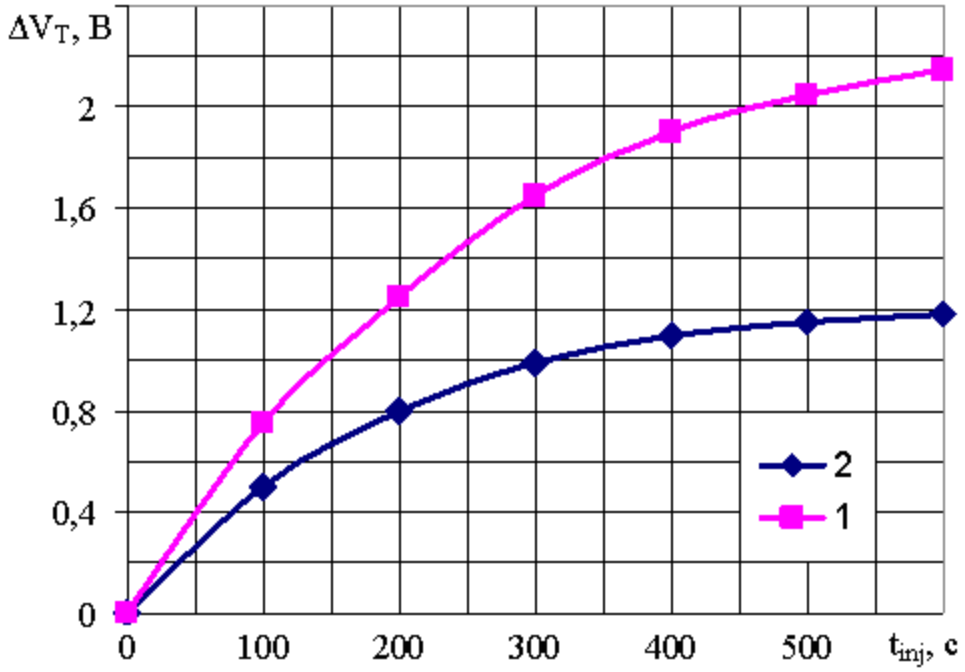

Рис. 3. Зависимости сдвига порогового напряжения МДП-транзистора после сильнополевой инжекции электронов из кремниевой подложки (кривая 1) и последующего отжига (кривая 2) от времени инжекции

Ранее нами было показано [9,10], что термостабильная компонента инжекционно модифицированного заряда обладает хорошей радиационной стойкостью. Последующие испытания с приложением рабочих напряжений к электродам прибора и с дополнительным нагревом (до 500 часов при температуре 80÷100 °С) показали стабильную работу транзисторов.

Проведена апробация разработанного МДП-транзистора при контроле интегральной поглощенной дозы ионизирующего облучения. Для исследования использовалось ионизирующее излучение гамма квантов (источник Co^{60}). Радиационная чувствительность к гамма-излучению в зависимости от параметров подзатворного диэлектрика составляла 2÷10 мВ/Гр и дозо-

вая зависимость сдвига порогового напряжения была близка к линейной в диапазоне до 300 Гр. При дозах гамма-облучения до 300 Гр величина термостабильного отрицательного заряда, накапливаемого в пленке ФСС и используемого для получения требуемого значения порогового напряжения МДП-транзистора, оставалась практически неизменной. Для повышения точности определения интегральной поглощенной дозы ионизирующего излучения измерение сдвига порогового напряжения МДП-транзистора необходимо проводить при нескольких значениях тока стока.

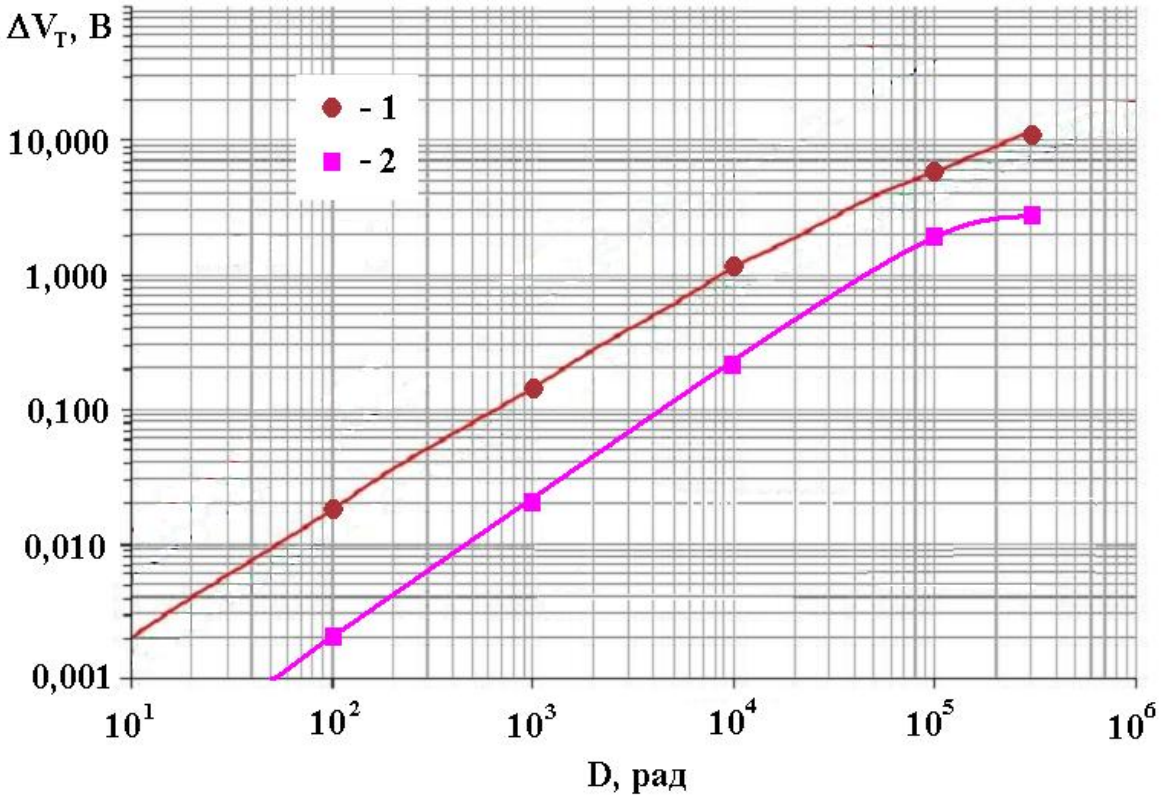

Рис. 4. Зависимость сдвига порогового напряжения МДП-транзистора от дозы гамма-излучения измеренная для различных токов стока: 1 – 200 мкА; 2 – 10 мкА

На рис. 4 показана определенная экспериментально зависимость изменения порогового напряжения МДП-транзисторов от величины интегральной поглощенной дозы для различных токов стока. Установлено, что сдвиг порогового напряжения под действием радиационного облучения обусловлен в основном накоплением в подзатворном диэлектрике положительного заряда. Показано, что для повышения точности определения интегральной поглощенной дозы ионизирующего излучения измерение сдвига порогового напряжения МДП-транзистора необходимо проводить при нескольких значениях тока стока.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ (проект № 1117).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ma T. P., Dressendorfer P. V. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits. New York: Wiley Interscience, 1989.

[2] Asensio L.J., Carvajal M.A., Lopez-Villanueva J.A., Vilches M., Lallena A.M., Palma A.J. Evaluation of a low-cost commercial mosfet as radiation dosimeter// Sensors and Actuators A. 2006. V.125. P.288–295.

[3] Перевертайло В.Л. Датчики интегральной поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе МОП-транзисторов// Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2010. №5-6. С.22-29.

[4] Vasovic N.D, Ristic G.S. A new microcontroller-based RADFET dosimeter reader// Radiation Measurement. 2012. V.47. P272-276.

[5] Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A., Tkachenko A.L. Modification of metal-oxide-semiconductor devices by electron injection in high-fields// Vacuum. 2002. Vol. 67/3-4. P.507-511.

[6] Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Drach V.E. Plasma and injection modification of gate dielectric in MOS structures// Thin solid films. 2003. V.427. P.377-380.

[7] Andreev V.V., Bondarenko G.G., Stolyarov A.A., Vasyutin D.S., Mikhal'kov A.M. Influence of High_Field Electron Injection Regimes on Modification of Dielectric Films of MOS Devices // Inorganic Materials: Applied Research. 2010. Vol.1. No.2. P.105–109.

[8] Андреев В.В., Столяров А.А., Васютин М.С., Михальков А.М. Активный чувствительный элемент сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур с наноразмерными диэлектрическими слоями// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2010. С.118-127.

[9] Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Новиков Л.С., Соловьев Г.Г., Столяров А.А., Чухраев И.В. Влияние протонного облучения на инжекционно-модифицированные структуры металл-диэлектрик-полупроводник // Труды 14 Межнационального совещания " Радиационная физика твёрдого тела". Москва. 2004. С.231-235.

[10] Андреев В.В., Бедняков А.А., Бондаренко Г.Г., Кузнецов Н.В., Новиков Л.С., Соловьев Г.Г., Столяров А.А., Лоскутов С.А. // Физика и химия обработки материалов, 2001, № 3. С.5-11.

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

Столяров Александр Алексеевич – д-р техн. наук, заместитель директора по научно-исследовательской работе КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alalstol@mail.ru.

Соловьев Илья Викторович – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: solo1511@yandex.ru.

Ахмелкин Дмитрий Михайлович – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru.

Романов Андрей Владимирович – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru.

Д.В. Андреев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ЭЛЕКТРОНОВ В ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ МДП-СТРУКТУР

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

В данной работе для исследования тонких и сверхтонких диэлектрических пленок МДП-структур с использованием метода управляемой токовой нагрузки [1] была разработана модель, описывающая изменение зарядового состояния МДП-структур как в режиме заряда емкости, так и в режиме транспорта электронов в диэлектрике при приложении к структуре сильных электрических полей. Использование этой модели позволяет выбрать оптимальный алгоритм токового воздействия и повысить точность измерений. В методе управляемой токовой нагрузки к МДП-структуре прикладывается специальный алгоритм токового воздействия, а характеристики диэлектрика контролируются по анализу временной зависимости напряжения, падающего на образце. При этом учитываются процессы заряда и разряда емкости МДП-структуры, а также захвата заряда в подзатворном диэлектрике. Заряд и разряд емкости МДП-структуры постоянной плотностью тока от режима инверсии до режима аккумуляции или наоборот позволяет получать низкочастотную C-V зависимость [3-4]. Учет процессов заряда емкости МДП-структуры и захвата заряда в подзатворном диэлектрике МДП-структур в инжекционном режиме дает возможность существенно повысить метрологические характеристики метода и уменьшить погрешности, возникающие при определении характеристик МДП-структур.

В основе разработанной модели лежит следующая система уравнений:

- уравнение нейтральности заряда

$$Q_0(t) = Q_C(t) + Q_{inj}(t) + Q_t(t) \tag{1}$$

- уравнение для заряда, обусловленного приложением к МДП-структуре многоуровневой токовой нагрузки

$$Q_0(t) = \int_0^t i_0(t)dt = \sum_{j=1}^{n} I_{0j} \cdot \Delta t_j \tag{2}$$

- уравнение заряда емкости МДП-структуры

$$Q_C(t) = C(t)V_I(t) \tag{3}$$

- уравнение для заряда, инжектированного в диэлектрик

$$Q_{inj}(t) = \int_0^t i_{inj}(t)dt \tag{4}$$

- уравнение для инжекционного тока Фаулера-Нордгейма

$$i_{inj}^{FN}(t) = AS_g \frac{V_I^2(t)}{d_{ox}^2} \exp\left[-B\frac{d_{ox}}{V_I(t)}\right] \quad (5)$$

- уравнение для инжекционного тока при прямом туннелировании через трапецеидальный барьер

$$i_{inj}^{DT}(t) = AS_g \frac{V_I^2(t)}{d_{ox}^2} \frac{1}{\left[1-\left(1-\frac{qV_I(t)}{\phi_b}\right)^{1/2}\right]^2} \exp\left[-B\frac{d_{ox}}{V_I(t)}\left(1-\left(1-\frac{qV_I(t)}{\phi_b}\right)^{3/2}\right)\right] \quad (6)$$

где $Q_t(t)$ - заряд, захватываемый на ловушках в окисле; I_{0j}- амплитуда прикладываемого к МДП-структуре тока на j-ом участке; Δt_j - длительность j - участка; C(t) – временная зависимость емкости МДП-структуры (в режиме аккумуляции C(t) = C_{ox}); $V_I(t)$- временная зависимость напряжения, падающего на МДП-структуре; S_g – площадь затвора МДП-структуры; q - заряд электрона; d_{ox} – толщина подзатворного диэлектрика; t – время; $A=1{,}54\cdot10^{-6}\cdot m_0/m^*\cdot\phi_b^{-1}$ [A/B^2] и $B=6{,}83\cdot10^7\cdot m_0/m^*\cdot\phi_b^{3/2}$ [В/см] – постоянные туннельной инжекции [2,3]; m_0 и m^* - масса электрона в вакууме и эффективная масса электрона в диэлектрике; ϕ_b- высота потенциального барьера на инжектирующей границе раздела. Если толщина диэлектрической пленки больше или равна 4 нм, то инжекционный ток описывается уравнением Фаулера-Нордгейма и используется уравнение (5). Если толщина диэлектрической пленки меньше 4 нм, то наблюдается прямое туннелирование через трапецеидальный барьер [4], и для нахождения инжекционного тока используется уравнение (6).

На рис. 1 показаны временные зависимости напряжения на МДП-структуре (a),(c), а также емкостного и инжекционного токов в МДП-структуре (b),(d) в режиме поддержания постоянной величины тока, протекающего через подзатворный диэлектрик (I_0), рассчитанные с использованием системы уравнений (1-6). Режиму сильнополевой туннельной инжекции электронов по Фаулеру-Нордгейму соответствует рис. 1 (a),(b), а режиму прямого туннелирования электронов - (c),(d). Как видно из рис.1, в МДП-структурах как с тонкими, так и ультратонкими диэлектрическими пленками в режиме поддержания постоянного тока амплитудой I_0 наблюдаются переходные процессы, когда через подзатворный диэлектрик одновременно протекают инжекционный и емкостной токи. Во время протекания этих переходных процессов могут происходить заметные изменения зарядового состояния МДП-структур. Использование модели на основе уравнений (1-6) позволяет учитывать переходные процессы, возникающие при переключении токовой нагрузки, и корректно контролировать изменение зарядового состояния МДП-структур в зависимости от режимов инжекции заряда в диэлектрик. При исследовании МДП-структур с ультра-

тонкими диэлектрическими пленками длительность переходных процессов возрастает рис. 1 (c,d) и их учет становится еще более важным.

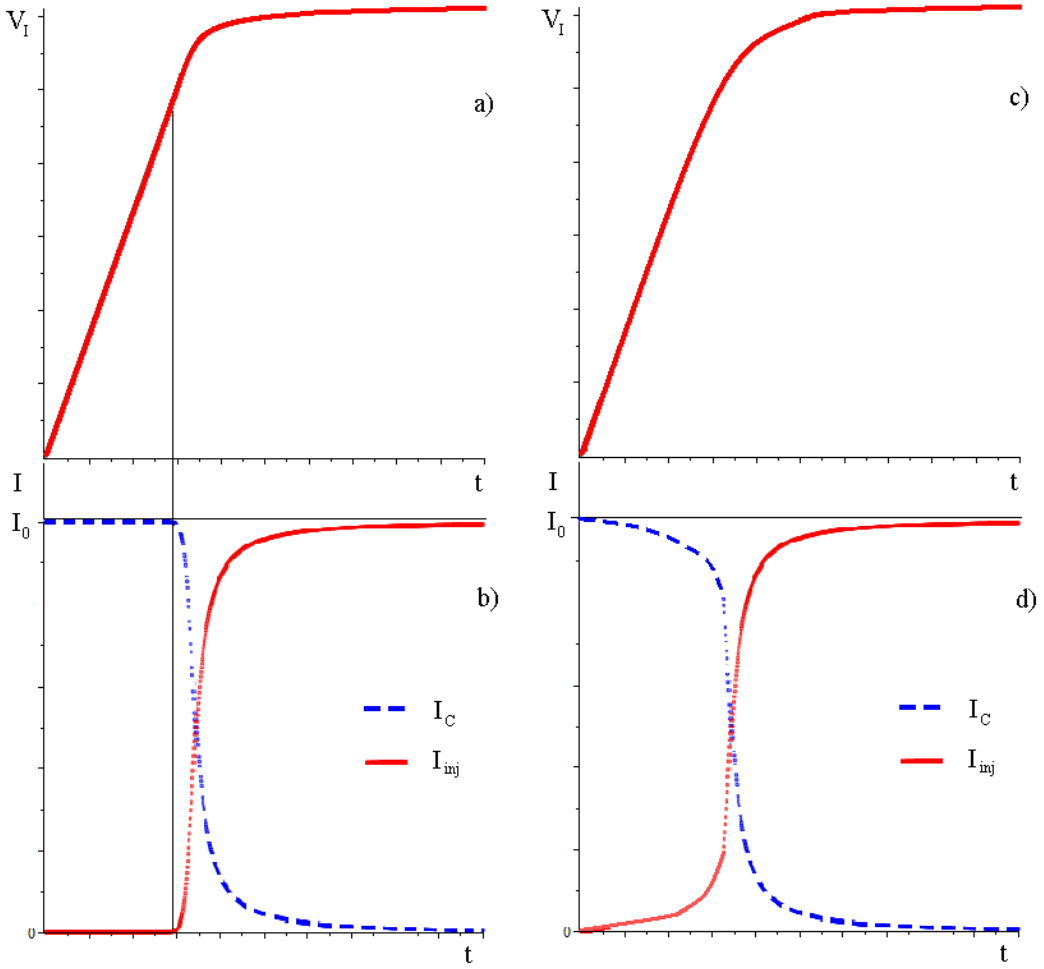

Рис. 1. Временные зависимости напряжения на МДП-структуре (a),(c), емкостного и инжекционного токов, протекающих в структуре (b),(d) для сильнополевой туннельной инжекции электронов по Фаулеру-Нордгейму и (a),(b) и при прямом туннелирован электронов (c),(d)

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ (проект № 1117), а также при финансовой поддержке РФФИ и администрации Калужской области (грант № 14-42-03057).

ЛИТЕРАТУРА

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

[2] Strong A.W., Wu E.Y., Vollertsen R., Suñé J., Rosa G.L., Rauch S.E., Sullivan T.D. Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies. Wiley-IEEE Press. 2009. ISBN: 0471731722. 624 p.

[3] JEDEC Standard, JESD35–A: Procedure for the Wafer–Level Testing of Thin Dielectrics. 2001.

[4] Ranuárez J.C., Deen M.J., Chen C.H. A review of gate tunneling current in MOS devices // Microelectronics Reliability. 2006. V.46. P.1939–1956.

Андреев Дмитрий Владимирович – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru.

И.В. Соловьев, А.А. Столяров

МОДИФИКАЦИЯ ПОРОГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ СО СТРУКТУРОЙ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК

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

Полевые транзисторы со структурой металл-диэлектрик-полупроводник являются одним из основных составных элементов современных цифровых интегральных микросхем. Важнейшей характеристикой для МДП-транзисторов с индуцированным каналом является пороговое напряжение. Это напряжение на затворе, которое приводит к образованию канала между стоком и истоком, открытию транзистора и возникновению заметного тока стока.

Пороговое напряжение используется при управлении транзистором. Оно определяет минимально допустимое значение напряжения питания, уровень токов потребления, помехозащищённость. Данный параметр определяет подпороговый ток, влияющий на потребление энергии СБИС в неактивном состоянии, а, следовательно, экономичность микросхем, время работы приборов от аккумуляторов и батарей.

Пороговое напряжение также может быть использовано в качестве наиболее оптимального информативного параметра для определения накопленной дозы радиационного облучения [1]. Полевые транзисторы могут использоваться в качестве компактных твердотельных дозиметров.

Технологические процессы производства полевых транзисторов позволяют получить изделия заданного качества, однако разброс параметров таких изделий существенен. Важной проблемой является возможность изменения характеристик транзистора в процессе производства в соответствии с потребностями. Модификацию порогового напряжения можно проводить с использованием полевой туннельной инжекции по Фаулеру-Нордгейму [2]. Для проведения измерений смещения порогового напряжения была разработана специальная установка.

Работа установки измерения основана на использовании точечного метода определения [3], что позволило создать устройство с небольшими массогабаритными показателями и широкими возможностями автоматизации измерений. Транзистор, параметры которого необходимо измерить подключается к считывающему устройству. Считывающее устройство состоит из нескольких модулей (рисунок 1). Основным управляющим элементом схемы является микроконтроллер PIC18F4550. Модуль формирования измерительного тока необходим для задания необходимого режима работы транзистора и содержит цифро-аналоговый преобразователь и преобразователь напряжение-ток.

По шине SPI в модуль передаются команды для ЦАП на формирование определённого напряжения. Далее данное напряжение подаётся на вход преобразователя напряжение-ток. В точечном методе измерения порогового напряжения исток транзистора необходимо подключать к источнику тока. Модуль формирования измерительного тока выполняет это требование, реализуя управляемый источник с помощью схем на операционных усилителях. Величина измерительного тока на выходе пропорциональна значениям управляющего напряжения. Разрядность ЦАП составляет 12 бит, что позволяет достаточно точно управлять напряжением. Это позволяет выбирать ток, подаваемый в транзистор в диапазоне 10-200 мкА. Значения тока должны удовлетворять нескольким условиям. Первое – быть близкими к минимальному значению тока стока на передаточной характеристике транзистора. Второе условие – значения измерительного тока должны быть близки к точке нулевого температурного коэффициента, для обеспечения температурной стабильности проводимых измерений.

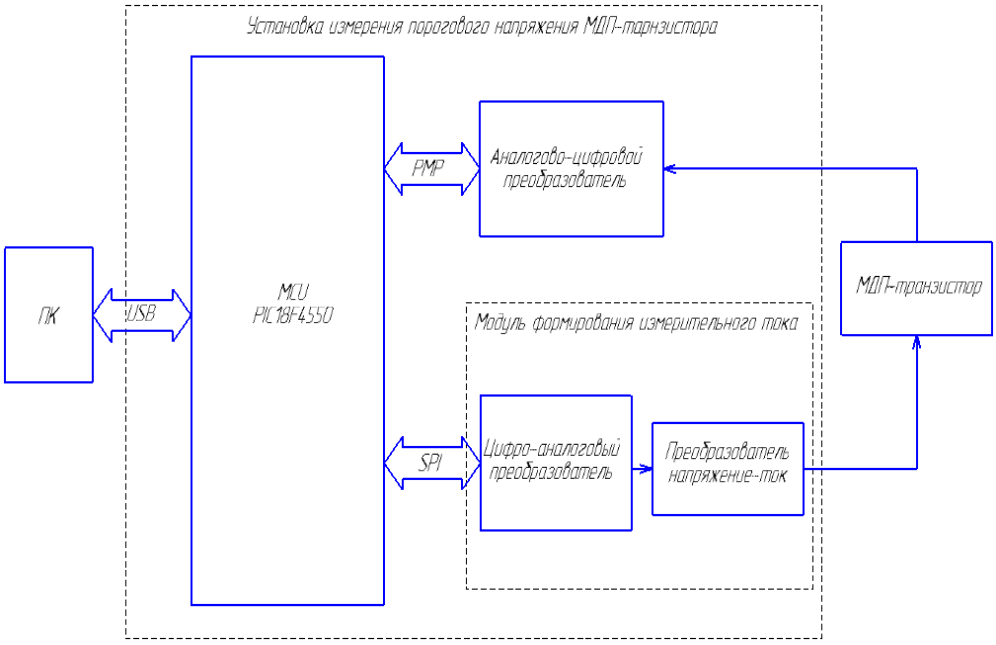

Рис. 1. Структурная схема установки измерения смещения порогового напряжения

При проведении модификации параметров на затвор транзисторов подавалось напряжение смещения 65-75 В. Под воздействием приложенного напряжения происходит инжекция зарядов в подзатворный диэлектрик транзистора. В объеме диэлектрика содержатся электронные ловушки, которые могут захватывать носители [4]. При модификации в слое диэлектрика накапливается отрицательный заряд, общее зарядовое состояние системы изменяется, что приводит к смещению порогового напряжения транзистора. На рисунке 2 приведены зависимости смещения порогового напряжения в зависимости от времени инжекции для полевых транзисторов с каналом p-типа.

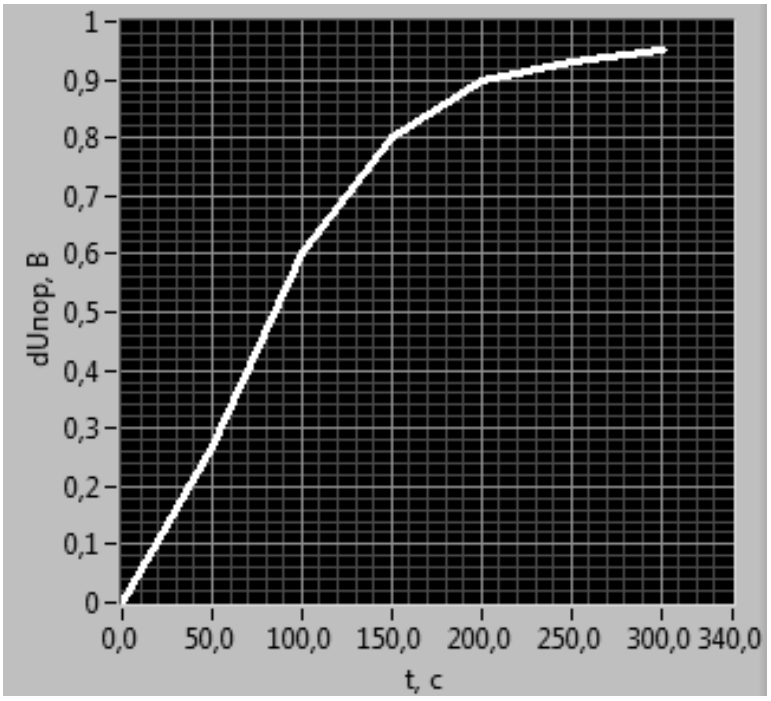

Рис. 2. Зависимости смещения порогового напряжения от времени инжекции

В результате работы максимальный сдвиг порогового напряжения транзисторов составил 1 В. Для повышения стабильности индуцированного в диэлектрике заряда требуется проведение термической обработки образцов.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ (проект № 1117).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Holmes-Siedle A., Adams L. Handbook of Radiation Effects. *Oxford University Press*, 2002, 644 p.

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

[3]. Тице У., Шенк К. *Полупроводниковая схемотехника*. 12-е изд. Пер. с нем. Москва**,** ДМК Пресс, 2008, 832 с.

[4]. Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. *Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник: Монография.* Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, 256 с.

Соловьев Илья Викторович – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: solo1511@yandex.ru.

Столяров Александр Алексеевич – д-р техн. наук, заместитель директора по научно-исследовательской работе КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alalstol@mail.ru.

М.А. Фролова, В.В. Андреев

РАЗРАБОТКА МИКРОСХЕМЫ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

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

В данной работе был разработан широкополосный операционный усилитель (ОУ) - аналог микросхемы NE 5539. Разработанная микросхема представляет собой широкополосный операционный усилитель общего применения с внутренней частотной коррекцией, предназначенный для усиления и расширения динамического диапазона. При разработке операционного усилителя проводилось схемотехническое моделирование для выбора оптимальных конструкторских решений и разработки топологии интегральной микросхемы.

Основное назначение разработанного операционного усилителя – построение схем с точно синтезированной передаточной функцией, которая зависит практически только от свойств цепи обратной связи (ОС). На основе ОУ создаются прецизионные масштабирующие усилители, генераторы функций, стабилизаторы напряжения и тока, активные фильтры, логарифмирующие и потенцирующие усилители, интеграторы, дифференциаторы и т.д.

Операционные усилители широко применяются в традиционной области аналоговой вычислительной техники, в системах управления, цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователях, при построении активных фильтров, измерительной аппаратуры, в генераторах напряжений различной формы, множительно-делительных устройствах, функциональных преобразователях, стабилизаторах напряжений, в прецизионных модуляторах и демодуляторах, коммутаторах, электронных ключах и во многих других устройствах.

Столь широкое применение ОУ объясняется тем, что им свойственны высокие электрические параметры, малые габариты, удобство сопряжения между собой, высокая надежность и небольшая стоимость.

Схемотехническое моделирование разрабатываемой микросхемы проводилось с использованием программы Multisim 11.0 и было направлено на поиски оптимальных конструкторских и топологических решений при проектировании ОУ. Модель микросхемы в программе Multisim 11.0 приведена на рис.1.

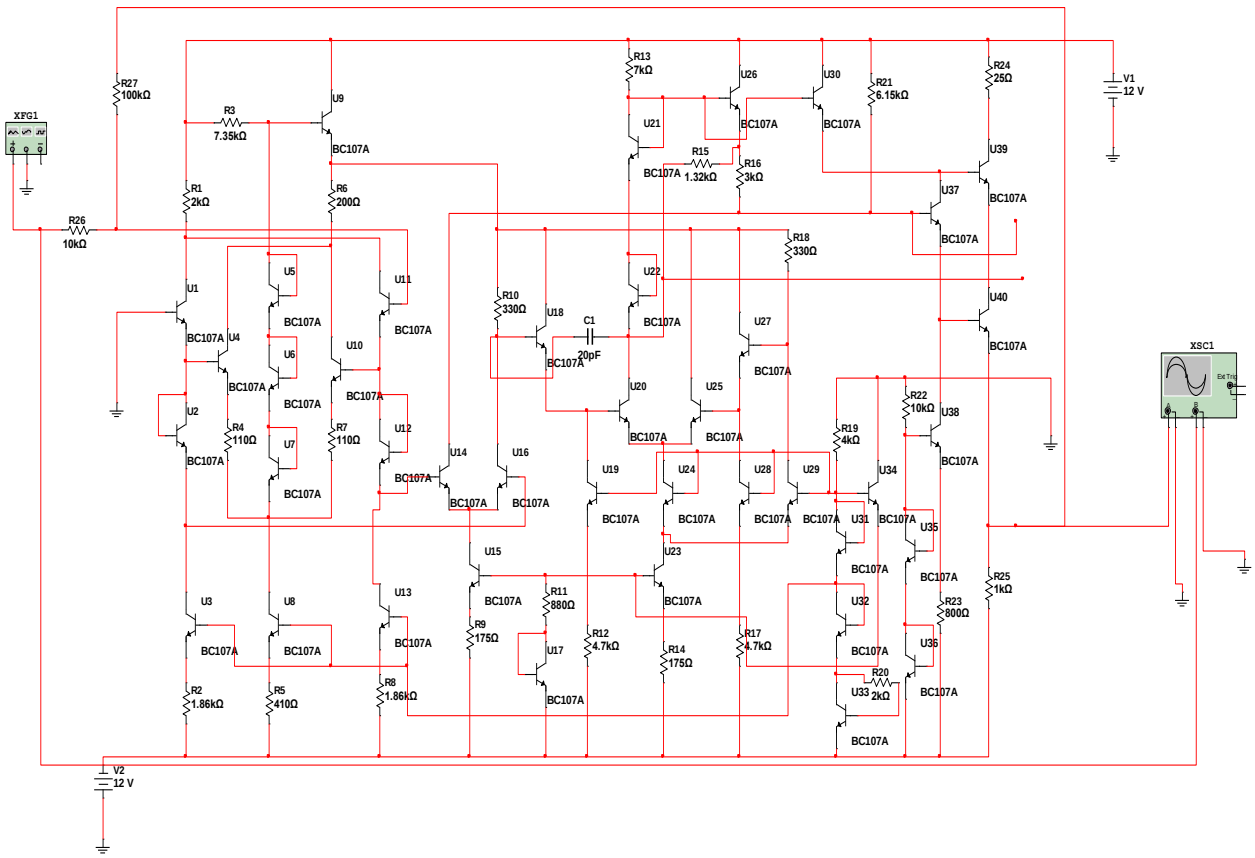

Рис.1. Модель микросхемы в программе Multisim 11.0

На вход микросхемы подавалось напряжение амплитудой 300 мВ. На выходе усилителя снимались показания осциллографа: Uвых=3,255 В. (рис.2.)

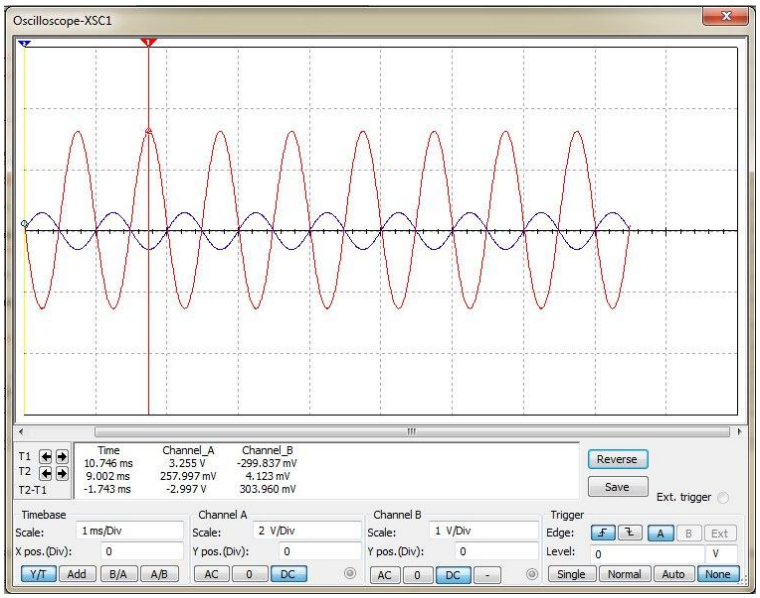

Рис.2. Осциллограмма входного и выходного сигнала

Описание принципа функционирования:

Входной сигнал, поступающий на транзисторы входных эмиттерных повторителей VT1 и VT11, усиливается дифференциальным каскадом на транзисторах VT14 и VT16 и выделяется на нагрузочных резисторах R10 и R16. Далее сигнал, выделенный на первом нагрузочном резисторе R10, усиливается дополнительным дифференциальным каскадом (транзисторы VT20 и VT25) и выделяется на эмиттере транзистора динамической нагрузки VT26. Благодаря соединению эмиттера транзистора VT26 с вторым нагрузочным резистором R16 обеспечивается суммирование на данном резисторе сигналов, усиленных дифференциальным каскадом и дополнительным дифференциальным каскадом.

Увеличение выходного напряжения сигнала при различных включениях операционного усилителя, в том числе и при использовании его в качестве инвертирующего усилителя, достигается использованием диодов VT2 и VT4 и блока выделения входного синфазного сигнала. Снижение уровня напряжения на этих диодах позволяет понизить потенциал на базах транзисторов VT14 и VT16 и тем самым увеличить допустимый уровень формирования выходного напряжения при отрицательной полярности сигнала.

Выделение входного синфазного сигнала обеспечивается дополнительными транзисторами VT4 и VT10, дополнительными резисторами R4 и R7 на генераторе тока и диодной цепи, состоящей из элементов VT5, VT6, VT7 с дополнительным резистором R6.

Отслеживание входного синфазного сигнала, передаваемого через дополнительный транзистор VT9 на дифференциальный каскад и блок понижения уровня дополнительного дифференциального каскада, обеспечивает сохранение линейного режима в целом широкополосного операционного усилителя при значительных величинах выходного напряжения. Дополнительный транзистор VT39 обеспечивает отслеживание выходного сигнала выходного повторителя, таким образом, снижая требования к предельному напряжению коллектор – эмиттер при увеличенном уровне выходного сигнала.

Основные электрические параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение параметра	Норма		Температура среды, °С
		не менее	не более	
1	2	3	4	5
Напряжение смещения нуля, мВ	U_{I0}	–	7,0	25±10
		–	10,0	минус 60±3
		–	10,0	85±5
Максимальное выходное напряжение, В	$U_{0\ MAX}$	2,8	минус 2,8	25±10
		2,5	минус 2,5	минус 60±3
		2,5	минус 2,5	85±5
Средний входной ток, мкА	I_I	–	10,0	25±10
		–	20,0	минус 60±3
		–	20,0	85±5
1	2	3	4	5
Разность входных токов, мкА	I_{IU}	–	1,5	25±10
		–	3,0	минус 60±3
		–	3,0	85±5
Ток потребления от положительного источника питания, мА	I_{CC1}	–	25,0	25±10
		–	30,0	минус 60±3
		–	30,0	85±5
Ток потребления от отрицательного источника питания, мА	I_{CC2}	–	25,0	25±10
		–	30,0	минус 60±3
		–	30,0	85±5
Коэффициент усиления напряжения	A_U	280	–	25±10
		160		минус 60±3
Коэффициент ослабления синфазных входных напряжений, дБ	K_{CMR}	60	–	25±10
		56	–	минус 60±3
		56	–	85±5
Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс	S_{VOM}	280	–	25±10
Время установления выходного напряжения, нс	t_{RIP}	–	60	25±10
Коэффициент усиления переменного напряжения	A_U~	10	–	25±10

Для оптимизации конструкторских решений было проведено исследование влияния сопротивления резистора R10 на коэффициент усиления переменного напряжения ОУ. (рис.3.)

Согласно амплитудно-частотной характеристике, при R10≤100 Ом наблюдается низкий коэффициент усиления, при 100<R10<300 Ом полоса пропускания не удовлетворяет предъявляемым требованиям, при 300≤R10≤500 Ом полоса пропускания не меняется и составляет 1,7 МГц, коэффициент усиления при этом = 31, а при R10>500 Ом коэффициент усиления ниже, полоса пропускания меньше.

Следовательно, в качестве номинала резистора R10 необходимо выбрать значение 330 Ом, при котором достигается оптимальная полоса пропускания ОУ и нужный коэффициент усиления.

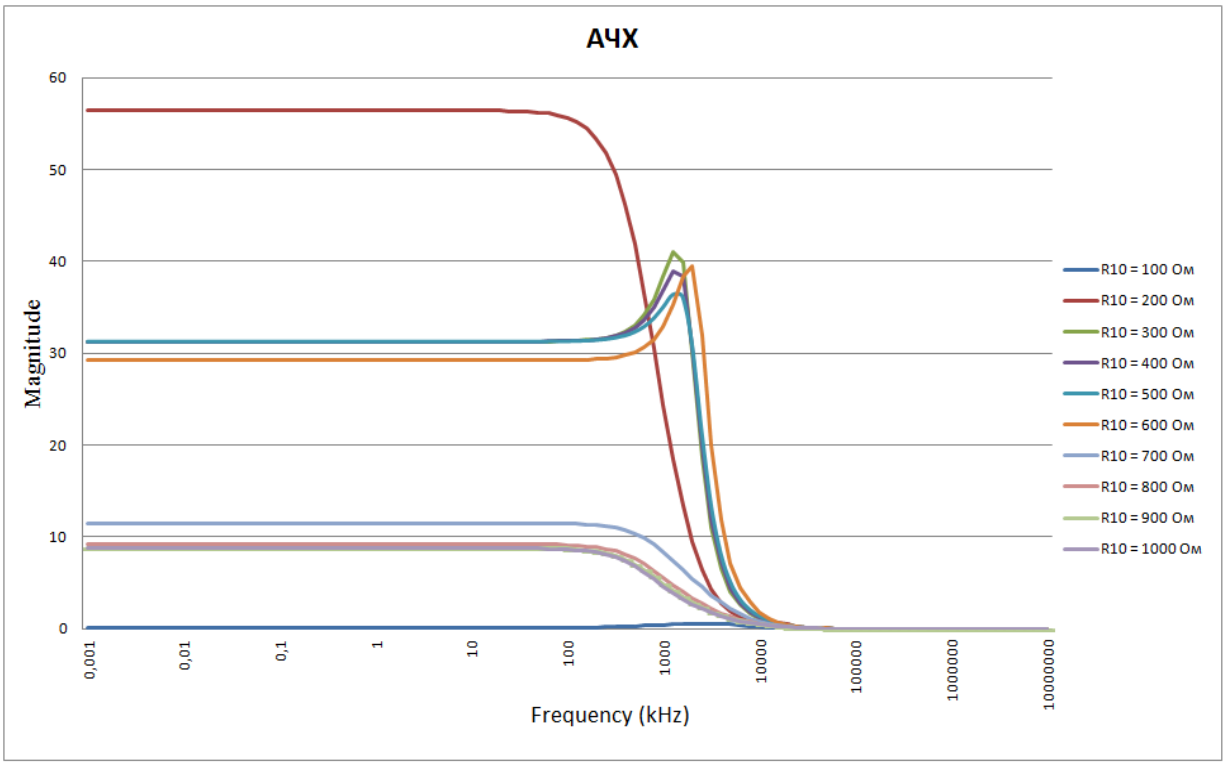

Рис.3. Зависимости АЧХ ОУ от номинала резистора R10

Таким образом, разработанная микросхема не только не уступает своему аналогу по своим характеристикам, но и обладает повышенной радиационной стойкостью, что позволяет использовать ее в оборудовании специального назначения. В данный момент осуществляется разработка топологии, рабочего шаблона, технологических процессов изготовления кристалла и сборки его в корпус на предприятии ЗАО «ОКБ Микроэлектроники» (г. Калуга).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Алексеев А.Г., Войшвилло Г.В. Операционные усилители и их применение. Москва, Радио и связь, 1989, 120 с.

[2] Коледов Л.А. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование. Москва, «Высшая школа», 1984, 234 с.

[3] Электронный портал. NE5539N datasheet. URL: http://kazus.ru/datasheets/pdf-data/3903286/PHILIPS/NE5539N.html (дата обращения 10.10.2014)

Фролова Марина Александровна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: marina.frolova-rpd@yandex.ru.

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

Аунг Пьо, В.В. Сорочан

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ CDS-CDTE

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

Рассмотрено влияние шунтирующего сопротивления, концентрации доноров и акцепторов на выходные характеристики солнечных элементов CdS-CdTe.

***Ключевые слова**: полупроводниковые преобразователи.*

В современном мире рост энергопотребления является одной из наиболее характерных особенностей деятельности человечества. До недавнего времени увеличение производства энергии происходило в основном за счет увеличения добычи полезных ископаемых. Однако в настоящее время энергетика столкнулась с ситуацией истощения своей традиционной сырьевой базы. Этим объясняется возрастающий интерес к возобновляемым источникам энергии [1].

Среди возобновляемых источников энергии особое место занимают полупроводниковые преобразователи солнечной энергии, которые обладают целым рядом преимуществ [2]:

- солнечный свет - возобновляемый и практически неисчерпаемый источник энергии,
- солнечные энергоцентры не производят так называемых «парниковых» газов, токсичных компонентов или пылевых загрязнителей,
- работа фотоэлектрических ячеек не сопровождается шумом,
- солнечные энергоцентры, как и ветряные, можно широко распределить на местности. Это позволяет разнести источники электроэнергии по регионам и помочь созданию нечувствительной к сбоям (защищенной от катастрофических сбоев и терактов) системы электроснабжения.

В ряду полупроводниковых преобразователей солнечной энергии хорошо себя зарекомендовали гетеропереходы, так как эффект окна позволяет переместить область поглощения в глубь материала и избежать потерь на рекомбинацию на поверхностных дефектах. Комбинация материалов CdS, CdTe может быть перспективной для применения в солнечной энергетике, так как значение ширины запрещенной зоны CdTe лежит вблизи максимума спектрального распределения солнечной энергии в земных условиях, а CdS, выполняющий роль окна, близок ему по параметрам кристаллической решетки.

В производстве полупроводниковых фотопреобзователей технологические факторы определяют их выходные параметры. Поэтому создание математической модели, связывающей значения технологических параметров и выходных характеристик, является актуальным.

В данной работе предложена такая математическая модель для гетеропереходов CdS-CdTe. На её основе получены зависимости максимальной мощности(P_{max}) и фактора заполнения вольт-амперной характеристики солнечного элемента от значений шунтирующего сопротивления и концентраций доноров и акцепторов.

Показано, что уменьшение шунтирующего сопротивления ниже 10^3 Ом ведет к резкому снижению P_{max} и фактора заполнения. Увеличение концентрации акцепторов в CdTe до 7×10^{18} см$^{-3}$ приводит к возрастанию напряжения холостого хода до 1,15 В.

Список литературы

1. *Гременок В.Ф., Тиванов М.С., Залесский В.Б.* Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов. Минск: Изд. Центр БГУ, 2007. 222 с.

2. *Гибилиско Стэн*. Альтернативная энергетика без тайн. М.: Эксмо, 2010. 368 с.

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

Сорочан Виталий Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры " Системы автоматизированного проектирования " КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vsorochan@mail.ru.

С.А. Лоскутов

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА УПРАВЛЯЕМОЙ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ

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

В настоящее время бесспорным лидером в производстве полупроводниковых приборов являются интегральные микросхемы (ИС) и транзисторы, выполненные на основе структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Вопросы исследования надежности работы указанных приборов остаются безусловно актуальными для производителей данного оборудования.

Одним из наиболее важных факторов, определяющих деградацию полупроводниковых приборов на основе МДП-структур, является зарядовая нестабильность подзатворного диэлектрика. Явления зарядовой нестабильности влияют на рабочие характеристики МДП-транзистора, приводя к сдвигу порогового напряжения, изменению крутизны и дрейфу характеристик прибора [1].

Повышение интереса к исследованию процессов зарядовой нестабильности МДП-структур в условиях инжекции носителей в настоящее время связано с тем, что с повышением степени интеграции КМДП-ИС происходит уменьшение длин каналов и толщин подзатворного диэлектрика интегральных МДП-транзисторов. Поэтому возрастает роль процессов в МДП-структурах, связанных с влиянием сильных электрических полей, которые по своей величине приближаются к инжекционным. Время наработки может быть продлено путем использования низкого рабочего напряжения, но это неизбежно снижает скорость работы транзистора.

Большой научный и практический интерес представляет изучение зарядовой нестабильности МДП-структур в условиях инжекции заряда в диэлектрическую плёнку в сильных электрических полях. В результате изучения процессов, происходящих при инжекции заряда в диэлектрик, появляется возможность определить механизмы деградации и критические режимы работы полупроводниковых приборов, а также наметить пути совершенствования технологии получения диэлектрических плёнок, направленные на создание высоконадёжных приборов.

В качестве основных методов, применяющихся для исследования релаксирующих зарядов, можно выделить: метод вольт-фарадных характеристик (C-V метод) [2], метод зарядовой накачки (CP метод) [3], метод термостимулированной деполяризации (ТСД метод) [4], метод вольт-амперных характеристик (I-V метод) [5].

Одним из перспективных методов исследования зарядовой деградации подзатворного диэлектрика в сильных электрических полях является

метод управляемой токовой нагрузки [6. Его неоспоримым достоинством является отсутствие перекоммутации образца при исследовании. Эта особенность дает возможность получить информацию о процессах, происходящих в подзатворном диэлектрике непосредственно во время сильнополевого воздействия, что существенно повышает информативность исследований.

На рис. 1 представлена диаграмма изменения токовой нагрузки (a) и временная зависимость изменения напряжения на МДП-структуре (b).

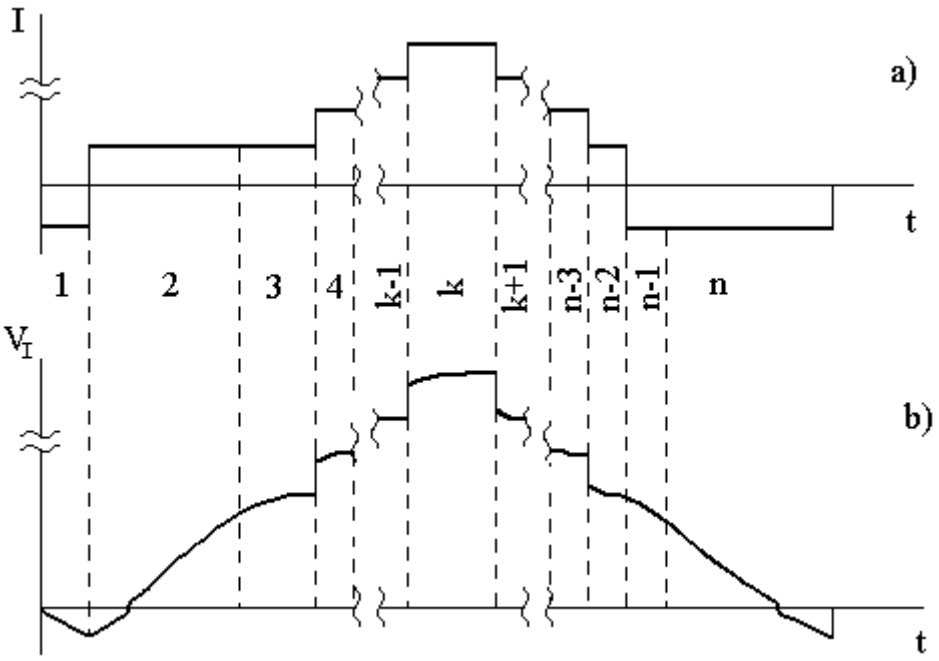

Рис. 1. Временные зависимости токовой нагрузки (a) и напряжения на МДП-структуре (b).

На первом этапе (рис. 1, участок 1) МДП-структуру заряжают импульсом постоянного тока, переводя её в режим аккумуляции или глубокой инверсии. Затем полярность токового импульса изменяют на противоположную (рис. 1, участок 2). Поскольку перезарядка ёмкости на этом участке осуществляется постоянным током, то временную зависимость ёмкости МДП-структуры можно определить по формуле [6]:

$$C(t) = I_2 \cdot \left(\frac{dV_I(t)}{dt} \right)^{-1}$$

где I_2 - амплитуда токового импульса на 2-м участке, t - время.

С помощью данной формулы, с учётом зависимости $V_I(t)$ получаем C-V кривую, которая будет являться низкочастотной C-V зависимостью. При дальнейшем заряде структуры на этом участке весь ток, протекающий через диэлектрик, является емкостным, а емкость МДП-структуры становится величиной постоянной и равной емкости диэлектрика. На участке 2 МДП-структура заряжается постоянным током. В результате можно опре-

делить зависимости: низкочастотной емкости МДП-структуры от смещающего напряжения, поверхностного потенциала от напряжения и плотности поверхностных состояний от поверхностного потенциала, традиционно получаемые с использованием низкочастотного C-V метода.

При переходе в высоковольтный диапазон (рис. 1, участок 3), когда начинается инжекция заряда в диэлектрик, учет процесса заряда емкости МДП-структуры позволяет определить временную зависимость инжекционного тока по методике, предложенной в [6]. Используя данную зависимость совместно с временной (рис. 1, b) можно определить экспериментальную вольт-амперную характеристику исследуемого образца в области высоких полей. При этом минимальный уровень тока на ВАХ ограничен точностью измерений, а максимальный уровень - значением тока на 3 участке. Данный способ измерения I-V характеристики целесообразно использовать в том случае, когда необходимо минимизировать величину инжектированного заряда. Если же проводят исследование изменения зарядовых характеристик МДП-структур в более широком диапазоне сильных электрических полей, то осуществляют ступенчатое увеличение амплитуды токового воздействия (рис. 1, участки 4, ... , k-1, k; где k - номер участка, на котором производится основная инжекция заряда), а вольт-амперную характеристику получают по значениям тока и напряжения на каждой ступеньке. Количество ступенек определяется требуемой точностью получения ВАХ и конечным значением тока, при котором будет проводиться инжекция заряда в диэлектрик. Длительность ступеньки должна обеспечивать полный заряд емкости МДП-структуры и переход в режим инжекции заряда.

Практическая реализация данного метода была предложена и тщательно апробирована [7]. Оказалось, что за счет флуктуаций измеряемого напряжения временной зависимости на участке 1, ограничения точности измеряемого напряжения, ошибок преобразования и помех точность получения низкочастотной C-V зависимости по предложенной выше формуле невысока, а в некоторых случаях провести интегрирование вообще невозможно.

Для решения этой проблемы предлагается дополнить техническую реализацию описанного метода модулятором постоянного тока на участке 1 рис.1. В качестве сигнала предлагается использовать синусоидальный сигнал частотой 1МГц. Амплитуда высокочастотного сигнала должна быть порядка 10мВ. Выделив из временной зависимости напряжения (кривая b, рис.1) с помощью фильтра высокочастотную составляющую, можно получить высокочастотную C-V зависимость непосредственно при измерении без промежуточной операции.

Для реализации данного расширенного метода предлагается следующая экспериментальная установка:

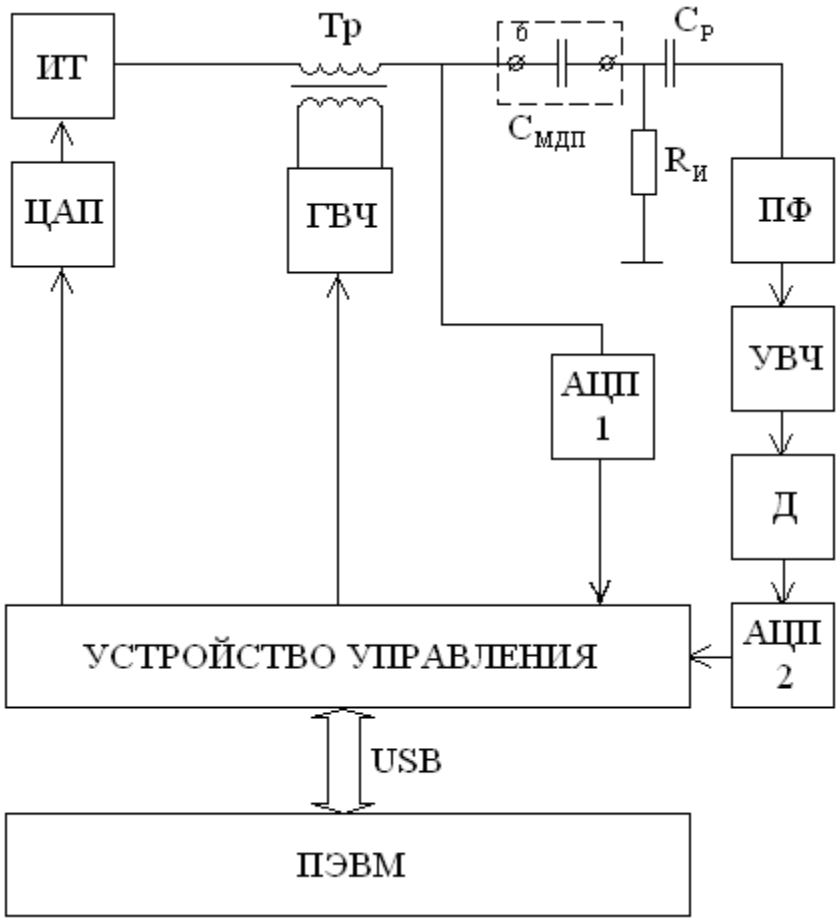

Рис. 2. Установка. Схема структурная.

Основным отличием предлагаемой установки от существующей является наличие цепей для снятия высокочастотной C-V характеристики. Взаимодействие составных частей установки осуществляется следующим образом (рис. 2): Источник тока (ИТ) формирует требуемую токовую нагрузку на тестовой МДП-структуре ($C_{МДП}$), величину и полярность которой задает цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Токовое воздействие имеет низкую скорость изменения амплитуды (единицы секунд), поэтому наличие обмотки высокочастотного трансформатора (Тр) в цепи источника тока не влияет на его работу. Однако, через трансформатор (Тр) в цепь исследуемой МДП-структуры подается высокочастотный сигнал 1МГц амплитудой 10мВ. Этот сигнал формируется генератором высокой частоты (ГВЧ). Временная зависимость напряжения на МДП-структуре измеряется аналого-цифровым преобразователем (АЦП 1). Высокочастотный сигнал выделяется на резисторе $R_И$ и через разделительный конденсатор $C_Р$ поступает на полосовой фильтр (ПФ), настроенный на частоту 1МГц. Выделенный сигнал усиливается усилителем высокой частоты (УВЧ), детектируется детектором (Д) и преобразуется в цифровой код аналого-цифровым преобразователем (АЦП 2). Управление составными частями установки и

сбор данных осуществляется устройством управления, связанным с ПЭВМ по шине USB.

Программное обеспечение ПЭВМ позволяет задать произвольное токовое воздействие (кривая a рис. 1), получить после измерения временную зависимость напряжения на МДП-структуре (кривая b рис. 1), и высокочастотную вольт-фарадную зависимость (C-V). По полученным зависимостям можно произвести расчет интересующих физических величин.

Список литературы

1. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. Кн.1/Пер. с англ. Под ред. Р.А.Суриса. -М.: Мир, 1984. 456с.
2. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов.- М.: Высшая школа, 1987.- С. 239.
3. А.И. Назаров и др. «Исследование неоднородной деградации МДП-транзисторов методом зарядовой накачки». Микроэлектроника. Том 23. Вып. 4. 1994 г.
4. Гороховатский Ю.А. Основы термополяризационного анализа.- М.: Наука, 1981.- 176 с.
5. Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П. Электроника слоев SiO_2 на кремнии.- Л.: ЛГУ, 1988.-304 с.
6. Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. Метод постоянного тока в контроле МДП-структур // Петербургский журнал электроники. 1997. № 3. С.69-72.
7. В.В.Андреев, В.Г.Барышев, С.А.Лоскутов, А.А.Столяров, И.В.Чухраев Использование метода управляемой токовой нагрузки для контроля изменения зарядового состояния МДП-структур после стрессовых воздействий. Материалы докладов Международного научно-техн. Семинара “Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах”. Москва. 2000. С.291-295.

Лоскутов Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: SergeL-75@yandex.ru.

Н.Н. Чернова, В.В. Андреев

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛА ДИОДНО-РЕЗИСТИВНОЙ СБОРКИ

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

В настоящее время в качестве регулятора напряжения бортовой системы автомобиля широко используются диодно-резистивные сборки. Резистор является токозадающим, а диод – ограничивает электронику автомобиля от индуктивных выбросов напряжения в генераторе.

Целью данной работы являлась оптимизация технологического процесса изготовления кристалла диодно-резистивной сборки для обеспечения предотвращения закоротки поликремневых резисторов на базу.

Для диодно-резистивных сборок (ЕП-5, выпускаемой на ОАО «Восход» - Калужский радиоламповый завод) используются пластины кремния, с исходной структурой $100\frac{40КДБ12}{420КДБ0,0035(111)}$.

После разгонки бор-охраны на пластинах образуется окисел $SiO_2 = 0,6 - 0,8мкм$. Пластины были отправлены на следующие операции в соответствии с технологическим маршрутом: осаждение поликремния, легирование поликремния, фотолитография по поликремнию, осаждение межслойной изоляции ТЭОС – $0,8 - 1,0мкм$, фотолитография контактные окна.

Время травления ТЭОС + SiO_2 на фотолитографии составило 35 минут. При этом над поликремнием только ТЭОС, который травится 20 минут. Следовательно, перетрав на контактных окнах к поликремнию составляет 15 минут.

Из-за продолжительного времени травления образуется значительный растрав контактных окон к поликремневым резисторам, что приводит к уменьшению надёжности прибора и процента выхода годных. Зазор между контактными окнами к резисторам и контактными окнами к кремнию становится минимальным.

Возможные способы решения проблемы:

1. Увеличение размеров кристалла за счёт увеличения зазоров между контактными окнами к резисторам и контактными окнами к кремнию.

Из-за высокой цены кремневых пластин этот метод является экономически невыгодным.

2. Проведение дополнительной фотолитографии. Именно этот способ рассматривается в данной статье.

После разгонки бор-охраны осадили пленку диоксида кремния (ТЭОС) толщиной $0,5-0,6 мкм$. Затем проводим дополнительную фотолитографию для получения контактных окон. Время травления осажденного SiO_2 (ТЭОС) и SiO_2, полученного термическим окислением составило 25 минут.

Далее для обеспечения требуемого пробивного напряжения $U_{пр} \geq 160 B$ провели термическое окисление кремния и получали тонкую пленку $SiO_2 = 0,2-0,3 мкм$. Затем, пластины были отправлены на следующие операции в соответствии с технологическим маршрутом. Время травления SiO_2 (ТЭОС) на фотолитографии составило 25 минут. Растрав контактных окон незначительный по сравнению с травлением 35 минут.

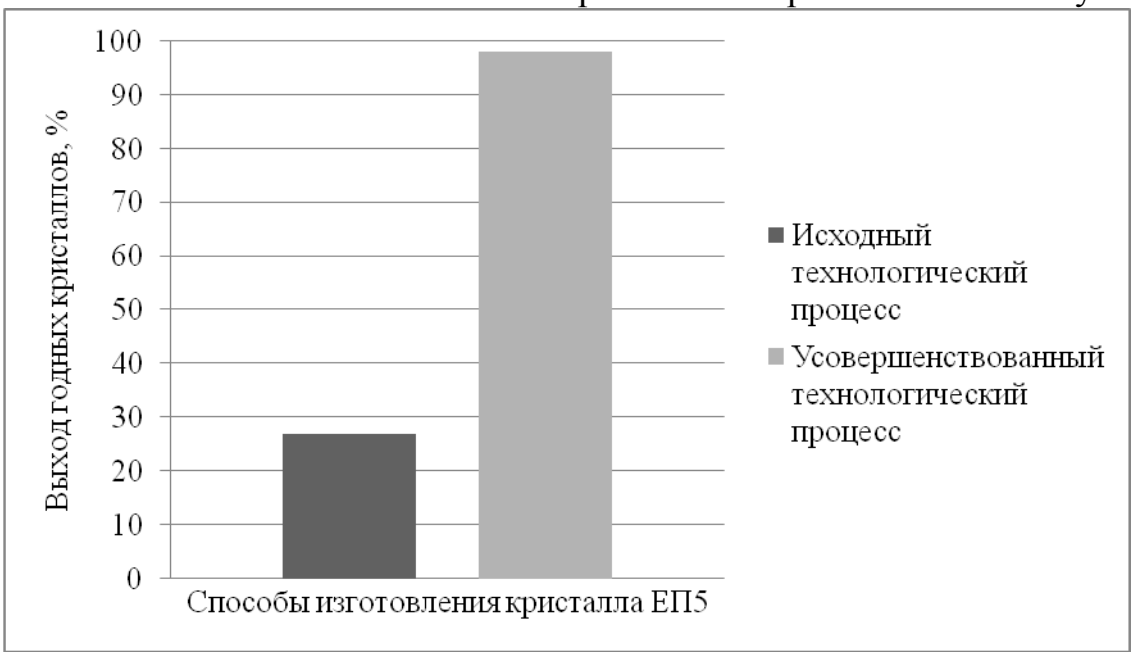

Рис. 1. Процент выхода годных кристаллов

По результатам проведённой работы был сделан вывод, что при выполнении дополнительной фотолитографии существенно повышается надёжность и выход годных изделий. После испытания у заказчика было принято решение о внедрении дополнительных операций в постоянную документацию кристалла диодно-резистивной сборки.

Результаты работы были использованы для оптимизации технологического процесса изготовления кристалла диодно-резистивной сборки на ОАО «Восход» - Калужский радиоламповый завод.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник: Монография.− М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

[2] Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Васютин М.С., Коротков С.И. Влияние температуры на инжекционную модификацию диэлектрических пленок МДП-структур. Перспективные материалы. 2008, № 5, с. 26–30.

Чернова Наталья Николаевна – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nataly_mrr@gmail.com.

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

Д.В. Андреев, А.А. Столяров

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ И ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП-СТРУКТУР

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

Легирование пленки подзатворного диэлектрика на основе термического диоксида кремния фосфором может применяться специально для стабилизации характеристик приборов [1,2] или возникать при использовании затворов из поликристаллического кремния, легированного фосфором [3]. Наличие плёнки ФСС существенно меняет характер изменения зарядового состояния МДП-структур как при сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик, так и при радиационном облучении по сравнению со структурами на основе термической пленки SiO_2, не легированной фосфором. Основной проблемой при создании диэлектрических пленок для полупроводниковых приборов на основе МДП-структур, позволяющих управлять параметрами приборов путем инжекционной и радиационной модификации после их изготовления, является создание требуемой оптимальной структуры диэлектрической пленки, обеспечивающей эффективный захват носителей заряда на ловушки и обладающей высокой инжекционной и радиационной стойкостью и низкой зарядовой дефектностью [2-4]. Всё это обуславливает необходимость комплексного и всестороннего исследования технологического процесса легирования плёнки SiO_2 фосфором и самой структуры SiO_2 - ФСС с целью оптимизации параметров диэлектрической пленки, необходимой для МДП-приборов с инжекционной модификацией параметров.

В данной работе рассмотрена возможность модификации МДП-структур с пленкой SiO_2, легированной фосфором путём сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик и облучения кристаллов низкоэнергетичными электронами, а также проведено исследование режимов легирования пленки SiO_2 фосфором на характеристики МДП-структур.

В качестве экспериментальных образцов использовались тестовые МДП-конденсаторы на основе термического диоксида кремния (SiO_2) и пленки SiO_2, легированные фосфором, изготовленные на кремнии n-типа. Двуокись кремния толщиной 7÷50 нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температурах 850÷1000 °С с добавлением 3% HCl. Пленку ФСС толщиной 3 ÷ 22 нм формировали диффузией фосфора из газовой фазы путем пиролиза смеси $POCl_3$-O_2 при температуре 900 °С или легированием из поликремневого затвора. С целью получения экспериментальных образцов с различной толщиной ФСС варьировалось

время загонки фосфора в пределах от 1,5 до 7 минут. Затем для окончательного формирования пленки ФСС в течение 15 минут пластины отжигались в атмосфере азота при температуре 1000°С. В качестве затвора использовались плёнки поликремния (Si*), легированные фосфором и пленки алюминия площадью $10^{-4} \div 10^{-2}$ см^2.

Толщина плёнки ФСС измерялась методом химического травления в селективном травителе (азотная кислота – 31 мл, фтористоводородная кислота – 46 мл, вода деионизованная – 923 мл). Толщина плёнки ФСС определялась как разность толщины диэлектрической плёнки (измеренной элипсометрическим методом) до и после травления [5].

Для инжекционной модификации электрофизических характеристик МДП-структур использовалась сильнополевая туннельная инжекция электронов из кремниевой подложки [6-8] в режиме протекания постоянного инжекционного тока плотностью от 0,1 мкА/см^2 до 10 мА/см^2 в диапазоне температур от 20 до 100 °С. В процессе инжекции осуществлялся контроль напряжения на МДП-структуре, что позволило получить информацию об изменении зарядового состояния диэлектрической пленки непосредственно в процессе модификации. Для определения величины термостабильной компоненты накопленного в диэлектрике отрицательного заряда после инжекционных и радиационных обработок МДП-структуры подвергались отжигу при температуре 200 ºС в течение времени от 200 с до 30 мин.

Изменение зарядового состояния МДП-структур контролировалось с использованием высокочастотного C-V метода и метода многоуровневой токовой нагрузки [8]. В течение сильнополевой инжекции в режиме протекания постоянного тока измерялось приращение напряжения на МДП-структуре ΔV_I, характеризующее изменение зарядового состояния исследуемого образца [2,3,8].

Для изучения влияния воздействия электронного облучения на характеристики МДП-структур использовался растровый электронный микроскоп EVO 40 фирмы Zeiss. С его помощью было проведено облучение МДП-структур электронами с энергией от 15 до 20 кэВ и током пучка I = 8 нА с флюенсом до $5 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$.

В работе было проведено сравнительное исследование модификации зарядового состояния МДП-структур путем сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик и облучении структур электронами. Отличительной особенностью МДП-структур с двухслойным диэлектриком SiO_2-ФСС при сильнополевой инжекции электронов является накопление отрицательного заряда в пленке ФСС [1,3,4,9].

На рис.1 приведены зависимости приращения напряжения на МДП-структуре в процессе инжекционной модификации постоянным током (1) и приращения напряжения, обусловленного интегральным зарядом на поверхностных состояниях (2), а также изменение этих зависимостей после отжига при 200 ºС (1',2') от количества инжектированных электронов. Для

реализации режима сильнополевой инжекции электронов из кремниевой подложки к затвору МДП-транзистора прикладывался импульс постоянного тока плотностью 1 мкА/см^2. На рис. 1 плотность инжектированных электронов $N = Q_{inj} / q$, где Q_{inj} – заряд, инжектированный в диэлектрик; q – заряд электрона.

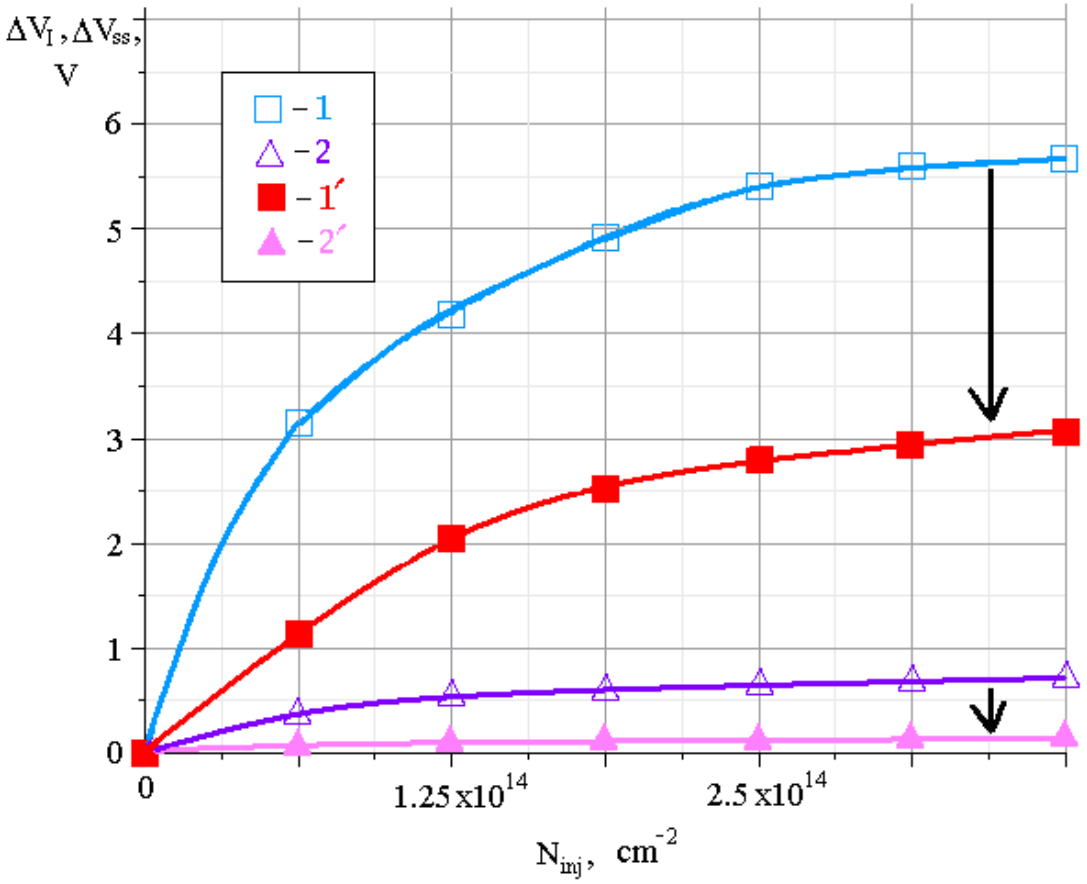

Рис. 1. Зависимости приращения напряжения на МДП-структуре в процессе инжекционной модификации постоянным током (1) и приращения напряжения, обусловленного интегральным зарядом на поверхностных состояниях (2), а также изменение этих зависимостей после отжига при 200 ºС (1',2') от количества инжектированных электронов.

Для радиационной модификации МДП-структур в работе использовалось облучение электронами с энергией от 15 до 20 кэВ, что гарантированно обеспечивало длину их пробега больше толщины затвора. Установлено, что при облучении МДП-структур с пленкой SiO_2-ФСС электронами с энергией, обеспечивающей их прохождение через затвор и диэлектрическую пленку, наблюдается существенное увеличение плотности поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO_2 и накопление в объеме подзатворного диэлектрика в пленке ФСС отрицательного заряда. На рис.2 приведены зависимости приращения напряжения на МДП-структуре при радиационной модификации (1) и приращения напряжения, обусловленного интегральным зарядом на поверхностных состояниях (2), а также измене-

ние этих зависимостей после отжига при 200 ºС (1',2') от флюенса электронов (18 keV) кривые (2,2').

Как видно из рис. 1 и 2 при облучении электронами накапливается более низкая плотность отрицательного заряда в подзатворном диэлектрике, по сравнению с сильнополевой инжекцией.

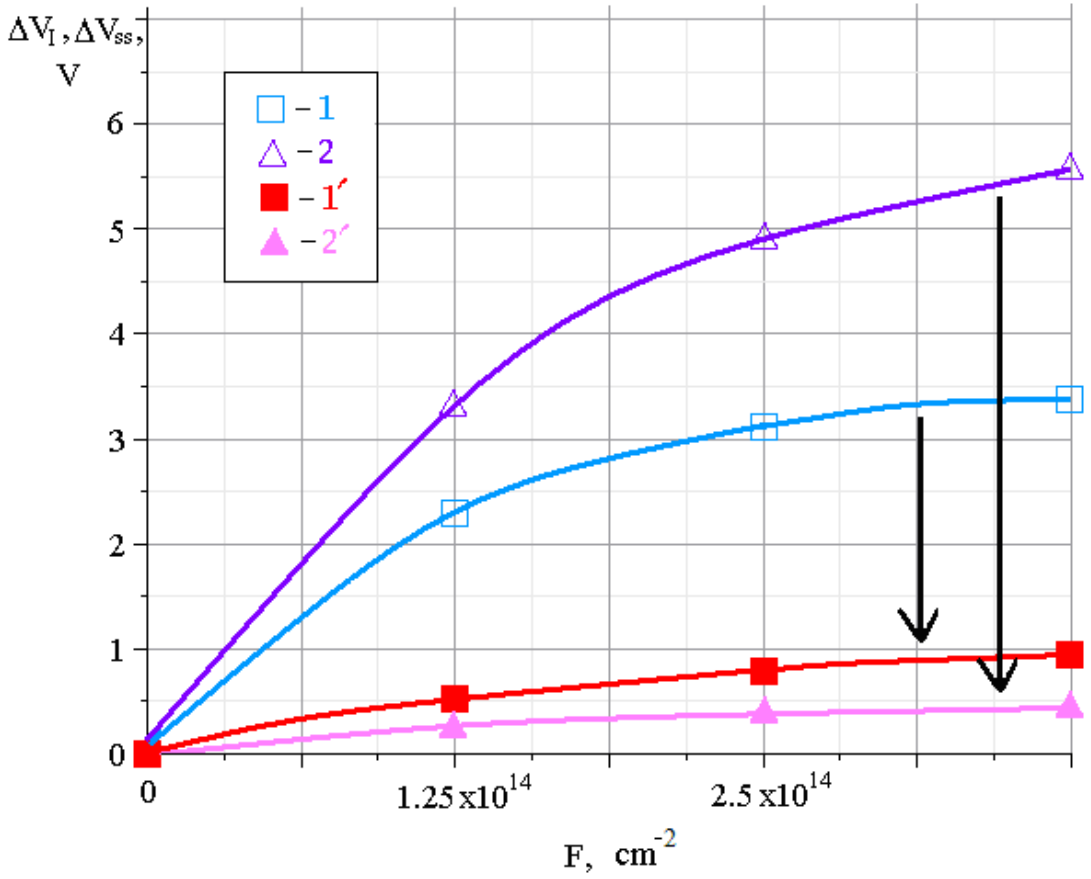

Рис.2. Зависимости приращения напряжения на МДП-структуре при радиационной модификации (1) и приращения напряжения, обусловленного интегральным зарядом на поверхностных состояниях (2), а также изменение этих зависимостей после отжига при 200 ºС (1',2') от флюенса электронов (18 keV) кривые (2,2').

При инжекции электронов из кремния с увеличением толщины слоя ФСС увеличивается диапазон возможных изменений порогового напряжения МДП-транзисторов. Однако для обеспечения приемлемых значений плотности поверхностных состояний величина инжектированного заряда при корректировке порогового напряжения не должна превышать 0,3 мКл/см^2. Диапазон токового воздействия при изменении зарядового состояния МДП-приборов целесообразно ограничить $10^{-7} \div 10^{-5}$ А/см^2. Уменьшение амплитуды токового воздействия сопровождается трудностями технической реализации и нецелесообразно в связи со значительным возрастанием времени инжекции требуемой величины заряда. Увеличение плотности инжекционного тока приводит к значительному возрастанию

вероятности пробоя образца, а также к повышению плотности поверхностных состояний на границе $Si\text{-}SiO_2$ [9] при инжекции электронов из Si.

Таким образом, установлено, что отрицательный заряд, накапливающийся в плёнке ФСС в структурах с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO_2-ФСС как в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов, так и при электронном облучении может использоваться для модификации МДП-приборов. Показано, что применение сильнополевой инжекции электронов для модификации зарядового состояния МДП-структур предпочтительнее использования электронного облучения, поскольку появляется возможность индивидуальной коррекции характеристик каждого прибора и при определенных режимах сильнополевой инжекции можно значительно снизить сопутствующие деградационные процессы.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ (проект № 1117), а также при финансовой поддержке РФФИ и администрации Калужской области (грант № 14-42-03057).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Strong A.W., Wu E.Y., Vollertsen R., Suñé J., Rosa G.L., Rauch S.E., Sullivan T.D. Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies. Wiley-IEEE Press. 2009. ISBN: 0471731722. 624 p.

[2] Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Drach V.E. Plasma and injection modification of gate dielectric in MOS structures// Thin solid films. 2003. V.427. P.377-380.

[3] Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A., Tkachenko A.L. Modification of metal-oxide-semiconductor devices by electron injection in high-fields// Vacuum. 2002. Vol. 67/3-4. P.507-511.

[4] Levin M. N., Tatarintsev A. V., Makarenko V. A., V. R. Gitlin X-ray or UV adjustment of MOS threshold voltage: Analytical and numerical modeling// Russian Microelectronics. 2006. Volume 35. Issue 5. P. 329-336.

[5] Andreev V.V., Baryshev V.G., Bondarenko G.G., Stolyarov A.A., Shakhnov V.A. Charge degradation of MIS structures with phosphosilicate glass-passivated thermal silicon oxide at high-field tunnel injection // Russian microelectronics, 1997, vol. 26. p.378.

[6] Afanas'ev V.V., Stesmans A. Internal photoemission at interfaces of high-k insulators with semiconductors and metals// J. Appl. Phys. 2007, v. 102, p. 081301.

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

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

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

Андреев Дмитрий Владимирович – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru.

Столяров Александр Алексеевич – д-р техн. наук, заместитель директора по научно-исследовательской работе КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alalstol@mail.ru.

В.Г. Дмитриев

УСТАНОВКА ИНЖЕКЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ НАНОРАЗМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЁНОК

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

Уменьшение проектных норм в мироэлектронике приводит к уменьшению толщины диэлектрических слоёв, применяемых в производстве микросхем. В свою очередь качество диэлектрических слоёв определяет надёжность и электрофизические характеристики микроэлектронных приборов, выполненных по МДП-технологии. Таким образом, контроль качества тонких диэлектрических плёнок является важной задачей.

Для исследования характеристик тонких диэлектрических плёнок в МДП-приборах широко применяются методы вольт-фарадных характеристик и сильнополевой инжекции заряда в диэлектрик [1-5]. Метод управляемой токовой нагрузки позволяет определять в рамках одного метода параметры, которые ранее можно было определить, только используя различные методики [2,3].

Для контроля параметров тонких диэлектрических слоёв в производственных и лабораторных условиях была разработана установка, структурная схема которой представлена на рисунке 1.

Установка состоит из следующих основных блоков: управляемого источника тока, контактирующего устройства, блока сбора данных и управления, состоящего из шасси NI cDAQ-9172, в которое установлены модули АЦП NI 9205, ЦАП NI 9263, цифровой порт NI 9401, источника двуполярного стабилизированного напряжения ±35 В и +12 В (БП), персонального компьютера (ПК) со специализированным программным обеспечением.

Для работы в составе установки был разработан специализированный управляемый источник тока. Он имеет следующие характеристики:

диапазон токовых нагрузок 10^{-11} – 10^{-6} А;

максимальное напряжение на измеряемой структуре ±30 В,

возможность изменения направления протекания инжекционного тока без перекоммутации образца,

плавное изменение амплитуды тока в пределах одного порядка.

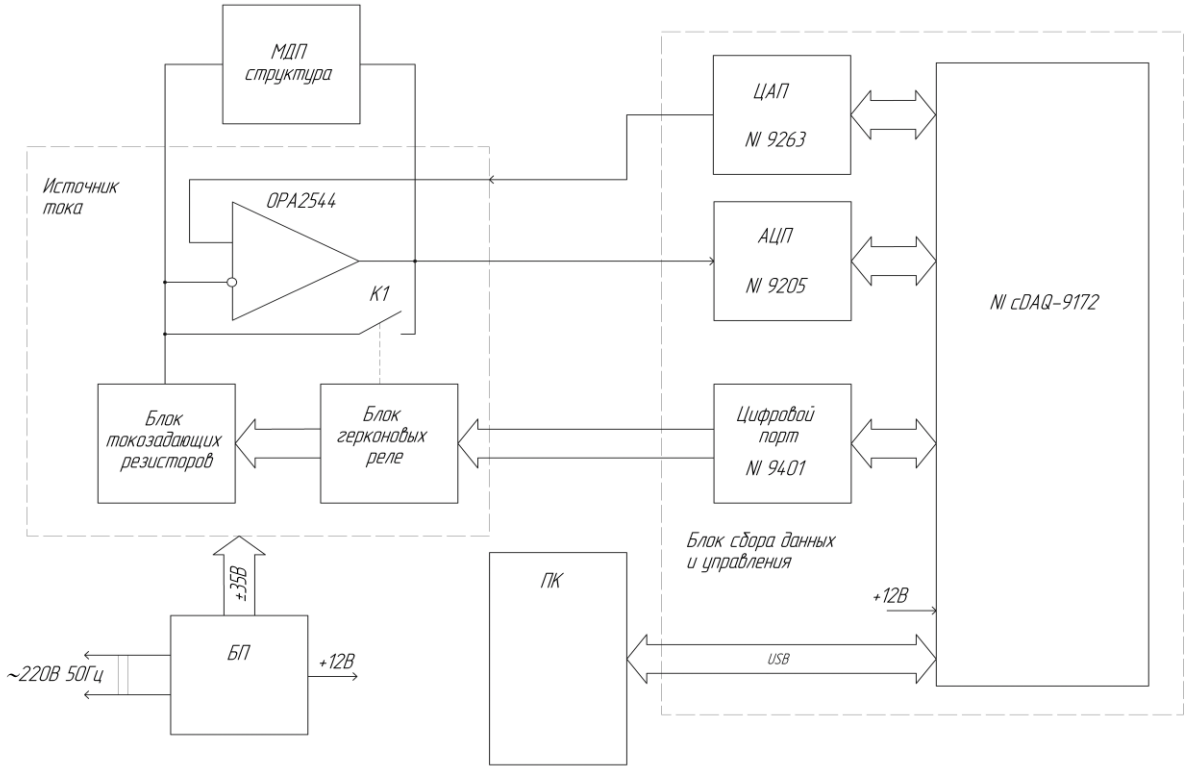

Рис. 1. Структурная схема установки

Упрощенная электрическая схема источника представлена на рис. 2.

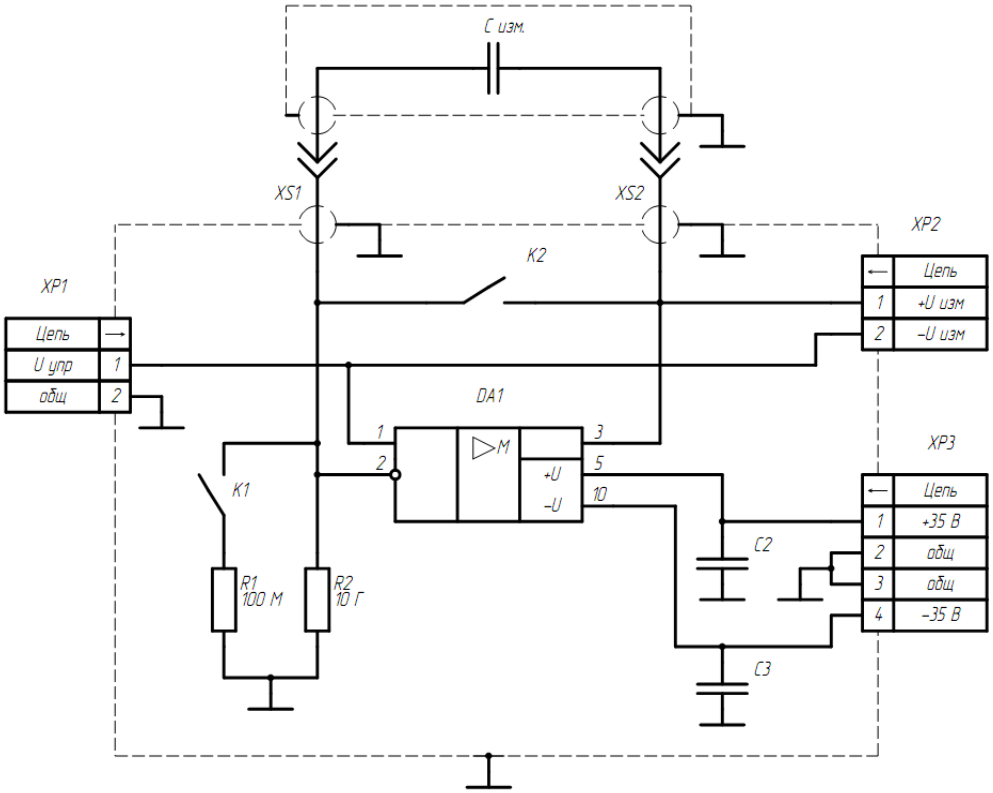

Рис. 2. Упрощенная электрическая схема управляемого источника тока

Управляемый источник тока выполнен на операционном усилителе OPA2544 фирмы BURR-BROWN (DA1) по схеме с незаземлённой нагрузкой. В качестве токозадающих применены 6 резисторов с сопротивлением

от 10^5 до 10^{10} Ом, что позволяет получать, при опорном напряжении 0,1 В, токи от 10^{-11} до 10^{-6} А. На схеме условно показаны два из них. Коммутация резисторов осуществляется при помощи герконовых реле.

Напряжение питания подаётся на схему через разъём XP3.

Ток, протекающий через тестируемую структуру, определяется из выражения:

$$I_{изм} = \frac{U_{упр}}{R},$$

где $U_{упр}$ – опорное напряжение, R – токозадающее сопротивление.

Опорное напряжение подаётся от ЦАП через разъём XP1. При изменении величины опорного напряжения ток нагрузки плавно изменяется. При изменении полярности опорного напряжения меняется направление тока.

Напряжение на выходе схемы равно сумме напряжения на тестируемой структуре и опорного напряжения. Чтобы избежать необходимости вычитать опорное напряжение из напряжения на структуре, АЦП подключается между входом опорного напряжения и выходом источника тока через разъём XP2.

Контактирующее устройство с тестируемой структурой подключается к источнику тока через коаксиальные разъёмы XS1, XS2. Одно из герконовых реле замыкает подключенную структуру накоротко до начала измерений.

Источник тока собран в металлическом корпусе. Для уменьшения токов утечки все элементы смонтированы навесным монтажом, непосредственно на выводах операционного усилителя и реле.

Для сбора данных и управления установкой используются шасси NI cDAQ-9172 с установленными в него модулями C-серии фирмы National Instruments. Применение готовых модулей позволило значительно сократить время разработки и изготовления установки, а также упростить процесс написания управляющего программного обеспечения для ПК.

Измерение напряжения на тестируемой структуре осуществляется с помощью модуля АЦП NI 9205, содержащего 16 дифференциальных либо 32 несимметричных 16 разрядных каналов АЦП, позволяющих измерять двуполярное напряжение в пределах от -10 В до +10 В с частотой дискретизации до 250 кГц. Наличие дифференциального входа позволяет подключать АЦП к источнику тока так, что не требуется вычитание опорного напряжения из результатов измерений.

Опорное напряжение на источник тока подаётся с модуля ЦАП NI 9263. Он представляет собой 4-х канальный 16 разрядный ЦАП с выходным напряжением от –10 до +10 В и частотой преобразования до 100 кГц.

Управление герконовыми реле осуществляется непосредственно с помощью цифрового порта NI 9401. Он содержит 8 цифровых линий, которые могут быть настроены как входы либо выходы. Уровни входного и выходного напряжения соответствуют уровням ТТЛ, а нагрузочная способность позволяет непосредственно управлять герконовыми реле, потребляющими ток 12 - 15 мА.

Управляющая программа для ПК написана в среде LabView. Управление установкой осуществляется с помощью лицевой панели виртуального прибора. На ней отображается график зависимости напряжения на структуре от времени и органы управления установкой. Данные измерений могут быть записаны в файл на жестком диске ПК для последующей обработки.

В настоящее время на установке проводятся измерения параметров диэлектрических плёнок МДП-приборов, изготовленных на ОАО «Восход Восход - Калужский радиоламповый завод».

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ (проект № 1117).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. – М.: Высшая школа, 1987. – С.239.

[2] Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник. Монография. М. МГТУ им. Н.Э. Баумана 2004. 254 с.

[3] Андреев В.В., Столяров А.А., Дмитриев В.Г., Романов А.В. Инжекционные методы контроля подзатворного диэлектрика МДП-ИМС // Наукоемкие технологии. 2012. Т.13. № 10. С.20-28.

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

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

Дмитриев Виктор Геннадьевич — ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: victor116@ya.ru.

СЕКЦИЯ 4.

ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.438

Е.Г. Липихин, А.А. Жинов, Д.В. Шевелев

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ БРОСОВОГО ТЕПЛА ГТУ

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

Представлен обзор высокотемпературных теплообменных аппаратов, применяемых для регенерации тепла выхлопных газов газотурбинных установок с целью повышения эффективности цикла вследствие возникающих потерь энергии. Содержатся сведения о кожухотрубных, пластинчатых, пластинчато-ребристых поверхностях теплообмена, которые применяются для передачи тепла между теплоносителями при регенеративном подогреве воздуха, в схемах комбинированных электростанций и для совместного производства тепловой и электрической энергии, так же приведены типы теплообменных аппаратов по типу передачи теплоты и конструктивному исполнению. Кроме того, освещены специфические требования, предъявляемые к данным устройствам, а так же особенности используемых для их производства материалов. Уделено внимание керамике, способной выдерживать воздействие агрессивных сред и значительные термические напряжения, использование которой позволит преодолеть возникающие сложности при разработке и эксплуатации высокотемпературных теплообменных аппаратов.

Ключевые слова: *Высокотемпературные теплообменные аппараты, утилизация бросового тепла, эффективность теплопередачи, керамические материалы*

Целью работы является обзор класса высокотемпературных теплообменных аппаратов, которые нашли себе применение в качестве устройств, позволяющих повысить эффективность циклов энергетических установок.

В настоящее время на рынке энергетических установок в широком диапазоне мощностей – от 100 кВт до 60 МВт одно из доминирующих положений занимают газотурбинные установки (ГТУ) [1]. Причина этого – такие достоинства ГТУ как компактность, маневренность, легкость и быстрота запуска при любых температурах окружающей среды, возможность быстрого развертывания дополнительных мощностей. К числу основных недостатков ГТУ простого цикла следует отнести большие потери тепловой энергии с выхлопными газами, которые имеют высокую температуру – порядка 375–550°С [2].

Полезное использование теплоты уходящих газов ГТУ возможно различными способами, основными из которых являются:

1. Регенеративный подогрев воздуха перед камерой сгорания ГТУ для повышения эффективности энергетической установки;

2. Создание комбинированных энергетических установок, где теплота выхлопных газов ГТУ используется для получения пара, который используется в качестве рабочего тела в цикле паротурбинной установки;

3. В когенерационных установках, производящих как электрическую энергию, так и тепловую, в виде горячей воды для нужд теплоснабжения.

В основе любого из перечисленных способов полезного использования тепла уходящих газов ГТУ лежит использование теплообменного аппарата (ТА).

Классификация применяемых для этого ТА весьма разнообразна [3]. По способу передачи теплоты между теплоносителями они могут быть:

1. Регенеративные. Эти устройства состоят из теплоемкостного элемента, который подвергается поочередному воздействию теплоносителей.

2. Рекуперативные. При таком способе теплопередачи теплоносители разделены стенкой и одновременно движутся по каналам.

По схеме движения теплоносителей ТА подразделяются на прямоточные, противоточные и комбинированные.

По конструктивному исполнению их можно разделить на кожухотрубные с гладкими и оребренными трубами, пластинчатые, пластинчато-ребристые (Рис.1).

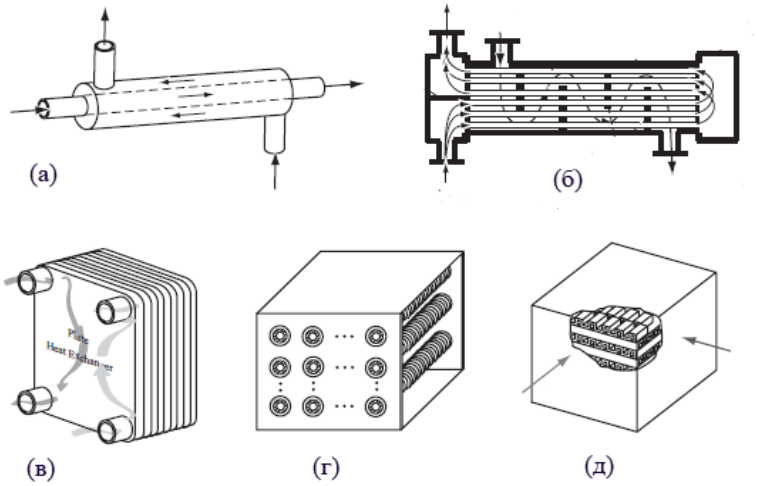

Рис. 1 – Типы теплообменных аппаратов по конструктивному исполнению
а) труба в трубе, (б) кожухотрубный ТА с гладкими трубами, (в) сварной пластинчатый ТА, (г) разборный пластинчатый ТА, (д) пластинчато-ребристые ТА.

Выхлопные газы газотурбинных установок, согласно их температурному интервалу, относятся к источникам бросового тепла среднего потенциала, а теплообменные аппараты для их полезного использования (особенно при использовании дополнительного дожигания топлива) к высокотемпературным ТА [4].

Работа высокотемпературных ТА обладает рядом особенностей по сравнению с низкотемпературными ТА, учет которых необходим при разработке теплообменного оборудования.

1. Значительные термические напряжения, возникающие на режимах запуска, остановки и изменения нагрузки.

2. Лучистый теплообмен играет важную роль в процессе теплопередачи.

3. Обеспечение требуемого ресурса работы требует применения жаропрочных и жаростойких конструкционных материалов.

4. Больший уровень потерь полного давления из-за высокой температуры выхлопных газов.

Указанные особенности эксплуатации формулируют следующие требования к ТА ГТУ:

1. Надежность работы под действием высоких термических нагрузок.

2. Минимальная тепловая емкость ТА для сокращения времени выхода на номинальный режим.

3. Материалы, из которых изготавливается высокотемпературные ТА, должны быть жаростойкими, коррозионностойкими и жаропрочными для сопротивления воздействию высоко нагретых выхлопных газов.

Простота монтажа и эксплуатации.

Для высокотемпературных ТА характерно [5]:

1. Шаг трубного пучка больше чем в низкотемпературных ТА для снижения потерь полного давления;

2. Большой уровень потерь полного давления может требовать включения в конструкцию котла-утилизатора вытяжного дымососа;

3. В случае сильного загрязнения дымовых газов золообразующими компонентами не используются оребренные теплообменные поверхности.

Для компенсации значительных тепловых расширений применяются ТА байонетного типа [6]. Они представляют собой кожухотрубные аппараты, теплообменные поверхности которых выполнены в виде набора концентрических труб. Наружная трубка герметично закреплена только с одного конца, внутренняя может свободно перемещаться в осевом направлении. Подогреваемый воздух, поступающий в теплообменник, проходит через трубку с меньшим диаметром, потом меняет свое направление в месте, где запаяна внешняя трубка и далее движется по кольцевому сечению. Горячие выхлопные газы движутся подобным образом внутри кожуха и подогревают воздушный поток.

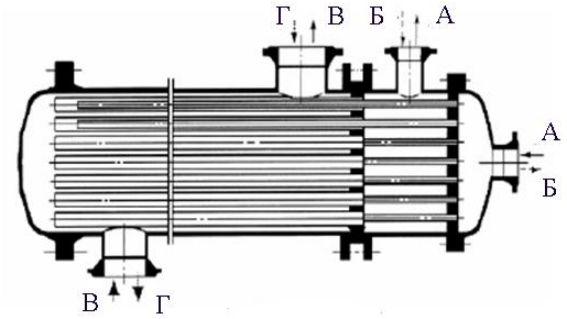

Рис. 2 - ТА байонетного типа

А, Б – вход и выход холодного теплоносителя, В, Г –вход и выход горячего теплоносителя

Главным достоинством труб такого типа является то, что они закреплены только с одной стороны и могут свободно удлиняться и расширяться, следовательно, они менее подвержены нагрузкам, возникающим при воздействии высоких температур.

В качестве материалов для ТА ГТУ используются [7,8,9]:

- Ферритные стали, которые используются при температурах до 750°С.
- Высокотемпературные сплавы на основе никеля (до 1200 К) к их достоинствам следует отнести слабую восприимчивость к агрессивным средам.
- Композитные материалы на основе углерода и карбида кремния, которые имеют хорошие прочностные свойства даже при температурах превышающие 1000°С.
- Керамические материалы на основе порошка оксида алюминия и карбида кремния.

Свойства материалов для производства высокотемпературных ТА приведены в Таблице 1.

Таблица 1– свойства применяемых материалов для ВТК

Параметр	Сплавы на основе никеля	Керамические материалы на основе Al, Si, Ti, SiN, AlN	Композитные материалы на основе углерода	Композитное волокно SiC
Интервал рабочих температур, °С	1000	1500-2500	1400-1650	1400-1650
Предел прочности, МПа	800-1360	48-2000	33	1400-4500
Модуль упругости, ГПа	50	140-600	4,8	140-720
Теплопроводность, Вт/(мК)	11,2	0,05-300	80-240	Свыше 1200
Ключевые особенности	Сварные швы в ТА являются слабым звеном при термическом рассширении	Дорогостоящее производство, сложная техология изготовления ТА	Короткий эксплуатационный ресурс	Относительно недорогое производство, доступность

Изготовление пластинчатых и пластинчато-ребристых ТА из металлических сплавов требует применения сварки, что наводит на трудность получения сварного шва или припоя, способного выдержать термические воздействия. В связи с этим были разработаны специальные высокотемпературные порошковые припои на основе никеля, способные работать при температурах выше $1000^{\circ}C$, характеристики которых подробно освещены в [10].

В настоящее время большое внимание уделяется керамическим теплообменникам так как они стойки к высоким термическим нагрузкам, обладают хорошей теплопроводностью и стойки в агрессивных средах, что особенно важно, когда ГТУ работает на низкосортном топливе, так как выхлопные газы в этом случае содержат в большом количестве SO_2 и NO_x, которые вызывают коррозию у металлических сплавов.

Существует ряд проблем, с которыми сталкиваются при использовании керамических ТА, [5, 11]:

- Высокая стоимость производства керамических труб;
- Трудно получить длинные теплообменные трубки с требуемыми свойствами, так как современные технологии еще нуждаются в улучшении;
- Схема труба-в-трубе при использовании керамики не является абсолютно герметичной вследствие термических расширений;
- Коэффициент теплового расширения может меняться со временем вследствие реакции с некоторыми веществами, которые содержатся в выхлопе.
- Не до конца изучено поведение керамики в случае использования крупных теплообменников.

В заключении следует отметить, что высокотемпературные компактные теплообменники позволяют повысить эффективность цикла ГТУ за счет регенерации тепла выхлопных газов или создания на его основе комбинированных парогазовых установок. Это дает возможность снизить потребление топлива, что приводит к положительному экономическому эффекту, а так же уменьшает вредное воздействие на окружающую среду, так же это способствует расширению области использования таких энергетических установок. Поэтому, несмотря на множество ограничений и специфические требования, накладываемые на теплообменные аппараты, они все чаще применяются для транспортных и стационарных установок. Следовательно, необходимо дальнейшее развитие и внедрение перспективных технологий в этой сфере.

Литература

[1]. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. *Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций*: Учебное пособие для вузов/ под ред. С.В. Цанева – М.:Издательство МЭИ, 2009. – 584 с.

[2]. Каталог энергетического оборудования 2011 г. Том 1. Каталог газотурбинного оборудования. Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2011 г. – 392 с.

[3]. Kuppan Thulukkanam. *Heat Exchanger Design Handbook*, CRC Press, 2013– 1186 p

[4]. V. Ganapathy. *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generator. Design, Applications and Calculation*, 2003 – 618 p.

[5]. *High Temperature Heat Exchangers Bent Sunden Proceedins of Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers*: Science, Engineering and Tecnology, Hoboken, NJ, September, 2005, p. 226–238.

[6]. T O'Doherty, A.J Jolly, C.J Bates. *Analysis of a bayonet tube heat exchanger Applied Thermal Engineering* Volume 21, Issue 1, 1 January 2001, Pages 1–18.

[7]. Lee HoSung. *Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells.* John Wiley & Sons, Inc. 2011, 630 p.

[8]. Aquaro D., Pieve M. *High Temperature Heat Exchangers for power plants: performance of advanced metallic recuperators*. Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology, At Whistler, BC, Canada, 2005, 246 p.

[9]. Hechanova A. *High Temperature Heat Exchanger Annual Report.* University of Nevada, Las Vegas, 2008, 38 p.

[10]. Ткачев В.А., Федючук А.К., Калинина Н.Е. *Изготовление паяных панелей теплообменников. Авиационно-космическая техника и технология.* Научно-технический журнал. Январь-февраль, 2005, 5-11 с.

[11]. Vijaisri N. *Numerical Study of a Novel Fin Configuration of a High Temperature Ceramic Plate Fin Heat Exchanger*. University of Nevada, Las VegasMay. 2014, 229 с.

Липихин Евгений Геннадьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Evgeny.Lipihin@yandex.ru.

Жинов Андрей Александрович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru.

Шевелев Денис Владимирович – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: denis.v.shevelev@gmail.com.

E.G. Lipihin, A.A. Zhinov, D.V. Shevelev

HIGH TEMPERATURE HEAT EXCHANGERS FOR UTILIZATION OF WASTE HEAT OF GAS TURBINE PLANTS

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

The article introduces high temperature heat exchangers (HTHE), which are used in gas turbine power plants for waste heat recovery. It says about key features of application and design problems. The basic types of heat exchangers (HE) are given: shell and tube, plate-fin, bayonet-type. Contains information about differences between operating condition of low and high temperature HE are show. Also candidate materials are considered such as alloys steel, composite materials and heat temperature ceramics. This may improve HTHE key characteristics due to resistance to aggressive environments and Heat resistance despite the difficulties in production and operation. The article gives a summary of HTHE which intended for gas turbines cycle efficiency enhancing.

Keywords: *High temperature heat exchangers, waste heat*

Lipihin Evgeny Gennadevich, student of Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: Evgeny.Lipihin@yandex.ru.

Zhinov Andrey Aleksandrovich, Dr. Sci. (Eng.), head of the Heat Engines and Thermal Phisics Department of the Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: jinov@mail.ru.

Shevelev Denis Vladimirovich, ph.D, docent of the Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. E-mail: denis.v.shevelev@gmail.com.

А.А. Сидоров, А.С. Голиков

ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИИ ГЕНЕРАТОРА ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ ИМИТАЦИИ НЕОДНОРОДНОСТИ ДАВЛЕНИЯ В ВЫХЛОПНОМ ОСЕ-РАДИАЛЬНОМ ПАТРУБКЕ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

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

Выходной патрубок-важный элемент парового тракта турбины,существенно влияющий на эффективность турбоустановки. Поэтомуисследованию патрубков посвящено большое число работ. Основноенаправление этих исследований связано, как правило, с разработкойметодов улучшения их аэродинамических характеристик. Необходимо отметить, что при всей важности решаемых задач ряд вопросов, относящихся к работе патрубков, остается практически нетронутым. К ним,прежде всего, относится задача о влиянии патрубка на вибрационноесостояние рабочих лопаток последней ступени. С практической точкизрения необходимо знать, какова интенсивность возмущающих сил, индуцируемых патрубком. В настоящее время известно, что выходной осерадиальный патрубокявляется источником неоднородности давления и скорости потока вобласти, вплотную примыкающей к рабочим лопаткам последней ступени. Эту неоднородность порождают перепад давления, вызванныйповоротом потока на 90◦по отношению к горизонтальному разъему,и вихревое движение среды [1]. Можно предположить, что движениелопаток в таком потоке приводит к возникновению переменных аэродинамических сил. Возможно, интенсивность этих сил невелика, но нарежимах, близких к резонансу, и резонансе рабочих лопаток амплитуды колебаний могут вызывать усталостные процессы в материалелопаток.

В целях экспериментальной оценки степени неоднородности статического давления во входном сечении осерадиального патрубка турбины мощностью 6 МВт были проведены испытания двух моделейпатрубка: математической и физической, уменьшенной в 7,9 раза.

В результате эксперимента были получены данные, которые позволили оценить степень достоверности математической модели[2].

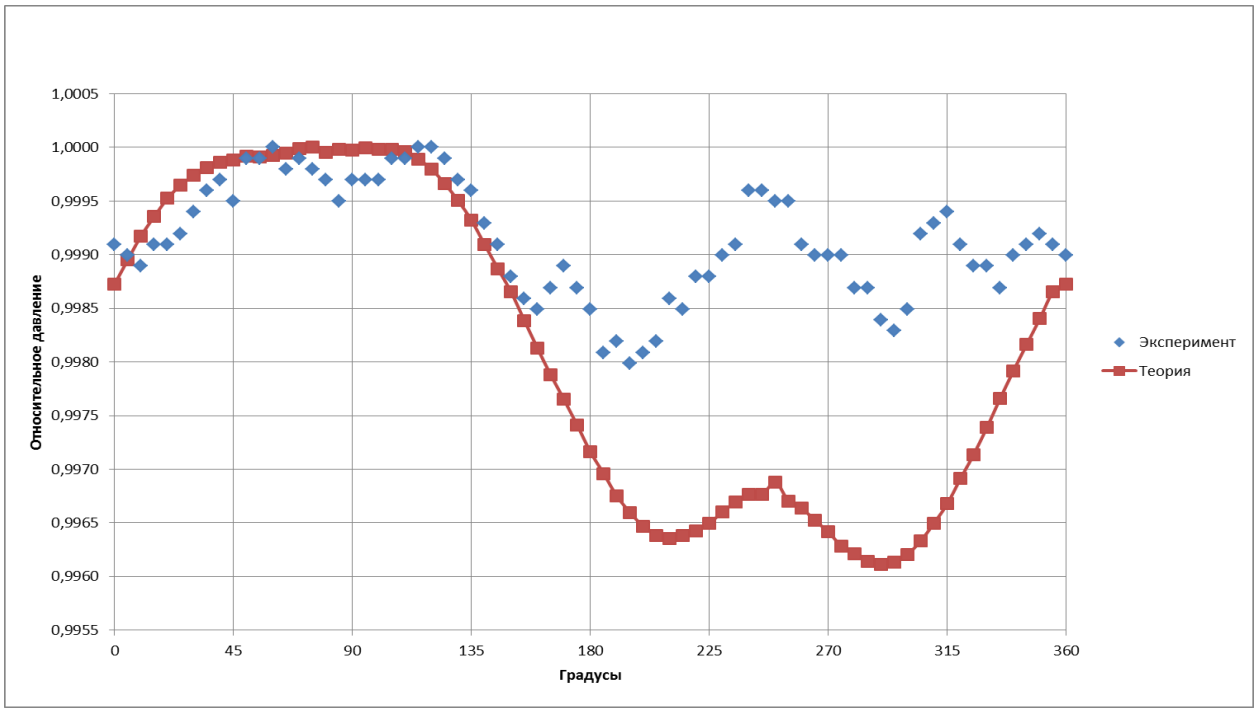

Рис 1. Неравномерность давления, во входном сечении модели выхлопного осерадиального патрубка

Для оценки воздействия патрубка на вибрационное состояние лопаток последней ступени турбины создаётся экспериментальная установка. Одним из главных узлов установки будет генератор возмущений. Его задача заключается в создании в расчетной плоскости неоднородности давления, адекватной полученной теоретически (рис.1).

В данной статье показан сравнительный анализ возмущений, создаваемых различными вариантами конструкций генератора.

На рис.2 представлен генератор в виде вращающегося диска, оснащенного стержнями постоянного диаметра. Стержни с равномерным шагом расположены на ободе диска на половине окружности. На противоположной стороне обода диска поставлен одиночный стержень для создания «всплеска» на эпюре давления (рис.1). На рис.3 показано совмещение неоднородности, полученной с помощью генератора путем компьютерного моделирования, с образцовой эпюрой. Видно, что имитация неоднородности не достигает необходимого качества.

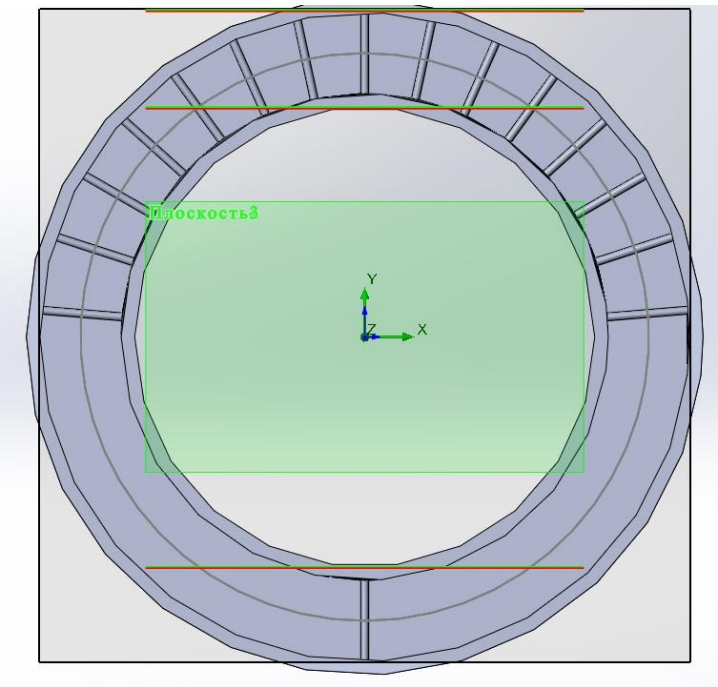

Рис. 2. Генератор неравномерности со стержнями одного диаметра.

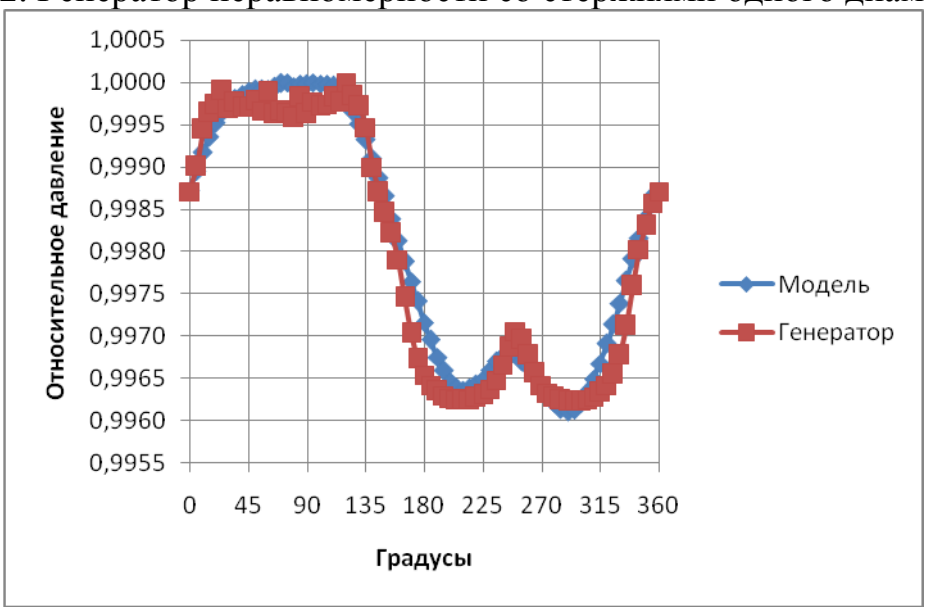

Рис. 3. Сравнение неоднородности давления, возбуждаемого генератором и полученной в ходе эксперимента.

На рис.4 и рис.5 показан второй вариант стержневого генератора со стержнями переменного диаметра и результаты его испытаний. Здесь совмещение с эталоном более полное. Таким образом, изменение диаметра стержней (или их шага позволит) позволит получить эпюру неоднородности полностью адекватную образцу.

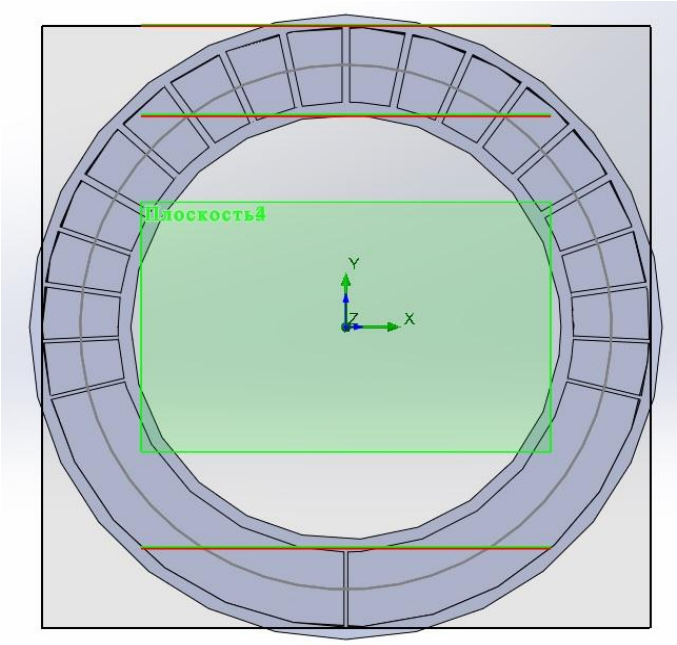

Рис. 4. Генератор неравномерности со стержнями разного диаметра.

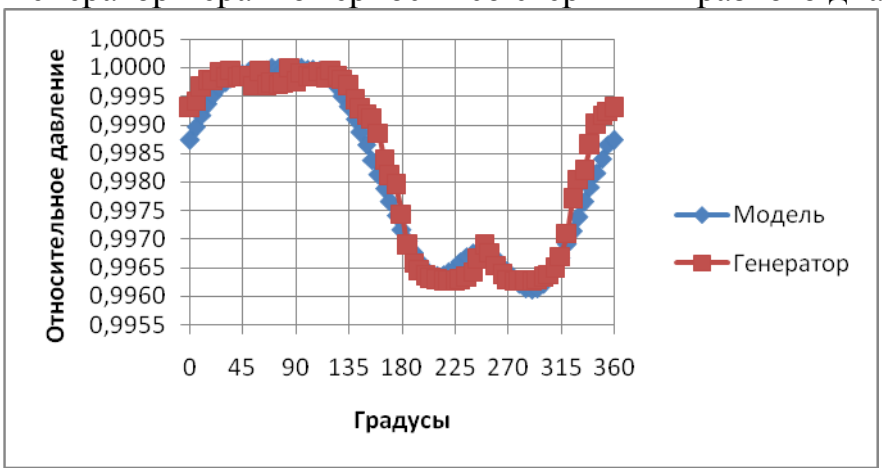

Рис. 5. Сравнение неоднородности давления, возбуждаемого генератором и полученной в ходе эксперимента.

При создании экспериментальной установки будут также испытаны другие варианты конструкции генераторов возмущений.

Список литературы

1. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин, М.: изд. Энергия, с- 383.

2. СидоровА. А., ГоликовА. С. // *ВестникМГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 5, с. 25–32.

Сидоров Альберт Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sidpol1@rambler.ru.

Голиков Андрей Сергеевич – ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: golickov.an.kfmgty@yandex.ru.

С.В. Киселёв, А.А. Сидоров

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ОБТЕКАЕМЫХ ТЕЛ

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

Аэродинамическое совершенствование проточных частей турбин, сыгравшее большую положительную роль на ранних стадиях развития энергомашиностроения, приблизилось к исчерпанию своих резервов. Получившие в последнее время большое развитие методы расчёта пространственного вязкого течения сжимаемой жидкости способны частично заменить дорогостоящий физический эксперимент численным, снизить сроки, объём и стоимость экспериментально-доводочных работ, повысить достоверность прогноза их результатов [4]. Кроме того численный эксперимент позволяет оценить процессы, происходящие в недоступных пока для физического эксперимента областях и диапазонах значений различных параметров. Например, уровень начальных температур современных ПТУ существенно ниже, чем у их газотурбинных аналогов и не превышает 600 °С. Рост температур в основном сдерживается свойствами материалов, используемых в теплообменных поверхностях котлов. Как и в ГТУ увеличение начальных температур в ПТУ приведёт к увеличению эффективности цикла [2]. Тенденции в мировой энергетике свидетельствуют хотя и о медленном, но устойчивом движении в этом направлении. Ведутся конструкторские разработки ПТУ с пароводяным циклом с суперкритическим давлением и начальными температурами 700-800 °С. Именно поэтому важно сейчас рассматривать процессы, которые будут происходить в подобных турбинах и какое воздействие окажут такие высокие параметры на работу отдельных элементов и всей турбоустановки в целом.

Наиболее уязвимыми элементами турбины являются рабочие лопатки, испытывающие большие статические и динамические нагрузки. Особый интерес представляют динамические силы. Каким образом они будут выглядеть при сверхвысоких температурах потока сейчас совершенно не ясно. Опубликованных работ на эту тему практически нет, может быть, за исключением работы [1].

Известно, что аэродинамические силы, вызывающие колебания рабочих лопаток, являются следствием неоднородности протекающего потока. Одной из основных причин появления неоднородности являются кромочные следы за сопловыми лопатками [3]. На сегодняшний день неизвестно как изменится интенсивность следов при сверхвысоких температурах в условиях охлаждения сопловых лопаток.

Работа посвящена исследованию пограничного слоя и определение зависимостей параметров в пограничном слое обтекаемых тел (таких как сопловые лопатки, плоская пластина и т.д.).

Численный эксперимент проводился в программной среде SolidWorks с помощью модуля FlowWorks. Расчёты показали, что изменение начальной температуры потока (t_1=700 °C, t_2=800 °C, t_3=900 °C), а также добавление охлаждения обтекаемого тела сильно влияют на параметры пограничного слоя. Толщина пограничного слоя δ и получившаяся форма эпюр скоростей хорошо согласуются с теорией пограничного слоя [5]. Во всех проведенных расчетах наблюдается однозначная взаимосвязь параметров в пограничном слое (рис.1).

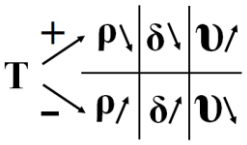

Рис.1. Схема изменения параметров

При повышении температуры основного потока T плотность ближайших к обтекаемому телу слоёв ρ уменьшается, уменьшается толщина пограничного слоя δ, а скорость потока в пограничном слое v увеличивается. И, наоборот, при уменьшении температуры основного потока (добавлении внутриканального охлаждения) плотность увеличивается, толщина пограничного слоя увеличивается, скорость падает. Такие изменения влияют на аэродинамический след за обтекаемым телом, неоднородность протекающего потока, а следовательно, и на динамические напряжения, возникающие в элементах турбин, расположенных ниже по потоку. Результаты исследований могут быть использованы при разработке конструкций сверхвысокотемпературных паровых турбин с охлаждаемыми лопатками.

Выводы:

1. Толщина пограничного слоя существенно зависит не только от температуры основного потока (с увеличением температуры толщина пограничного слоя уменьшается), но и от разности температур основного потока и поверхности обтекаемого тела.

2. Добавление внутриканального охлаждения увеличивает плотность ближайших к обтекаемому телу слоёв потока, что приводит к увеличению толщины пограничного слоя

3. Чем больше расстояние по нормали от обтекаемого тела, тем меньше влияет охлаждение на изменение плотности потока между слоями.

Список литературы

1. *Быков Ю.А.* Численное моделирование аэроупругости в решетке охлаждаемых лопаток // Авиационно – космическая техника и технология, 2010, №5 (72), с 59 – 63.

2. *Вукалович М.П., Новиков И.И.,* Термодинамика. Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1972.

3. *Самойлович Г.С.* Возбуждение колебаний лопаток турбомашин. – М.: Машиностроение, 1975.

4. *Федоров В.А., Мильман О.О., Шифрин Б.А.* Высокоэффективные технологии производства электроэнергии с использованием органического и водородного топлива. – М.: Изд—во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.

5. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя: Пер. с немец. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1969.

Киселёв Сергей Викторович – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: SKV1985@yandex.ru.

Сидоров Альберт Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sidpol1@rambler.ru.

А.А. Жинов

ВЫБОР ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАРОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

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

Один из способов повышения термического КПД цикла паротурбинной установки - увеличение начальных параметров рабочего тела, таких как давление и температура. Повышение начальной температуры, а также температуры промежуточного перегрева пара, может быть достигнуто путем сжигания метана (CH_4) в среде водяного пара, рабочим телом энергоустановки при этом будет смесь ($H_2O + CO_2$). Работы в области высокотемпературных паротурбинных установок в течении ряда лет ведутся в КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана совместно с НПВП «Турбокон» [1,2].

Для анализа термической эффективности высокотемпературной паротурбиной установки и обоснованного выбора ее тепловой схемы были рассмотрены несколько вариантов с турбиной мощностью 300 МВт (далее ВПТУ300) с параметрами на входе в часть высокого давления: $P_0 = 34 МПа$, $t_0 = 1250^0 C$, параметрами промежуточного перегрева пара: $P_{вп} = 4.6 МПа$, $t_{вп} = 1450^0 C$ и конечном давлении в конденсаторе $P_K = 5 кПа$. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры тепловых схем

Параметры / Тепловая схема.	КПД установки	Параметры пара перед ПО		Температура пара перед ЦНД	Параметры пара после ЦНД	
	$\eta_У, \%$	$P_{ПО1}, МПА$	$t_{ПО1}, C°$	$t_{ЦНД1}, C°$	$P_{ЦНД2}, кПа$	$t_{ЦНД2}, C°$
1.ЧВД+ЧСД+ЦНД	58	1,9	963	-	5	272
2.ЧВД+Р+ЦСД+ЦНД+ПО	57,2	1,7	960	374	5	34
3.ЧВД+ЧСД+Р+ЦНД+ПО	56,8	0,8	951	372	5	34
4.ЧВД+ЧСД+Р+ПТ+ПО+ЦНД	56,2	0,6	921	273	5	32

Здесь: ЧВД, ЧСД, ЦНД – части (цилиндр) высокого, среднего, низкого давления соответственно, Р – редуктор, ПО – пароохладитель, ПТК - приводная турбина компрессора.

Из результатов расчетов видно, что все рассмотренные схемы имеют высокий термический КПД. Установка выполненная по схеме №4 (Рис. 1),

имеет ряд дополнительных преимуществ: ЦНД турбины этой схемы выполнен на базе ЦНД серийной турбины К-330-240 Ленинградского металлического завода, высокооборотный цилиндр ЦВД+ЦСД выполнен по петлеобразной схеме, привод вакуумного компрессора отсоса CO_2 из конденсатора выполнен от приводной турбины.

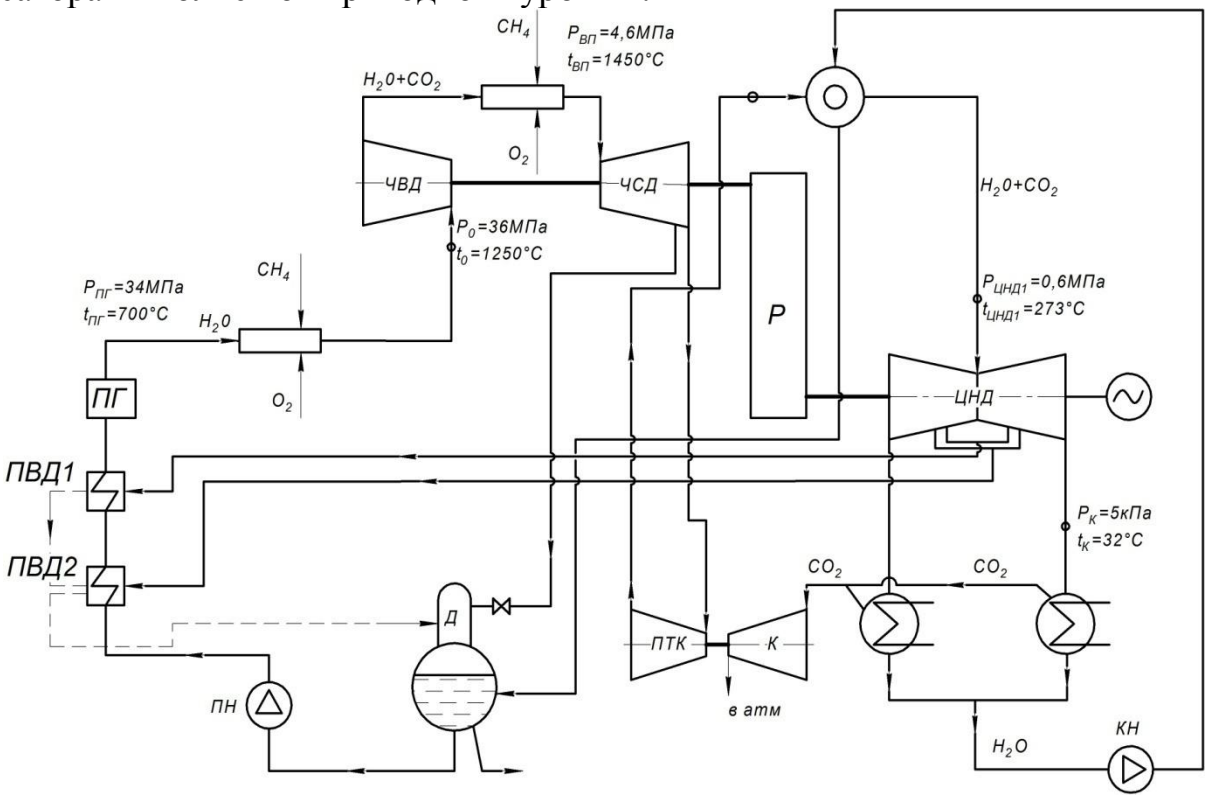

Рисунок 1. Принципиальная схема ВПТУ-300.

Высокая температура пара (1250..1450°С) обусловливает применение жаропрочных материалов, и применения охлаждения элементов проточной части. Сравнение энергоустановок с высокооборотным (12000…18000 об/мин) и низкооборотным (3000 об/мин) ЧВД и ЧСД показало, что за счет этого можно уменьшить в 3..4 раза число ступеней и в 5..6 раз число лопаток. ЧВД состоит из 6 нерегулируемых ступеней давления. ЧСД состоит из 10 нерегулируемых ступеней. Расход жаропрочных материалов, обеспечивающих работоспособность конструкции при высоких начальных температурах у высокооборотных турбин на порядок меньше.

Для дальнейшего анализа и подробного проектирования энергоустановки была выбрана схема №4.

Литература:

1. Разработка научных основ проектирования электростанций с высокотемпературными паровыми турбинами: Сборник статей. — М.: *Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009*. — 300 с.

2. Федоров В.А. Разработка энергокомплексов с высокотемпературными паротурбинными установками с созданием и испытанием опытного образца. *Сборник докладов ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы*». с.94-95.

3. Фаворский О.Н., Леонтьев А.И., В.А.Федоров, Мильман О.О. Расчетно-экспериментальное обоснование создания угольно-водородной электростанции с высокотемпературными (850-1500 °С) паровыми турбинами. Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. М.: *Издательский дом МЭИ,* 2010. Т.1. с. 63-68.

Жинов Андрей Александрович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru.

С.Г. Смоляр, В.А. Землянский

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ СЖАТИЯ КОМПРЕССОРА ГТУ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА ПРИ СТАНДАРТНЫХ УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.

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

В статье рассматривается влияние степени повышения давления компрессора ГТУ на показатели адиабаты и теплоемкости. Также исследована относительная погрешность, получаемая при расчете методом неизменных и методом переменных показателей адиабаты и теплоемкости. Проанализирована актуальность подобных расчётов в зависимости от степени сжатия в компрессоре.

Ключевые слова: *показатель адиабаты, теплоёмкость, компрессор, ГТД, ГТУ.*

Введение. Процесс сжатия имеет значимую роль в работе теплового двигателя. Чем выше давление в цикле, тем больше его работа и, как следствие, мощность. Давление подводимого воздуха влияет на процессы горения в камере сгорания. Чем выше степень повышения давления, тем ниже потребление топлива. Поэтому в современных ГТД и ГТУ наблюдается тенденция повышения степени сжатия в компрессоре (в современных ГТД она может доходить до 35 раз и выше). С изменением давления воздуха, проходящего через тракт ГТУ, изменяются и его физические параметры, такие как теплоемкость, температура, показатель адиабаты. Ввиду этого возрастает актуальность вопроса расчета компрессора ГТУ при непостоянных, по тракту компрессора, показателях адиабаты и теплоемкости.

Методика и порядок исследования. Исходными данными для исследования послужат стандартные атмосферные условия для расчета и испытаний газотурбинных установок (ГТД), согласно ГОСТ Р 52782-2007:

Давление окружающей среды: P_0=101’325 Па.

Температура окружающей среды: t_0=15 °С.

Относительная влажность окружающей среды: φ=60 %.

Изобарные теплоёмкости сухого воздуха и паров воды соответственно:

$$C_{pmВозд} = 0,9956 + 0,000093 \cdot t_0 \left[\frac{КДж}{Кг \cdot град} \right]; \quad (1)$$

$$C_{pmH_2O} = 1,833 + 0,000311 \cdot t_0 \left[\frac{КДж}{Кг \cdot град} \right]; \quad (2)$$

Изобарная теплоемкость влажного воздуха может быть найдена по формуле:

$$C_p = (1-x)\cdot C_{pmВозд} + x\cdot C_{pmH_2O}\left[\frac{КДж}{Кг\cdot град}\right]; \tag{3}$$

Где x – доля паров воды во влажном воздухе при заданных условиях. Для определения x, составим уравнение, используя соотношения 1, 2 и 3 :

$$C_p = (1-x)\cdot(0,9956+0,000093\cdot t_0) + x\cdot(1,833+0,000311\cdot t_0)\left[\frac{КДж}{Кг\cdot град}\right]; \tag{4}$$

Зная, что при заданных условиях окружающей среды, с достаточной степенью точностью: $C_p = 1,0045\left[\frac{КДж}{Кг\cdot град}\right]$;

Получим уравнение:

$$1,0045 = (1-x)\cdot(0,9956+0,000093\cdot t_0) + x\cdot(1,833+0,000311\cdot t_0); \tag{5}$$

Решив уравнение 5, получим значение x.

Т.к. влажный воздух, с достаточной, для термодинамических расчетов, степенью точностью, можно считать идеальным газом, то для нахождения изохорной теплоемкости воспользуемся формулой Майера:

$$C_v = C_p - R\left[\frac{КДж}{Кг\cdot град}\right]; \tag{6}$$

Где $R = 0,287\left[\frac{КДж}{Кг\cdot град}\right]$ – универсальная газовая постоянная.

Зная значения C_p и C_v можно найти показатель адиабаты k, по формуле:

$$k = \frac{C_p}{C_v}; \tag{7}$$

Температура сжимаемого влажного воздуха, при различных степенях сжатия найдем по формуле:

$$T_k = T_0\cdot\pi_k^{\frac{k-1}{k\cdot\eta_{пол}}}[K]; \tag{8}$$

Где:

$T_0 = t_0 + 273[K]$ - начальная температура ($\pi_k = 1$).

π_k - степень сжатия.

$\eta_{пол}$ - политропный КПД процесса.

Зная температуру $T_k(\pi_k)$ мы можем найти значения C_p и C_v при различных степенях сжатия:

$$C_{pmВозд} = 0,9956 + 0,000093\cdot(T_k - t_0)\left[\frac{КДж}{Кг\cdot град}\right]; \tag{9}$$

$$C_{pmH_2O} = 1,833 + 0,000311\cdot(T_k - t_0)\left[\frac{КДж}{Кг\cdot град}\right]; \tag{10}$$

$$C_p = (1-x)\cdot C_{pmВозд} + x\cdot C_{pmH_2O}\left[\frac{КДж}{Кг\cdot град}\right]; \quad (11)$$

Зная $C_p(\pi_k)$ и $C_v(\pi_k)$ найдём значения показателя адиабаты k при различных степенях сжатия:

$$k = \frac{C_p}{C_v}; \quad (12)$$

Произведем расчет удельной(на 1кг влажного воздуха) работы, затрачиваемой компрессором на повышение давления.

Работа может быть найдена по формуле:

$$H_k = \int_{T_0}^{T_k}\left[(1-x)\cdot(0,9956+0,000093\cdot(T_k-273)) + x\cdot\left(0,9956+0,000093\cdot(T_k-273)\right)\right]dT_k\left[\frac{КДж}{Кг}\right]; \quad (13)$$

Численное решение данной задачи. Проведем для определения погрешностей, при расчете с постоянными и переменными показателями теплоемкости и адиабаты.

$x \simeq 0{,}008927$

$\eta_{пол} = 0,92$ - типичный показатель политропного КПД для осевого компрессора.

Таблица 1

Результаты расчета.

π_k	$T_k\,[K]$	C_p $\left[\frac{КДж}{Кг\cdot К}\right]$	C_v $\left[\frac{КДж}{Кг\cdot К}\right]$	k	H_k $\left[\frac{КДж}{Кг}\right]$	H_{kc}, при $C_p = 1,0045\left[\frac{КДж}{Кг\cdot К}\right]$	$\Delta = \frac{H_k - H_{kc}}{H_{kc}}\cdot 100\%$ %
1	288	1.0045	0.718	1.4	0	0	-
2	357.174	1.011	0.724	1.396	69.712	69.4854	0.326
4	442.963	1.019	0.732	1.391	156.800	155.660	0.732
6	502.405	1.025	0.738	1.388	217.552	215.370	1.013
8	549.358	1.029	0.742	1.386	265.776	262.533	1.235
10	588.778	1.033	0.746	1.384	306.426	302.131	1.421
13	638.76	1.038	0.751	1.382	358.179	352.338	1.657
16	681.307	1.042	0.755	1.380	402.420	395.076	1.858
20	730.195	1.046	0.759	1.377	453.468	444.185	2.089
24	772.733	1.051	0.764	1.375	498.069	486.914	2,290
28	810.626	1.054	0.767	1.374	537.944	524.977	2,469

32	844.949	1.057	0.770	1.372	574.180	559.455	2,632
35	868.794	1.06	0.773	1.371	599.421	583.407	2,744
38	891.268	1.062	0.775	1.370	623.260	605.983	2,851
40	905.58	1.063	0.776	1.369	638.465	620.358	2,918

Данные значения получены при первом решении задачи, повторив расчет, при новых известных k мы можем уточнить полученный результат.

Заключение. Как мы можем видеть в таблице 1, относительная погрешность при расчетах с постоянными и переменными C и k может достигать до 2,5% в среднестатистических современных двигателях. Ввиду этого можно рекомендовать вести расчет с переменными по длине компрессора C и k при степенях повышения давления выше 20. При степени повышения давления менее 20, целесообразно использовать расчет при постоянных C и k (погрешность в этом случае не превысит 2%), за исключением особых случаев.

Список использованных источников

1. Нащокин В.В. *Техническая термодинамика и теплопередача.* Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высшая Школа, 1975. - 497 с.

2. *АВОК Справочное пособие 1-2004. Влажный воздух*. М.: ООО ИИП "АВОК-ПРЕСС", 2004. – 46 с.

3. *ГОСТ Р 51852-2001 Установки газотурбинные. Термины и определения.* М.: Госстандарт России, 2003

4. *ГОСТ Р 52782-2007 Установки газотурбинные. Методы испытаний. Приемочные испытания.* М.: Стандартинформ, 2008

Смоляр Сергей Григорьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: smolyar_sergei@mail.ru.

Землянский Анатолий Васильевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: zemlyansky.k1kf@yandex.ru.

УДК 621.438

А.С. Свитка, А.А. Бронников

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА-16В/12 НА КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ “БЕЛОУСОВСКАЯ”

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

Развитие газовых отраслей промышленности сегодня в значительной степени зависит от дальнейшего совершенствования оборудования, предназначенного для транспорта природного газа из отдаленных регионов в промышленные и центральные районы страны.

Оптимальный режим эксплуатации магистральных газопроводов (МГ) заключается, прежде всего, в максимальном использовании их пропускной способности при минимальных энергозатратах на компримирование и транспортировку газа по газопроводу. В связи с этим газоперекачивающий агрегат(ГПА)-16В/12 на компрессорной станции (КС) “Белоусовская” на базе двигателя ПС-90 является “золотой серединой” в этом отношении. В процессе его эксплуатации были произведены доработки способствующие повышению эффективности использования ПС-90[1].

В процессе эксплуатации блока выносных масляных фильтров (БВМФ) в составе системы смазки газотурбинной установки (ГТУ) выявился следующий недостаток. При извлечении фильтрэлементов происходит необратимый износ первых трех витков резьбы соединения стакана и сопрягаемой втулки корпуса фильтров, что ведет к снижению высоты профиля резьбы. Износ резьбы приводит к затруднению при «откручивании – закручивании», а так же к образованию утечки масла по резьбовому соединению. Для устранения этого дефекта было принято решение заменить резьбовое соединение стаканов БВМФ на фланцевое (рис.1) .

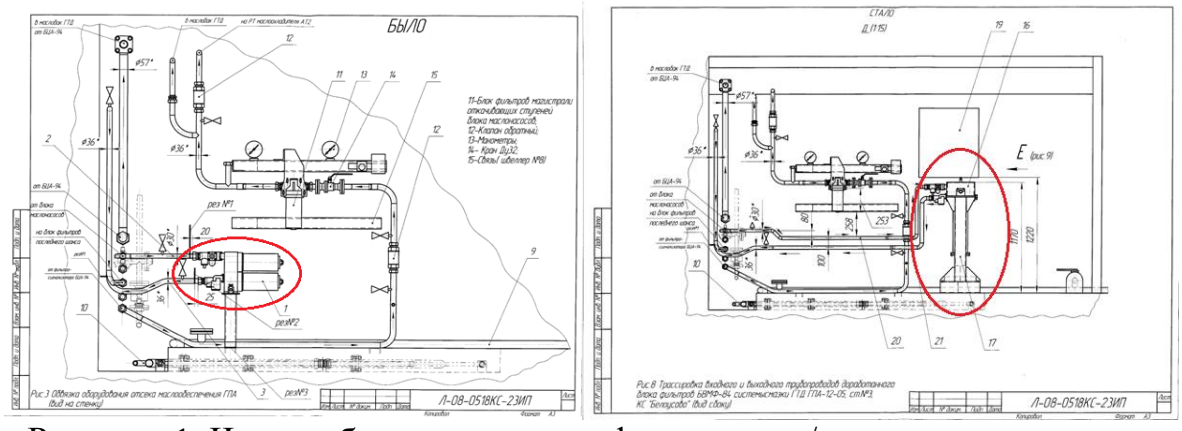

Рисунок-1. Чертеж блока выносных фильтров до/после модернизации.

Еще один недостаток в схеме смазки выявляется в зимний период эксплуатации. Заключается он в переохлаждении масла в маслоохладителях при пониженных температурах воздуха, что ведет к увеличению вязкости и соответственно увеличению сопротивления движения масла по трубопроводу. При значительном увеличении перепада до и после маслоохладителя автоматически открывается байпас и горячее масло минуя охладитель поступает в систему смазки двигателя, что ведет к перегреву смазываемых узлов. На практике эту проблему решали установкой листов из паранита, закрывающих ≈50% всасывающей части маслоохладителя. Это позволяет уменьшить расход холодного воздуха, забираемого на охлаждение масла.

Следующая доработка заключалась в следующем. В масляной схеме двигателя, имелся бак технологический (БТ). Он же являлся основным расходным баком при работе ГТУ, объем этого бака составлял ≈80л. Его назначение заключалось в том, чтобы в случае разгерметизации маслосистемы ГТУ при работе ГПА свести к минимуму объем разлитого масла, которое могло стать причиной возгорания. Еще одной необходимостью использования БТ была промывка осевого компрессора на холодной прокрутке (ХП). Изначально предполагалось, что при промывке не исключена возможность попадания промывочной жидкости и воды в масло, малый объем масла в БТ сокращал количество загрязненного масла. После промывки осевого компрессора, масло из БТ отбиралось на пробу. Анализы проб масла показали, что при промывке компрессора промывочная жидкость не попадала в масло. Были проведены исследования по упрощению маслосистемы ГТУ и принято решение по ликвидации БТ для упрощения схемы и уменьшения соединительных узлов трубопровода (потенциальных утечек масла) в маслосистеме двигателя ПС-90.

Таким образом результатом данных модернизаций стало уменьшение уровеня энергозатрат на компримирование газа, за счет доработки масляной системы двигателя ПС-90.

Список литературы

[1] Иноземцев А.А., Нихамкин М.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. В 5 кн. Москва, Машиностроение, 2008.

Свитка Антон Сергеевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: antonfisher2@yandex.ru.

Бронников Александр Андреевич – инженер. E-mail: paramonov231992@gmail.com.

А.В. Кондратьев

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ ПРОКТИРОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

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

Интерес к воздушно-конденсационным установкам (ВКУ) в настоящее время возрос в связи с экологическими требованиями, а также дефицитом воды во многих районах мира. Использование конденсаторов с водным охлаждением ведёт к тепловому загрязнению рек, а использование оборотных систем водоснабжения связано с уносом и выпаром влаги в атмосферу. ВКУ лишены этих недостатков, что делает их развитие перспективным направлением в энергетике.

Использование конденсационных установок с воздушным охлаждением, сопряжено с рядом трудностей, таких как возможность замерзания и разрыва теплообменных труб при работе в зимних условиях. Коэффициент теплопередачи воздушного конденсатора (ВК) может снижаться из-за накопления в теплообменных трубах неконденсирующихся газов.

Различными фирмами был разработан ряд технических решений [1], позволяющих добиться следующих результатов по улучшению технико-экономических показателей воздушных конденсаторов:

- уменьшение массы конструкции;
- сокращение сроков монтажа;
- большая степень заводской готовности;
- повышенная ветроустойчивость и т.д.

Анализ предложений ведущих мировых фирм-производителей воздушных конденсаторов показал, что всё большую популярность приобретает однорядная конструкция ВК с плоскоовальными оребрёнными трубками. Использование таких трубок позволяет исключить проблему распределения тепловой нагрузки ВК между рядами труб.

Среди патентных разработок [2-9] представлены варианты самонесущих конструкций теплообменных труб, которым не требуется рама для крепления. Существуют разработки, направленные на снижение вероятности замерзания конденсата в теплообменных трубах. Среди них конструкция плоскоовальной трубы, разделённой на каналы и содержащей в себе как зону массовой конденсации, так и дефлегматорную часть. Также существует конструкция многорядного ВК с вытесняющими вставками, позволяющими перераспределить поток пара таким образом, чтобы на первый по воздуху ряд трубок шло больше пара и его конденсация происходила по всей длине трубы. Данная конструкция является разработкой предприятия ЗАО НПВП «Турбокон» и прошла испытания по определению коэффици-

ента теплопередачи при различных расходах пара и различных диаметрах вытесняющих вставок. В настоящий момент в Межведомственной Научной Лаборатории предприятием ЗАО НПВП «Турбокон» ведутся испытания конструкции теплообменной трубы с упругим компенсатором.

Также существует ряд разработок, посвящённых различным формам теплообменных трубок, имеющих повышенные коэффициенты теплопередачи. Обзор патентных разработок говорит о том, что ВК на данный момент всё ещё имеют ряд недостатков и представляют собой широкое поле для реализации различных идей по их устранению.

Список литературы:

1. Рекламные материалы GEA и SPX Cooling Technologies.

2. Пат. 2190173 Российская Федерация (RU), F28B9/10 F28B1/06. Конденсатор с воздушным охлаждением / Бодаш Янош, Чаба Габор, Сабо Зольтан.

3. Пат. 2208751 Российская Федерация (RU), F28B1/06. Установка для конденсации пара / Бансинг Хайнц-Дитер, Коришем Бенедикт.

4. Пат. 2246672 Российская Федерация (RU), F28B7, F28B1/06. Многорядное устройство для конденсации водяного пара в вакууме / Семаков В.З., Мережкин С.М., Самосонов П.Г.

5. Пат. 2329447 Российская Федерация (RU), F28D1/06. Конденсатор пара с воздушным охлаждением и защитой от заледенения конденсата / Москвичёв В.Ф. и др.

6. Пат. 2417347 Российская Федерация (RU), F28D7. Трубчатый теплообменник / Анисин А.А.

7. Пат. 2417348 Российская Федерация (RU), F28D7. Трубчатый теплообменник / Анисин А.А.

8. Пат. 2462676 Российская Федерация (RU), F28F13/08, F28D7. Аппарат воздушного охлаждения секционного типа ABC GI с цилиндрическими вытеснителями / Фёдоров В.А., Мильман О.О.

9. Пат. 2133002 Российская Федерация (RU), F28B1/06. Воздушно-конденсационная установка / Мильман О.О., Дельнов Ю.Ф.

Кондратьев Антон Викторович – аспирант, ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: barbarian66@ya.ru.

М.И. Супельняк, А.К. Карышев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ИЗ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

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

Одним из возможных способов определения нестационарного коэффициента теплоотдачи является решение граничной обратной задачи теплопроводности [1]. Если известно решение прямой задачи и результаты экспериментальных измерений поля температуры твердого тела, то для определения коэффициента теплоотдачи может быть использован метод подбора [2]. Его суть заключается в выборе из заранее заданного подкласса возможных решений такого коэффициента теплоотдачи, при котором невязка между решением прямой задачи и данными эксперимента достигает минимума.

С помощью указанного метода было проведено исследование циклической теплоотдачи на поверхностях стального и медного цилиндров, поочередно обтекаемых холодной и горячей водой. Поле температуры каждого цилиндра измерялось на специально разработанном экспериментальном стенде [3], а его расчет проводился по аналитической зависимости, полученной в статье [4]. Зависимости температуры жидкости и коэффициента теплоотдачи от времени принимались кусочно-постоянными на периоде функциями (рис. 1). В качестве невязки Δ_T между экспериментальными и расчетными данными принималось среднеквадратическое значение их разностей. Отклонение расчетного коэффициента теплоотдачи от действительного оценивалось в норме L_2.

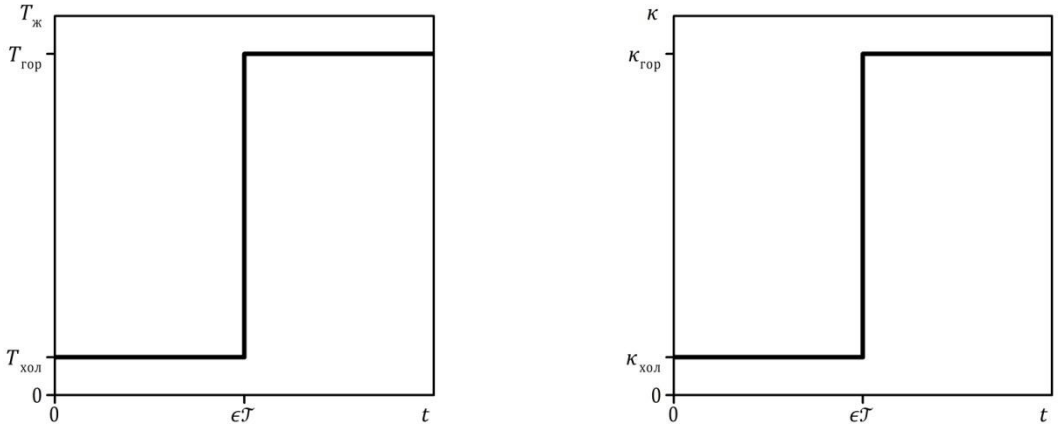

Рис. 1

В ходе расчетов для различных режимов течения было установлено, что коэффициент теплоотдачи принимает значения $\kappa_{хол} = 870 \div 1100$

Вт/(м^2·К) и $\kappa_{гор} = 1360 \div 1550$ Вт/(м^2·К) при $\Delta_T = 0,9 \div 1,3$ К. Норма отклонения $\|\varepsilon_\kappa\|_{L_2}$ в зависимости от температурного напора между поверхностью цилиндра и жидкостью изменялась в достаточно широких пределах – от 77 до 592 Вт/(м^2·К). Непосредственный расчет коэффициента теплоотдачи по экспериментальным данным для медного цилиндра подтвердил правильность оценки погрешности и позволил установить, что значения $\kappa_{хол}$ и $\kappa_{гор}$, определенные из решения обратной задачи теплопроводности, близки к его значениям, осредненным за промежутки охлаждения и нагревания цилиндра (рис. 2).

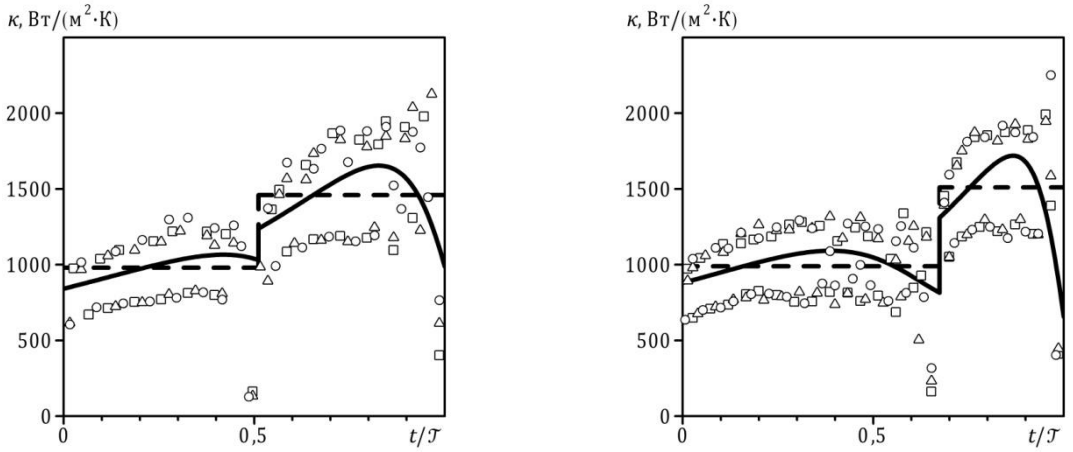

Рис. 2

С помощью расчетов по эмпирическим зависимостям, приведенным в [5] и [6], было установлено, что использование критериальных уравнений не позволяет определить достоверные значения коэффициентов теплоотдачи в исследуемом циклическом процессе, однако дает величины верного порядка.

Список литературы

1. Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. – Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009. – 457 с.

2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 с.

3. Супельняк М.И., Карышев А.К. Экспериментальный стенд для исследования тепловых волн в цилиндре // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, 10-12 декабря 2013 г. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – Т. 1. – С. 248–250.

4. Карышев А.К., Супельняк М.И. Температурное поле цилиндра при нестационарных периодических условиях теплообмена с окружающей средой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2011. – № 4. – С. 54–70.

5. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

6. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 562 с.

Супельняк Максим Игоревич – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: max2901@mail.ru.

Карышев Анатолий Константинович – канд. техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: k1kf@bmstu-kaluga.ru.

М.И. Супельняк, А.К. Карышев

ОСОБЕННОСТИ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ С ЦИКЛИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПОВЕРХНОСТИ

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

При проектировании ядерных энергетических реакторов [1], теплообменных аппаратов регенеративного типа [2] и других устройств возникает необходимость учета нестационарной теплоотдачи. В некоторых случаях, когда параметры процесса изменяются достаточно медленно, допустим квазистационарный подход, который заключается в использовании для расчета коэффициента теплоотдачи критериальных уравнений для стационарного режима, в которые подставляются мгновенные значения изменяющихся во времени величин [1]. Однако он является приемлемым далеко не всегда. Кроме того, для рассматриваемого режима течения могут отсутствовать критериальные уравнения для расчета теплоотдачи.

Вопросы нестационарного теплообмена при ламинарном течении жидкости в каналах рассмотрены в монографии [3]. Приведенные в ней данные свидетельствуют о том, что теплоотдача на переходных и периодических режимах может значительно отличаться от стационарной. Особенности циклического теплообмена при течении жидкости в канале можно рассмотреть на достаточно простом примере. Жидкость с постоянными теплофизическими свойствами и температурой поступает в круглый канал, температура поверхности которого изменяется во времени по периодическому закону. Течение жидкости ламинарное и гидродинамически стабилизированное, а передачей теплоты в осевом направлении за счет теплопроводности и диссипацией энергии из-за трения можно пренебречь.

Для описанной модельной задачи было получено аналитическое выражение, описывающее поле температуры жидкости вдали от входа в канал. С его помощью была исследована стабилизированная теплоотдача на периоде процесса при импульсном изменении температуры поверхности T_w (рис. 1). Сравнение полученных результатов с предельным числом Нуссельта $\mathrm{Nu}_\infty = 3{,}66$ для стационарного процесса, которое имеет место при $T_w = \mathrm{const}$, показывает заметное различие между теплоотдачей при стационарном и нестационарном режиме.

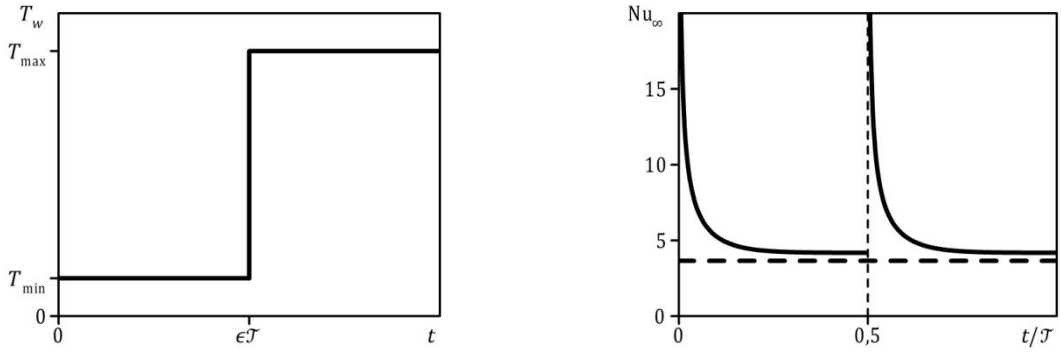

Рис. 1

При треугольном законе изменения T_w различие становится еще больше, о чем можно судить из рис. 2. В данном случае коэффициент теплоотдачи не только заметно изменяется во времени, но и становится отрицательным на некоторых промежутках периода.

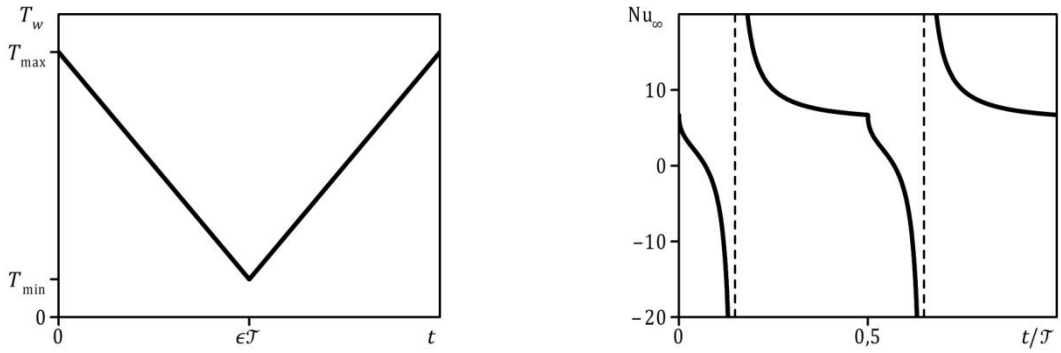

Рис. 2

Рассмотренные примеры наглядно показывают, что в нестационарных условиях теплоотдача может существенно отличаться от стационарной, что не позволяет использовать для ее расчета квазистационарный подход.

Список литературы

1. Теплообмен в ядерных энергетических установках / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев, С.Л. Соловьев. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 548 с.

2. Кирсанов Ю.А. Циклические тепловые процессы и теория теплопроводности в регенеративных воздухоподогревателях. – М.: Физматлит, 2007. – 240 с.

3. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. – М.: Энергия, 1967. – 412 с.

Супельняк Максим Игоревич – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: max2901@mail.ru.

Карышев Анатолий Константинович – канд. техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: k1kf@bmstu-kaluga.ru.

С.Г. Смоляр, Д.И. Филинков, А.В. Землянский

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК В ТЭЦ МАЛОЙ МОЩНОСТИ.

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

В статье рассматривается актуальность применения микротурбинных ГТУ в ТЭЦ малой мощности(до 60 кВт). Приводятся особенности подобных установок. Также проведен сравнительный анализ установок малой мощности других типов.

Ключевые слова: *микро ГТУ, автономное тепло-, электроснабжение, газовый генератор, бензоагрегат, ГТД.*

Введение. Автономное энергоснабжение всегда имело значимую роль в энергосистемах многих объектов. К тому же особое значение постоянство энергоснабжения имеет в сфере объектов повышенной опасности, медицинских учреждений и т.п.. Как правило подобные установки имеют относительно невысокую мощность (до 60 кВт в зависимости от объекта). С развитием турбинных технологий в сферу энергоустановок малой мощности пришли и т.н. микро ГТУ.

Особенности микро ГТУ. Обуславливаются малыми мощностями установок и как следствие относительно малыми нагрузками на агрегаты ГТУ.

1. Широкий спектр применяемого вида топлива: природный газ высокого или низкого давления по ГОСТ Р 5542-87, Биогаз (мусорный газ; газ, получающийся при очистке сточных вод; анаэробный газ), попутный нефтяной газ (факельный газ), жидкие виды топлива (керосин, дизельное топливо, биодизельное топливо), низкокалорийные газы, газы с нестабильными характеристиками состава, сжиженный газ (природный газ (метан), пропан-бутан), шахтный метан (метан угольных пластов), коксовые газы, сингаз (синтез-газ).
2. Возможность применения воздушных подшипников (рис.1).
3. Возможность единого исполнения ротора турбины и генератора.
4. Легкое объединение и синхронизация нескольких турбин в единый кластер.
5. Быстрый запуск (особо актуально при использовании в качестве аварийного источника питания).
6. Низкий уровень шума.
7. Высокие скорости вращения турбины (до 96000 об/мин в Capstone C15).

8. Схема микротурбинной установки приведена на рис.3. Выработка электрической энергии осуществляется с помощью генератора постоянного тока. Преобразование постоянного тока в переменный осуществляется по следующей схеме (рис.3) .

Рис.1 Схема воздушного подшипника

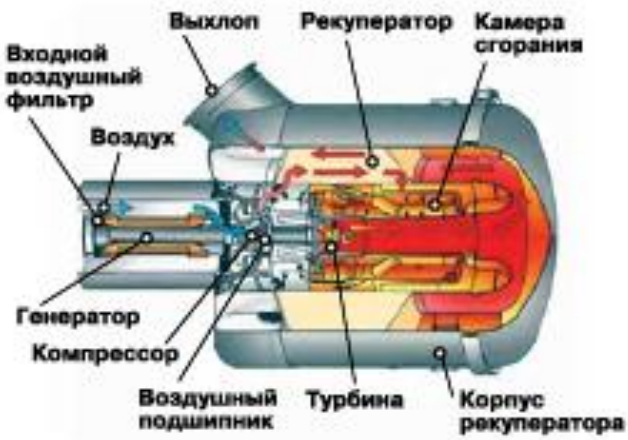

Рис.2 Схема микротурбинной установки.

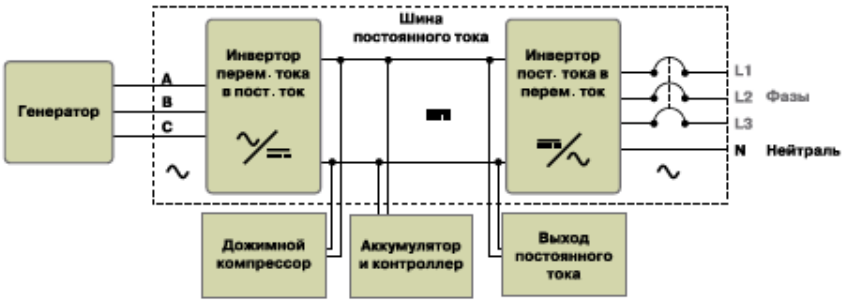

Рис.3 Схема преобразования постоянного тока.

Рис.4 Энергетический цикл микротурбин семейства Capstone.

Преимущества и недостатки применения различных типов энергоустановок малой мощности в различных сферах деятельности. Аналогами микро ГТУ в сфере выработки электроэнергии могут служить газовые генераторы (газопоршневые), бензоагрегаты и дизельные генераторы. Бензоагрегаты, ввиду своей специфики, занимают нишу самой малой мощности, наиболее популярными являются модели мощностью до нескольких кВт. Как правило бензоагрегаты не прихотливы в обслуживании и довольно просты в устройстве. Дизельные генераторы представлены широким спектром установок различной мощности (1–2500кВт). Но установки малой мощности, как правило, крайне требовательны к топливу. Установки малой мощности, также как и бензиновые, относительно просты в обслуживании. Газовые генераторы, пожалуй, основные конкуренты микро ГТУ в диапазоне мощностей до 60кВт. Основными преимуществами микро ГТУ и газовых генераторов являются: высокий срок службы (выше чем у бензиновых и дизельных более чем на 30%), низкий уровень выбросов в атмосферу, простота установки и эксплуатации, низкая стоимость топлива. Помимо этого газопоршневые установки дешевле ГТУ сравнимой мощности. В свою очередь микро ГТУ тише газопоршневых аналогов и приспособлены к большему количеству различных топлив. Устройство микро ГТУ проще, а использование воздушных подшипников позволяет снизить вибрации, звук и отказаться от периодической смазки и замены свечей. В то же время микро ГТУ более прихотливы к техническому обслуживанию и ремонту. Следует отметить, что минимальная мощность типичной ГТУ составляет 15 кВт, в то время как встречаются газопоршневые установки мощностью в 6 кВт. Главным преимуществом микро ГТУ является возможность одновременной выработки как тепла, так и электроэнергии. Причем, в отличии от других типов установок, устройство микро ГТУ позволяет осуществлять это с меньшими потерями. Полный КПД подобных установок может достигать более чем 90%. Рекордный КПД — 96% впервые был достигнут при инсталляции микротурбины Capstone C30 в городском бассейне города Путен (Нидерланды) в 2000 году. Микротурбина работает в режиме когенерации и обеспечивает объект электроэнергией и теплом, подогревая воду и снабжая электричеством обслуживающую

бассейн технику. Прочие типы установок ввиду специфики устройства не могут достичь подобных показателей.

Рис. 5 Турбины Capstone.

Анализ рынка энергоустановок и их рентабельности. Показывает лидерство в этом вопросе микротурбинных установок. Так приблизительная стоимость ГТУ Capstone C30 (электрическая мощность 30кВт, тепловая мощность 305000 кДж/час) составляет 25000€ , в то время как стоимость газопоршневой установки FG Wilson серии FG40E1 - 32090$ (электрическая мощность 32кВт, тепловая мощность 169200 кДж/час). При этом дальнейшая стоимость обслуживания ГТУ меньше, чем газопоршневой установки. В обоих случаях на выработку ≈3 кВт/ч электроэнергии потратится 1 $м^3$/ч природного газа, но при использовании ГТУ будет получено в два раза больше тепловой энергии. Период полной окупаемости микротурбинной установки (capstone) составляет от 2 до 4 лет в зависимости от первоначальной комплектации. Отдельно стоит отметить газовые генераторы подобные модели MIRKON MKG35T (стоимость порядка 14000$, электрическая мощность 35 кВт), они представляют собой готовые, закрытые решения. Основанные на поршневых двигателях и использующие в качестве топлива природный газ, подобные установки довольно экономичны, в плане выработки электроэнергии, однако не приспособлены для выработки тепловой энергии, а обслуживание сравнимо с техническим обслуживанием двигателя обычного автомобиля.

Заключение. Универсальность микро ГТУ обуславливает рост популярности данного типа энергоустановок в сфере бытового энергоснабжения и в ТЭЦ малой мощности. Основным минусом, тормозящим широкое распространение ГТУ, является их более высокая стоимость, по сравнению с аналогами. Не смотря на это специфика ГТУ позволяет использовать именно их в некоторых проектах:

- Утилизация «свалочного» газа.
- Утилизация биогаза на водоочистных сооружениях.
- Энергообеспечение курортных зон, архитектурных памятников, гостиниц, бассейнов.
- Экологически чистый транспорт.
- Утилизация попутного нефтяного газа (включая высокосернистый, содержащий до 7% H_2S).

Наивысшей эффективности можно добиться от микро ГТУ при использовании ее в режиме когенерации и тригенерации рис.6.

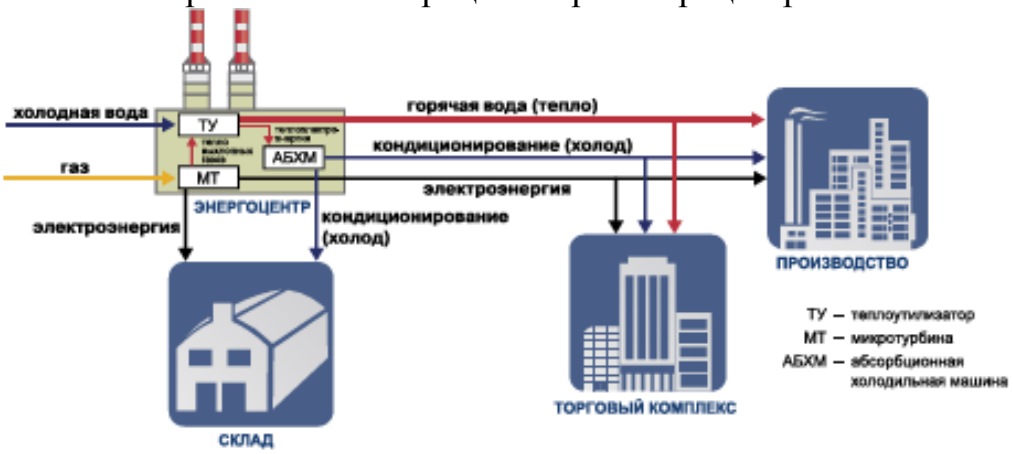

Рис.6 Когенерация и тригенерация.

Список использованных источников

1. *Газовые микротурбины Capstone* [Электронный ресурс]. - http://www.capstone.ru/. – (дата обращения: 23.10.2014)
2. *БПЦ Инжиниринг — электростанции на базе микротурбин Capstone и газовых турбин OPRA* [Электронный ресурс]. - http://bpcenergy.ru/. – (дата обращения: 23.10.2014)
3. *ССС-Энерго* [Электронный ресурс]. - http://cccenergo.com/. – (дата обращения: 23.10.2014)
4. *ООО "МегаДом" г. Казань.* [Электронный ресурс]. - http://www.megadomoz.ru/. – (дата обращения: 24.10.2014)
5. *Яндекс.Маркет.* [Электронный ресурс]. - http://market.yandex.ru/. – (дата обращения: 24.10.2014)
6. *«ЭнергоПроф»* [Электронный ресурс]. - http://www.sklad-generator.ru/. – (дата обращения: 24.10.2014)

Смоляр Сергей Григорьевич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: smolyar_sergei@mail.ru.

Филинков Дмитрий Игоревич – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: demon_0178@mail.ru.

Землянский Анатолий Васильевич – канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: zemlyansky.k1kf@yandex.ru.

УДК 621.438

Е.В. Тарасов, А.А. Жинов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В ПАРОВЫХ ТУРБИНАХ

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

Рассматриваются перспективные способы проектирования и применения лопаток сложной формы в паротурбинных установках. Изложены преимущества применения «саблевидных» лопаток на примере реальных паротурбинных установок. Предлагается доработка традиционной методики расчета ступени турбины с лопатками «саблевидной» формы.

***Ключевые слова**: эффективность лопаточного аппарата турбины, совершенствование проточной части, «саблевидные» лопатки, профилирование.*

На сегодняшний день основными производителями электроэнергии в России являются ГРЭС, содержащие в себе мощные паротурбинные или парогазовые установки. С каждым годом эти энергетические машины становятся все более совершенными, повышается их КПД, разрабатываются новые виды конструкций. Уменьшение потерь в лопаточном аппарате турбины, его аэродинамическое и техническое совершенство, во многом определяет КПД энергетической машины. Один из перспективных способов повышения эффективности проточных частей турбин – оптимальное пространственное проектирование сопловых и рабочих лопаток их ступеней, в том числе применение так называемых «саблевидных» лопаток.

Под термином «саблевидная» понимается лопатка, «заваленная» по радиусу, или имеющая на периферии и в корневом сечении наклон образующей (Рис. 1). Имеется и другое название таких лопаток, например, в Европе их именуют «банановыми». Лопатки с тангенциальным наклоном, или «саблевидные» лопатки, были впервые предложены в Московском Энергетическом Институте (МЭИ) М.Е. Дейчем и Г.А.Филипповым [1] еще в средине 60-х годов прошлого века. Но в то время они не нашли широкого применения в отечественных конструкциях.

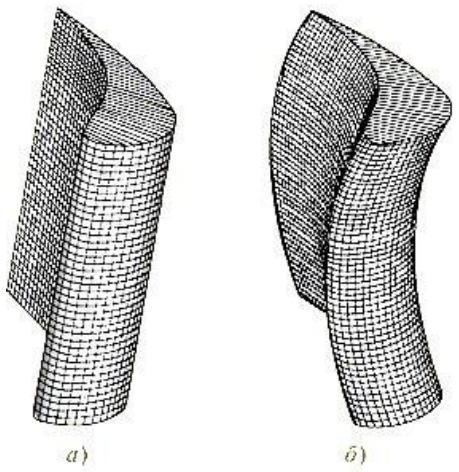

Рис. 1 Профильная часть рабочих лопаток фирмы «Альстом»
а) традиционная лопатка, б) «саблевидная» лопатка.

Мощные конденсационные паровые турбины, как правило, имеют большое количество ступеней. В этом случае потери в лопаточном аппарате могут оказать существенное влияние на КПД паровой турбины в целом. Основным преимуществом применения «саблевидных» лопаток в сопловой решетке турбинной ступени является значительное уменьшение концевых потерь в корневой и периферийной областях лопатки, а также повышение эффективности корневой области рабочего колеса ступени.

При проведении экспериментальных исследований [2] в МЭИ было установлено, что при обтекании сопловых решеток с традиционными и «саблевидными» лопатками, при равной скорости потока, коэффициент потерь снижается в 1,7 раз. Аналогичное исследование проводила и фирма «Митцубиси», ее данные были схожи с данными полученными в МЭИ. В последних ступенях конденсационной турбины, как правило, резко изменяется реактивность по высоте лопатки, при этом в ступенях с «саблевидными» лопатками реактивность по высоте решетки становится более равномерной, выравнивается удельный расход пара, ступень работает более устойчиво при значительном изменении объемного пропуска пара. Это приводит к меньшей вероятности возникновения отрывных течений у корня лопаток, уменьшения напряжения в лопатках и повышению экономичности турбомашины.

В ступенях с «саблевидными» лопатками также уменьшаются потери с выходной скоростью. Для ступеней, работающих во влажном паре, уменьшаются потери от влажности, что объясняется снижением концевых потерь в решетках. В результате исследований [2] было установлено, что прирост КПД ступени при использовании «саблевидных» лопаток в сопловой решетке может достигать 3%, что в совокупности всех ступеней турбомашины, где возможно применение таких лопаток, может дать ощутимый прирост КПД проточной части и повысить экономичность паровой турбины в целом.

Практическое применение «саблевидных» лопаток началось в середине 80-х годов крупными зарубежными производителями, такими как «Сименс» (ФРГ) и «Митцубиси» (Япония). Первоначально такие лопатки применялись на мощных тихоходных установках с частотой вращения 25 Гц, длина сопловой лопатки составляла примерно 1400 мм, но позднее «саблевидные» лопатки стали применяться и на установках с частотой вращения 50 Гц (фирма «Сименс»). Хорошим примером применения такого типа лопаток может служить пылеугольная ТЭС Enstedvarker в Дании, где на одной из турбин была произведена замена сопловых решеток с традиционными лопатками последних ступеней, на решетки с «саблевидными» лопатками. Результатом стали: выросшая мощность паротурбинной установки с 630 до 660 МВт, уменьшение удельного расхода тепла на 4,6%, что эквивалентно 60 тыс. тонн угля в год, уменьшились вредные выбросы в окружающую среду. В начале 80-х годов «саблевидные» сопловые лопатки применялись и на турбинах Калужского турбинного завода. В настоящее время такими лопатками оснащаются и некоторые паровые конденсационные турбины Ленинградского металлического завода. Сегодня «саблевидные» лопатки применяются некоторыми ведущими производителями уже и в качестве рабочих лопаток в ЦВД.

Основные трудности широкого применения «саблевидных» лопаток в паровых турбинах - это их большая стоимость, технологическая сложность изготовления, невозможность применения в длинных рабочих лопатках из-за повышенного уровня напряжений при эксплуатации и проблем достоверного оптимального проектирования ступеней с такими лопатками.

Традиционные методики профилирования «саблевидных» лопаток представляют собой проектирование, в основе которого лежит комплексное применение методов расчета разных уровней и формирование проточной части с учетом результатов экспериментальных продувок модельных решеток. В настоящее время разрабатываются и развиваются новые виды и методики профилирования лопаток сложной формы, основанные на компьютерном моделировании и современных системах автоматизированного проектирования.

В данной работе предлагается доработка традиционной методики [3] проектирования ступени паровой турбины с сопловыми лопатками «саблевидной» формы с применением появившихся новых методов [4] трехмерного компьютерного моделирования процессов течения. Исследуются трехмерные модели течения в ступени реальной паровой турбины, выполненной с традиционными лопатками и сопловыми лопатками «саблевидной» формы.

Использование современных методик расчетов и пространственного моделирования позволяет улучшить характеристики ступеней с лопатками сложной формы, в том числе и с «саблевидными» лопатками, не прибегая

к проведению сложных и дорогостоящих экспериментальных исследований.

Список литературы

1. *М. Е. Дейч, А. В. Губарев, Г. А. Филиппов, Ван Чхун-ци* Новый метод профилирования направляющих решеток ступеней с малым d/l/ // Теплоэнергетика. 1962.№ 8. С. 42—47.

2. *Дейч М. Е., Трояновский Б. М.* Исследование и расчет ступеней осевых турбин. М.: Машиностроение, 1964.

3. *Борисов Ф. П., Иванов М. Я.* Расчет осесимметричного потока и анализ течения в ступенях осевых турбин//Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.1989. № 3.С. 89—97.

4. *Юн А.А.* Теория и практика моделирования турбулентных течений. — М.: ЛИБРОКОМ, 2009.

Голиков Андрей Сергеевич – лаборант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tarasovevgeniy@outlook.com.

Жинов Андрей Александрович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой "Тепловые двигатели и теплофизика" КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1.
ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ 3

Бриченков С.Н., Соколова И.Д.
Модернизация фрезерного станка с целью расширения его технологических возможностей 4

Бриченков С.Н., Волков А.В.
Сравнение точности алгоритмов аналитического расчета сил резания 16

Свитка А.С., Соколова И.Д.
Анализ состояния станкостроительной отрасли в России..... 31

Савина Ю.А., Никитич В.Т.
Анализ способов зубофрезерования..... 36

Газыев Р.Р., Калмыков В.В.
Выбор посадок в соединении вал-втулка 41

Артёмов Д.В., Быков А.И., Масюк В.М.
Исследование управляющих последовательностей робота-манипулятора БРИГ-10Б 43

Калмыков В.В., Юсупова К.Н.
Мероприятия повышения точности сверления отверстий..... 47

Волков А.В., Устинов И.К.
Модули логического сравнения и расчёта переходов модели волочения 50

Прохоров А.Н., Малышев Е.Н.
Модульный принцип в определении технологических возможностей станка 53

Шаталов В.К., Пороваева Т.А.
Нанесение защитных покрытий микродуговым оксидированием..... 57

Мазенков А.А., Мусохранов М.В.
Обеспечение точности при глубоком сверлении..... 61

Клюцева Н.С., Калмыков В.В.
Обработка квадратных отверстий 66

Малышев Е.Н., Калмыков В.В., Пороваева Т.А.
Определение параметров наладки универсального захватно-ориентирующего устройства 69

Барков А.В., Крюков М.В.
Особенности стандартизации параметров шероховатости 74

Попова Т.В., Сорокин С.П., Мусохранов М.В.
Понятие поверхностной энергии в металлах 78

Скорская Ю.Н.
Пути достижения эффективности процесса резания..... 80

Курлович Е.А., Чернецова М.Н., Масюк В.М.
Разработка конструкторской части роботизированной складской промышленной ячейки 83

Беспалов Д.М., Малышев Е.Н.
Сборка роторов эксцентриситетным методом 88

Беляев И.Ю., Калмыков В.В.
Специфические погрешности при обработке заготовок на станках с ЧПУ 93

Калмыков В.В., Федорова О.С.
Факторы, обуславливающие усталостную прочность деталей машин 96

СЕКЦИЯ 2.
ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА 99

Максимов Н.Н., Ткачев Д.А.
Влияние магнитного поля сварочного контура на ориентацию деталей при точечной сварке по кромкам 100

Орлик А.Г., Зайцев К.В.
Композиционные покрытия применяемые для нанесения износостойких слоёв 112

Орлик Г.В., Гордеев А.А., Буркевич А.С.
Особенности технологии монтажа магистральных газопроводов высокого давления 116

Парамонов С.С., Максимов Н.Н.
Расчёт составляющих магнитного поля сварочного контура контактной машины в зоне соединения..... 120

СЕКЦИЯ 3.
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ..... 126

Чернова Н.Н., Андреев В.В., Столяров А. А.
Влияние дозы подлегирования канала МДП-транзистора на величину тока стабилизации высоковольтного стабилизатора тока 127

Кузнецов В.В.
Исследование поведения МДП-транзистора при воздействии электростатического разряда с печатной платой 130

Андреев В.В., Столяров А.А., Соловьев И.В., Ахмелкин Д.М., Романов А.В.
Контроль интегральной поглощенной дозы ионизирующих излучений с использованием МДП-сенсоров 134

Андреев Д.В.
Моделирование транспорта электронов в тонких диэлектрических пленках МДП-структур 139

Соловьев И.В., Столяров А.А.
Модификация порогового напряжения транзисторов со структурой металл-диэлектрик-полупроводник 143

Фролова М.А., Андреев В.В.
Разработка микросхемы операционного усилителя 146

Аунг Пьо, Сорочан В. В.
Расчет влияния технологических параметров на выходные характеристики солнечных элементов CdS-CdTe..... 152

Лоскутов С.А.
Расширение возможностей метода управляемой токовой нагрузки 154

Чернова Н.Н., Андреев В.В.
Совершенствование технологического процесса изготовления кристалла диодно-резистивной сборки..... 159

Андреев В. В., Столяров А. А.
Сравнительные исследования сильнополевой инжекции и электронного облучения на характеристики МДП-структур..... 162

Дмитриев В.Г.
Установка инжекционного контроля параметров наноразмерных диэлектрических плёнок..... 168

СЕКЦИЯ 4.
ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ..... 172

Липихин Е.Г., Жинов А.А., Шевелев Д.В.
Высокотемпературные теплообменные аппараты для утилизации бросового тепла ГТУ..... 173

Сидоров А.А., Голиков А.С.
Варианты конструкции генератора возмущений для имитации неоднородности давления в выхлопном осе-радиальном патрубке паровой турбины 180

Киселёв С.В., Сидоров А.А.
Взаимосвязь параметров потока в пограничном слое обтекаемых тел 184

Жинов А.А.
Выбор тепловой схемы высокотемпературной паротурбиной установки большой мощности 187

Смоляр С.Г., Землянский А.В.
Исследования влияния степени сжатия компрессора ГТУ на изменение параметров воздуха при стандартных условиях окружающей среды 190

Свитка А.С., Бронников А.А.
Модернизация газоперекачивающего агрегата-16В/12 на компрессорной станции "Белоусовская" 194

Кондратьев А.В.
Обзор современных конструкций и технологий в области проектирования воздушных конденсаторов..... 196

Супельняк М.И., Карышев А.К.
Определение циклического коэффициента теплоотдачи из решения обратной задачи теплопроводности 198

Супельняк М.И., Карышев А.К.
Особенности стабилизированной теплоотдачи при ламинарном течении жидкости в канале с циклически изменяющейся температурой поверхности..... 201

Смоляр С.Г., Филинков Д.И., Землянский А.В.
Применение микротурбинных установок в ТЭЦ малой мощности..... 203

Тарасов Е.В., Жинов А.А.
Проектирование и применение лопаток сложной формы в паровых турбинах..... 208

СОДЕРЖАНИЕ 212

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

Материалы
Всероссийской научно-технической конференции

Том 1

Научное издание

Все работы публикуются в авторской редакции. Авторы несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений

Подписано в печать 11.11.2014.
Формат 60x90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Печ. л. 13,5. Усл. п. л. 12,56. Тираж 60 экз. Заказ № 146

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