

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»
Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского

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

**Материалы
Всероссийской научно-технической конференции**

Том 1



Москва 2013

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 Научоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитии инновационной деятельности в вузе : материалы Всероссийской научно-технической конференции, 6–12 декабря 2013 г. Т. 1. — М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. — 256 с.

ISBN 978-5-7038-3869-3 (т. 1)
ISBN 978-5-7038-3868-6

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

ISBN 978-5-7038-3869-3 (т. 1)
ISBN 978-5-7038-3955-3

© Коллектив авторов, 2013
© Калужский филиал МГТУ
им. Н. Э. Баумана
© Издательство МГТУ
им. Н. Э. Баумана, 2014

СЕКЦИЯ 1.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

А.В. Матюхин

НАПРАВЛЕННАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

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

Научный руководитель: Бысов С.А.

Рассмотрены условия формирования отливок с направленной монокристаллической структурами современных жаропрочных сплавов в установках с радиационным и жидкометаллическим охлаждением. Показано, что разработанные в ВИАМе конструкции установок для высокоградиентной направленной кристаллизации и методы литья с применением методов комбинированного зарождения монокристаллических отливок «затравка–кристаллоотборник» позволяют получать отливки турбинных лопаток с монокристаллической структурой, во многом превосходящие зарубежные аналоги.

Ключевые слова: *Отливка, лопатка турбин, жаропрочный сплав, ВИАМ, кристаллизация*

Метод направленной кристаллизации был разработан для получения монокристаллов П. Бриджменом в 1925 г. и в дальнейшем усовершенствован Д. Стокбаргером (отсюда название – метод Бриджмена–Стокбаргера). По этому методу монокристаллы выращивают за счет вытягивания тигля или формы с расплавом из нагревателя, т.е. структура формируется в аксиальном температурном градиенте G_z последнего. При получении монокристаллов произвольной ориентации дно тигля выполняется в виде конуса, в вершине которого создается преимущественное переохлаждение расплава, где и зарождается один кристалл. Для повышения надежности формирования монокристаллической структуры в основании тигля выполняется перемычка. Получение заданной кристаллографической ориентации достигается применением затравочного кристалла, или затравки. Продвижение поверхности раздела расплав–кристалл может осуществляться как за счет перемещения тигля относительно нагревателя, так и нагревателя относительно тигля. Кроме того, метод Бриджмена–Стокбаргера можно реализовать вообще без перемещения формы – путем плавного снижения температуры нагревателя, состоящего из нескольких, отдельно управляемых секций (метод power down).

Как известно, научным обоснованием применения метода направленной кристаллизации в производстве турбинных лопаток ГТД послужили результаты исследования механизмов высокотемпературного разрушения поликристаллических жаропрочных сплавов. В частности, было показано, что разрушение в процессе ползучести происходит по границам зерен, ориентированным перпендикулярно оси действующих напряжений. Этот механизм был экспериментально подтвержден в работах академика С.Т. Кишкина, показавшего, что никелевый жаропрочный сплав ЭИ437 разрушается по участкам границ зерен, расположенным перпендикулярно приложенной нагрузке, причем зарождение пор и трещин по этим местам начинается уже в начале второй стадии ползучести. Именно это последнее обстоятельство и позволило сделать вывод о возможности значительного повышения длительной прочности за счет «удаления» из структуры материала поперечных составляющих границ зерен. Данная цель была достигнута применением в технологии литья лопаток направленной кристаллизации, позволяющей сформировать в отливке структуру, состоящую из столбчатых зерен, границы которых в основном параллельны направлению главных растягивающих напряжений. Применение этого способа для жаропрочных сплавов традиционного легирования действительно позволило значительно повысить кратковременную и длительную прочность, а также пластичность материала за счет исключения из структуры наиболее «слабых» областей, т.е. позволило полнее реализовать потенциальные возможности сплава. Однако, как бы идеально не были ориентированы столбчатые кристаллы в отливке, их границы всегда будут иметь горизонтальные участки, возникающие за счет стыковки ветвей дендритов второго порядка, принадлежащих соседним зернам. Поэтому следующим шагом в совершенствовании структуры жаропрочных сплавов стало получение отливок лопаток без больше угловых границ зерен или, другими словами, монокристалльных турбинных лопаток. Кроме того, использование монокристаллов позволяет реализовать еще одну возможность повышения эксплуатационных характеристик турбинных лопаток, а именно: использовать анизотропию прочностных свойств. Это повышение достигается за счет оптимальной ориентации монокристалльной структуры относительно действующих в лопатке механических и термических напряжений, т.е. применением монокристаллических лопаток с заданной кристаллографической ориентацией. Создание технологии производства монокристалльных лопаток позволило совершенствовать композиции жаропрочных сплавов, в частности, создать класс сплавов, не содержащих в своем составе элементов-упрочнителей границ зерен (так называемые безуглеродистые жаропрочные сплавы). Это, в свою очередь, позволило реализовать системы легирования и режимы термической обработки, обеспечивающие значитель-

ное повышение прочностных характеристик по сравнению с аналогичными параметрами сплавов традиционного легирования.

Процесс получения лопаток со столбчатой структурой называют обычно технологией направленной кристаллизации, а получение монокристаллических лопаток – технологией монокристаллического литья, хотя, как уже было сказано выше, в обоих случаях используется один и тот же метод направленной кристаллизации и, как правило, одни и те же установки. Началом разработки промышленной технологии направленной кристаллизации отливок турбинных лопаток ГТД из жаропрочных сплавов в США и почти одновременно в СССР можно считать конец 50-х–начало 60-х годов XX века (Вершнайдер и Гуард). Первые монокристаллические лопатки были получены Л. Вершнайдером в США в середине 60-х годов. В СССР первые лопатки были получены в ВИАМе под руководством Д.А. Петрова в лаборатории С.Т. Кишкина. Следует отметить, что монокристаллические турбинные лопатки являются примером практически единственного применения монокристаллов в качестве конструкционного материала.

Установки направленной кристаллизации жаропрочных сплавов. На рис. 1 представлена схема установки фирмы Ролс-Ройс, конструкция которой типична для зарубежной технологии направленной кристаллизации. Литейная форма 1, точнее говоря, блок из нескольких форм для отливки турбинных лопаток (6–8 штук) устанавливается в двухзонном нагревателе сопротивления 2 на подвижной водоохлаждаемой плите-холодильнике 3 и закрепляется специальным приспособлением. Так как форма для увеличения теплоотвода от металла изготавливается с открытым дном, то держатели обеспечивают ее плотный контакт с холодильником, препятствуя вытеканию расплава. Заливка расплава осуществляется сифонным методом через центральный стояк. Полости блока, формирующие собственно отливку лопатки, отделены от литниковой системы пористыми керамическими фильтрами, которые устанавливаются при сборке модельного блока.



Рис.1

Рисунок 1. Схема установки для направленной кристаллизации фирмы «Ролс-Ройс»:

- 1 – литейная форма;
- 2 – нагреватель сопротивления;
- 3 – водоохлаждаемая плита-холодильник и вытягивающее устройство;
- 4 – нагреватель индукционной печи;
- 5 – тигель и шихтовая заготовка

Плавление шихтовой заготовки проводится отдельной неподвижной индукционной печью 4 в одноразовом тигле с донным сливом 5. В его основании находится цилиндрический плавящийся, выполненный из сплава отливки стопор, перекрывающий сливное отверстие. Контроль заливки осуществляется визуально через специальное окно, расположенное между индукционным нагревателем и печью подогрева формы. После заливки металла в форму начинается процесс направленной кристаллизации вытягиванием формы из нагревателя. Теплоотвод от формы осуществляется за счет контакта с водоохлаждаемым холодильником и излучением от ее стенок на водоохлаждаемые стенки камеры кристаллизации (радиационное охлаждение). Для повышения Gz в основании нагревателя формы выполнены экраны, отсекающие часть его излучения на кристаллизующуюся часть отливки. Для обеспечения работы печи в непрерывном режиме служат сменные камеры кристаллизации и вакуумные затворы, позволяющие проводить загрузку шихтовой заготовки без развакуумирования основного объема печи.

Типичные режимы роста в установках такого типа:

$$T_{\text{верх.зоны}} = 1500 - 1510^{\circ}\text{C} ,$$

$$T_{\text{нижн.зоны}} = 1520 - 1530^{\circ}\text{C} ,$$

$$W = 3 - 5 \text{ мм / мин}$$

Ростовой градиент Gz составляет $3 - 5^{\circ}\text{C/мм}$.

К ростовой структуре рабочих турбинных лопаток ГТД с тонкостолбчатой однонаправленной структурой зерен предъявляются жесткие требования. На пере лопатки не допускается мест зарождения новых столбчатых зерен. Должно быть обеспечено отсутствие разнотекучности между замком и профилем пера лопатки. Допустимое отклонение границы зерна от вертикальной оси лопатки должно быть не более $15 - 20^{\circ}$. Такое же отклонение допускается и для ориентации. Равноосные зерна возможны только на полках лопатки. В отечественной промышленности в настоящее время применяются разработанные в ВИАМе высокоградиентные установки для направленной кристаллизации с охлаждением литейной формы в расплаве легкоплавкого металла (алюминия или олова). Схема установки такого типа показана на рис. 2 на примере печи УВНК-8П.

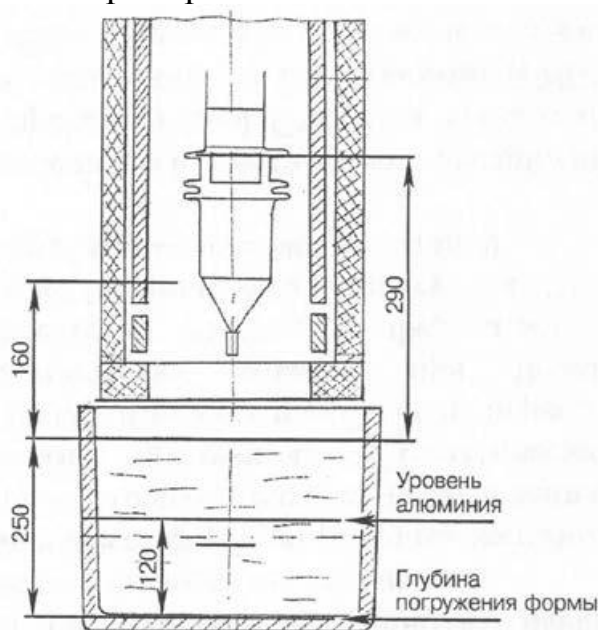


Рис. 2

Форма с залитым в нее металлом вытягивается из двухзонного нагревателя и погружается в расплав алюминия, имеющий температуру $\sim 750^{\circ}\text{C}$. Одновременно происходит кристаллизация двух блоков, обычно по шесть лопаток в каждом. Величина Gz для установок такого типа составляет $5 - 10^{\circ}\text{C/мм}$, скорость роста равна $5 - 7$ мм/мин для монокристаллических отливок и $10 - 20$ мм/мин для отливок с однонаправленной структурой. Величина междендритного расстояния λ составляет $250 - 300$ мкм, в то время как для установок с радиационным теплоотводом $500 - 550$ мкм. В высокогра-

диентных установках полностью отсутствует такой ростовой дефект, как струйчатая ликвация, что особенно важно при получении отливок из ренийсодержащих жаропрочных сплавов и при литье крупногабаритных лопаток ГТУ.

Следует отметить, что при получении отливок с однонаправленной структурой используются формы с керамической донной частью. Это обуславливает получение отливок, состоящих из 2–5 столбчатых кристаллов произвольной кристаллографической ориентации. Основное требование к отливкам такого типа – отсутствие выхода границы столбчатого зерна на кромки пера лопатки.

Технологии получения отливок монокристаллических турбинных лопаток ГТД. В мировой практике используют два варианта промышленной технологии получения монокристаллических лопаток для газотурбинных двигателей, отличающихся друг от друга способом зарождения монокристаллической структуры.

1. Технология, разработанная американской фирмой Pratt and Whitney, используется во многих странах мира (Англия, Франция, Германия и др.). Основана на отборе одного кристалла из множества столбчатых зерен, в которых за счет конкурентного роста формируется аксиальная текстура.

2. Отечественная технология, разработанная в ВИАМе, основанная на применении затравочных кристаллов (затравок), когда монокристаллическая структура передается в отливку от затравочного кристалла (затравки) заданной кристаллографической ориентации.

Принятый за рубежом способ выращивания монокристаллов основан на конкурентном росте столбчатых зерен и включает в себя следующие этапы:

1. формирование в основании литейного блока структуры из множества столбчатых зерен;

2. этап конкурентного роста столбчатых зерен, где происходит вытеснение тех из них, ориентация которых наиболее удалена от направления преимущественного роста кристаллографического направления. В результате конкурентного роста образуется ростовая текстура, состоящая из столбчатых зерен, которые имеют аксиальную ориентацию и произвольную азимутальную ориентацию;

3. отбор из текстурированных столбчатых зерен с помощью специального кристаллоотборника одного зерна, которое и формирует собственно монокристаллическую лопатку с аксиальной ориентацией и с произвольным азимутом.

В настоящее время в технологии монокристаллического литья стали использовать кристаллоотборник в виде спирали или геликоида (рис. 7), который иногда называют «поросячий хвост» (pig tail). По существу, этот геликоид представляет собой видоизмененный кристаллоотборник типа «прямой угол».

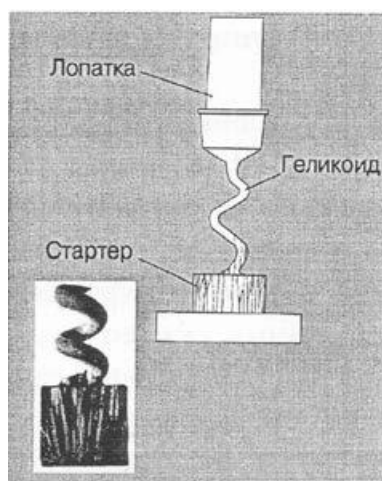


Рис.3

Следует подчеркнуть, что необходимым условием получения острой текстуры, а значит, и точности ориентации отливки, является образование большого числа зародышей произвольной ориентации, из которых в дальнейшем вырастает множество столбчатых зерен. Это достигается за счет глубокого переохлаждения в первоначальный момент контакта расплава с поверхностью медного холодильника-кристаллизатора. Использование форм с керамической донной частью позволяет получать отливки только произвольной ориентации, так как в этом случае зарождается всего несколько столбчатых зерен, между которыми, по существу, отсутствует конкуренция. В донной части отливки величина отклонения ориентации зерен относительно вертикальной оси соответствует равноосной структуре материала. Однако уже на половине высоты стартера за счет конкурентного роста формируется аксиальная текстура с точностью $10\text{--}15^\circ$ и соответственно с такой точностью выдерживается ориентация монокристаллической отливки.

Исследование ряда монокристаллических слитков и лопаток, полученных методом отбора, показало, что их структурное совершенство достаточно высокое. Получение достаточно совершенного монокристалла с помощью кристаллоотборника в виде геликоида вполне понятно, так как сам монокристалл, проросший из геликоида, по сути, формируется от одной дендритной оси первого или второго порядка или, другими словами, через кристаллоотборник прорастает только одно субзерно, а остальные зерна и субзерна в нем задерживаются.

Типичные размеры стартера и кристаллоотборника типа геликоида следующие:

1. диаметр стартера 20–30 мм,
2. высота 30–40 мм;
3. размеры геликоида – угол подъема спирали равно 40° , диаметр ~ 5 мм, число витков 1–3, общая высота (стартер-геликоид) 50–55 мм.

Таким образом, метод отбора одного зерна из множества столбчатых позволяет получить достаточно совершенные монокристаллы с аксиальной ориентацией, точностью 10–15°.

К достоинствам данной технологии следует отнести то, что - получение отливок лопаток с заданной ориентацией не требует применения затравок (т.е. нет необходимости в создании специального производства затравок).

К недостаткам следует отнести следующие:

1. требования по созданию условий для высокой интенсивности теплоотвода от основания формы, другими словами, необходимость использовать форму без дна с заливкой металла на холодильник;
2. невозможность получения отливок с ориентацией, отличной от, а также получения заданной азимутальной ориентации;
3. относительно большие размеры стартовой части литейного блока, что немаловажно при использовании дорогостоящих ренийсодержащих сплавов.

Затравочные методы получения монокристаллических отливок. В ВИАМе была разработана затравочная технология получения монокристаллических турбинных лопаток, основанная на применении так называемых тугоплавких затравок из сплава системы Ni–W, которые получают из монокристаллических заготовок произвольной ориентации методом ориентированной вырезки. Точность вырезки затравок ограничивается только структурным совершенством монокристаллов никелевых сплавов с дендритно-ячеистой структурой (может составлять 1,5°). Эта технология позволяет получать отливки любой заданной пространственной кристаллографической ориентации.

Однако, наряду с монокристаллическими отливками, полученными от Ni–W-затравок, которые имеют высокую степень совершенства (порядка 1,5°), встречаются отливки с фрагментированной структурой, состоящей из нескольких, достаточно крупных субзерен. Такая фрагментация является браковочным признаком при визуальном контроле макроструктуры отливок турбинных лопаток. Исследованиями установлено, что в затравках, формирующих совершенную структуру отливки, наблюдается полное смачивание и частичное растворение торца затравки расплавом жаропрочного сплава. На тех же затравках, от которых возникла фрагментированная структура, наблюдалось отсутствие контакта на границе расплав–затравка. Причем плохой контакт отмечался лишь в зоне, находящейся под литниковым ходом, соединяющим затравочную полость с основной полостью литейной формы, в то время как на остальной поверхности смачивание было нормальным. Отсутствие контакта расплав–затравка связано с образованием на рабочей поверхности последней налета, состоящего в основном из оксидов алюминия и кремния. Образование налета происходит в процессе нагрева формы под заливку. В момент заливки расплава в форму пленка

оксидного налета в отдельных местах разрушается, при этом подобное зарождение сопровождается затем смыканием областей монокристалла, возникших от отдельных точек поверхности затравки с образованием субгранниц, т.е. фрагментированности монокристалла.

С учетом вышесказанного было решено вести работу по устранению фрагментации по следующим направлениям:

1. «экранировка» поверхности затравки от образования налета;
2. предотвращение прорастания субзерен в отливку;
3. корректировка состава затравки.

Для реализации первых двух пунктов был применен комбинированный метод зарождения монокристалла, включающий использование затравки и кристаллоотборника в виде спирального литникового хода (геликоида). Хорошо известно, что при напылении в вакууме из-за большой длины свободного пробега молекул перенос материала осуществляется по прямой. В частности, этим объясняется то, что на затравке налет образуется только в виде пятна прямо под отверстием литникового хода, а на остальной поверхности, не имеющей прямого контакта с основной полостью формы, он не образуется. Требование такого рода экранировки вполне удовлетворяет спиральный литниковый ход, который препятствует массопереносу оксидов через газовую фазу на затравку. Кроме того, кристаллоотборник, обеспечивающий прорастание через него только одного зерна, точно так же ведет себя и в отношении субзерен. Поскольку к геликоиду в данном случае подводится не столбчатая, а монокристаллическая структура, то число витков может быть уменьшено до одного. Рабочее сечение спирального литникового хода должно быть минимальным (диаметр ~1,5 мм), поскольку это уменьшает вероятность попадания в него границ субзерен, а также снижает интенсивность массопереноса через газовую фазу. На рис. 8 показана модернизированная конструкция литейной формы, в которой применяется комбинированный метод зарождения монокристаллов затравка–кристаллоотборник. Кристаллоотборник выполнен в виде цилиндрической керамической вставки диаметром 8 мм и высотой 10 мм, со спиральным литниковым ходом внутри. Вставка изготавливается методом прессования из керамической массы, используемой обычно для получения стержней, формирующих внутреннюю полость охлаждаемой лопатки. Спиральный ход выполняется с помощью металлического вкладыша в пресс-форме, с которого «свинчивается» отпрессованная вставка. Изготовленная таким образом вставка обжигается по режимам, применяемым для керамических стержней. В верхней части вставки выполняется коническое углубление, в которое входит центрирующий выступ затравочной полости.

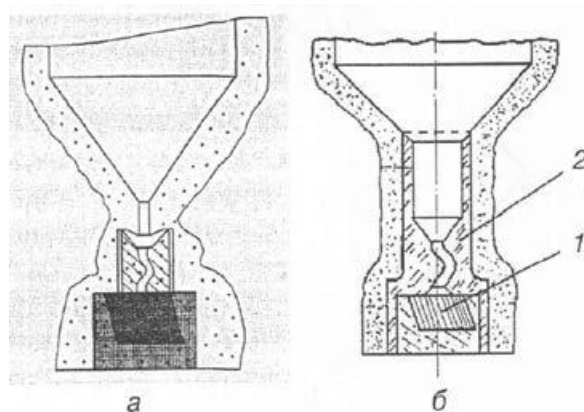


Рис.4

Затравочный метод получения монокристаллов:

а – комбинированное зарождение: затравка–кристаллоотборник;

б – единый затравочный узел;

1 – затравка;

2 – керамический затравочный узел.

С целью повышения надежности передачи структуры в состав сплава затравок был введен углерод до 0,10% и повышено содержание вольфрама до 34-35%. Температура ликвидуса при этом практически не изменилась (осталась на уровне 1510°C), углерод в составе сплава затравок, являясь активным восстановителем, препятствовал образованию оксидных налетов.

Рентгеноструктурное исследование монокристаллических отливок различных ориентаций, полученных по данной технологии, показало, что для них характерны «простые рефлексy» с угловой шириной 10–15°, соответствующие достаточно совершенным монокристаллам с дендритно-ячеистой структурой. В дальнейшем была проведена модернизация комбинированной методики зарождения затравка–кристаллоотборник с целью повышения точности заданной ориентации отливки. Для этой цели было предложено использовать единый узел зарождения, выполняемый из керамики методом прессования. Узел включает полость для размещения затравки и кристаллоотборник (рис. 4, б). Для обеспечения соосности отливки и затравки в модели выполняется посадочный конус, на котором и закрепляется узел зарождения. Как показали экспериментальные плавки, применение такой конструкции литейного блока позволяет получать заданную кристаллографическую ориентацию с точностью до 1-3°.

В ВИАМе на базе установки УВНК-8П с учетом опыта ее эксплуатации разработаны серийные компьютеризированные установки модернизированным тепловым узлом, в котором использованы современные композиционные материалы. Для литья лопаток авиационных ГТД – это установка УВНК-9А, а для получения крупногабаритных отливок с монокристаллической и однонаправленной структурой, таких как лопатки стацио-

нарных ГТУ, созданы установки УВНК-10, УВНК-14. Для достижения более высоких величин Gz в ВИАМе разработана промышленная установка УВНС-5 с охлаждением литейной формы в расплаве олова. На этой установке можно вести направленную кристаллизацию с градиентом до $20^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ (рис. 5).

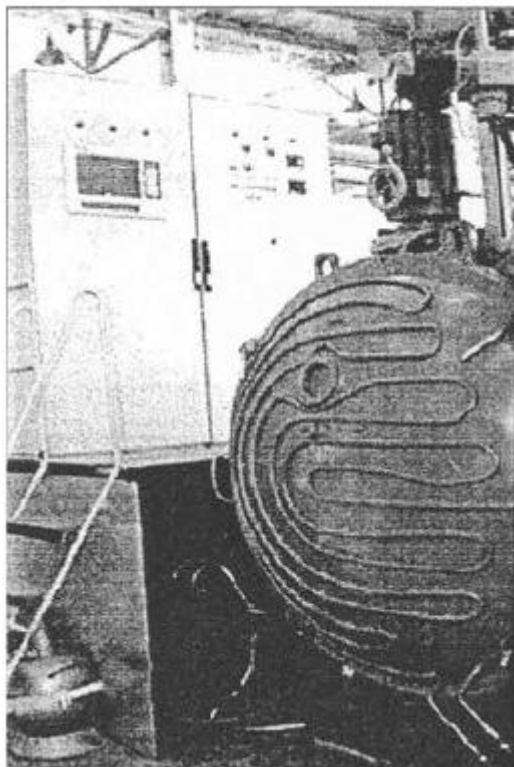


Рис. 5

Вывод. Проведенный в данной статье сравнительный анализ существующих технологий показывает, что разработанные в ВИАМе конструкции установок для высокоградиентной направленной кристаллизации и методики литья позволяют получать отливки турбинных лопаток с монокристаллической и однонаправленной структурой, во многом превосходящие зарубежные аналоги.

Список литературы

1. Официальный сайт Всероссийского института авиационных материалов: URL: <http://www.nlr.ru/lawcenter/izd/index.html> (дата обращения: 18.01.2007).
2. Барышев, Г.А. Материаловедение : лабораторный практикум— Тамбов - 2010. — 104 с.
3. Адашкин, А. М. Материаловедение в машиностроении: учебник для бакалавров —М. : Издательство Юрайт, 2013. — 535 с.

Матюхин Андрей Владимирович — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andrixbosss@gmail.com.

A.V. Matyhin

DIRECTIONAL SOLIDIFICATION HEAT-RESISTANT MATERIALS.

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 24800, Russia

Conditions desired for formation of current superalloy castings with a directional or single-crystal structure in units with radiant or liquid-metal cooling are discussed. VIAM Research Institute developed these units for high-gradient directional solidification, as well as casting techniques including combined techniques for single crystal nucleation with the use of both a nucleator and a crystal separator. This allows production of cast turbine blades with a single-crystal structure, with these blades being superior to foreign analogues in many respects

Key words: *Casting, turbine blade, ovenproof alloy, VIAM, crystallization.*

Matyhin A.V., student of the Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: andrixbosss@gmail.com.

П.М. Демин, В.Н. Пащенко

ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИИ КОНЕЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ МНОГОСЕКЦИОННОГО МАНИПУЛЯТОРА, ОСНОВАННОГО НА МЕХАНИЗМАХ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКИ С ПОМОЩЬЮ КРИВОЙ БЕЗЬЕ ВТОРОГО ПОРЯДКА

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

В статье рассматривается метод применения кривой Безье второго порядка для построения линии конечной конфигурации манипулятора, основанного на механизмах параллельной кинематики. Также разработан подход решения обратной задачи кинематики для подобного типа механизмов.

Ключевые слова: кривая Безье, робототехнический манипулятор, обратная задача кинематики.

Введение. К настоящему времени разнообразие роботов, классифицируемых по назначению, характерным признакам принципиального, схемного и конструктивного решений, чрезвычайно широко, что лишь отчасти отражено в монографической и учебной литературе. В большинстве случаев манипуляторы роботов имеют незамкнутые кинематические цепи, т.е. они имеют механизмы последовательной структуры.

Манипуляторы параллельной структуры представляют достаточно широкий диапазон механизмов, имеющих ряд преимуществ по сравнению с традиционными механизмами роботов. В механизмах параллельной структуры выходное звено связано с основанием несколькими кинематическими цепями. Общее число степеней свободы складывается. Эти механизмы воспринимают нагрузку подобно пространственным фермам и поэтому отличаются от манипуляторов с последовательным расположением звеньев повышенными показателями по точности и грузоподъемности.

Главным преимуществом подобного рода механизмов является то, что его общее число степеней свободы складывается из чисел степеней свободы совместно работающих модулей. Двигатели указанных модулей могут быть расположены ближе к основанию, и они испытывают относительно меньшее влияние при движениях механизма. Кроме того, один из модулей может обеспечить коррекцию некоторых перемещений другого модуля [1].

Указанные выше достоинства, позволяют использовать подобного типа механизмы для обслуживания технологического оборудования, самостоятельное выполнение некоторых технологических операций (сварки,

окраски и т.п.), работа в экстремальных условиях (под водой, в космосе, в условиях сильной радиации или высокой химической концентрации вредных веществ). Но приходится констатировать, что они пока мало используются в робототехнике. Среди этих причин сложность управления данными манипуляторами, ограниченный объем рабочего пространства, недостаточная проработанность методик, которые позволяли бы получать как оптимальные варианты конструкций, так и наиболее подходящие для выбранной конструкции алгоритмы автоматического или автоматизированного управления приводами [2].

Помимо односекционных манипуляторов подобного типа, разрабатываются и многосекционные манипуляторы.

Следует отметить, что такие манипуляторы еще меньше исследованы, что объясняется высокой сложностью и, в общем случае, неоднозначностью аналитического решения. Есть очень ограниченное количество научных работ, предлагающих решение лишь отдельных задач исследования многосекционных манипуляторов на параллельных структурах [2].

Постановка задачи. Кинематический синтез является одним из важнейших этапов проектирования манипуляционных механизмов. В рамках этого этапа необходимо получить решение обратной задачи кинематики. Обратная задача кинематики заключается в вычислении значений обобщенных координат каждой секции, при заданном расположении рабочего органа и известной кинематической схеме механизма.

Конечной конфигурацией манипуляционного механизма называется совокупность значений обобщенных координат, соответствующих значениям заданных координат рабочего органа и его ориентацией относительно мировой системы координат. Линией конечной конфигурации механизма является кривая, проходящая через центральные точки всех секций механизма.

В работе предлагается решение задачи автоматизированного синтеза кривой определяющей линию конечной конфигурации многосекционного манипулятора, основанного на механизмах параллельной кинематики.

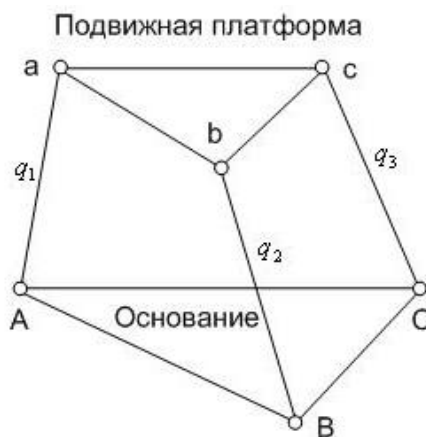


Рис. 1

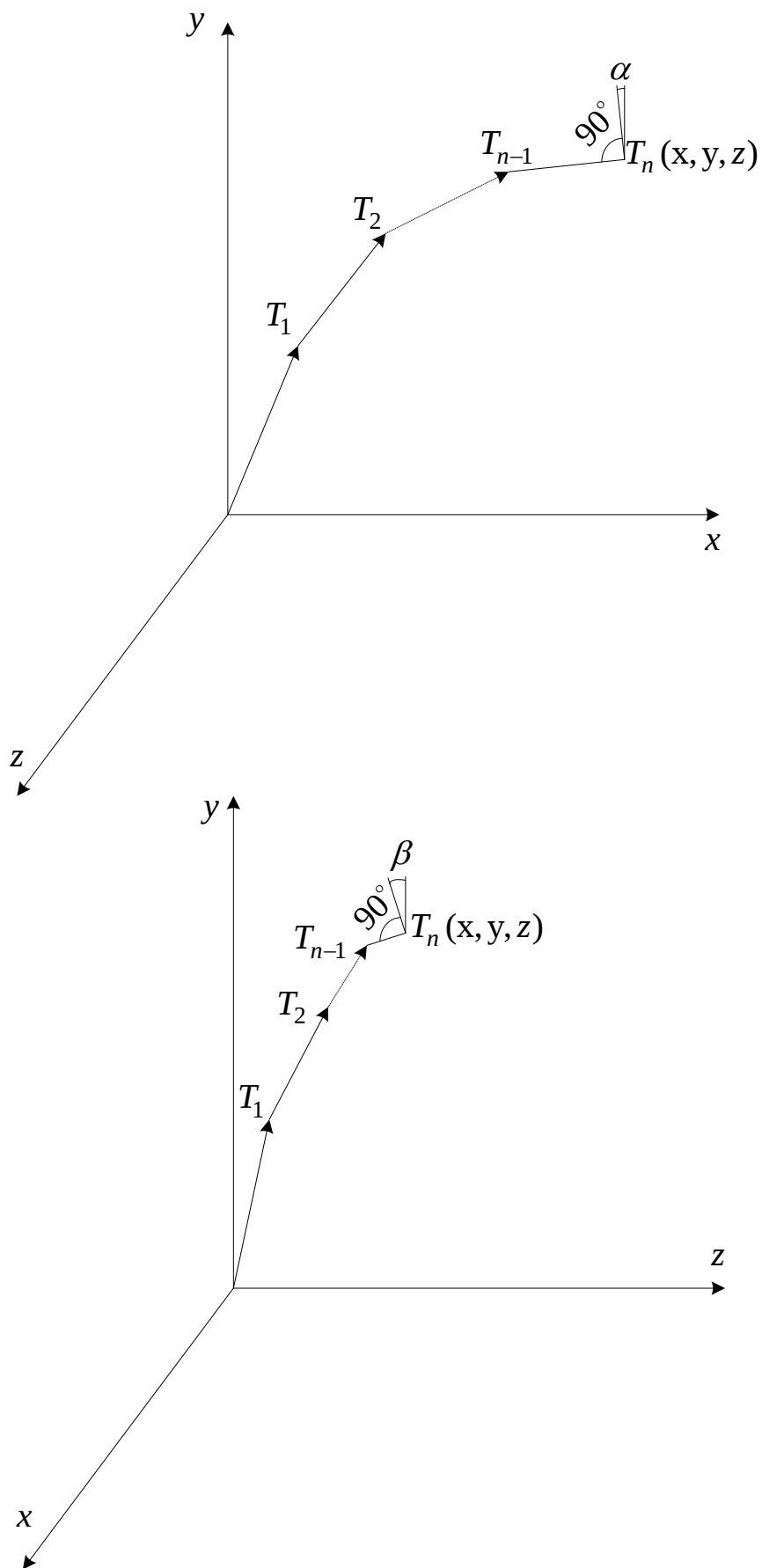


Рис. 2

Рассмотрим синтез кривой на примере механизма параллельной кинематики типа трипод, являющегося представителем класса подобного рода механизмов (Рис. 1). Трипод состоит из неподвижного основания, подвижной платформы и трех приводов соединенных с помощью сферических шарниров [2].

Движение манипулятора будем рассматривать в рабочей зоне без геометрических препятствий, и каких – либо других пространственных ограничений.

Построим линию конечной конфигурации манипуляционного механизма с заданным количеством секций, координатами и ориентацией рабочего органа (Рис. 2).

где T_i - центральная точка секции

α - угол поворота подвижной платформы последней секции в плоскости XZ

β - угол поворота подвижной платформы последней секции в плоскости YZ

Использование кривой Безье второго порядка. В работе предлагается использование кривой Безье. Это обусловлено тем, что изменение геометрии кривой Безье осуществляется за счет изменения количества и расположения опорных точек. Основным недостатком в этом случае является то, что опорные точки не лежат непосредственно на самой кривой, а всего лишь образуют пространственный многоугольник, внутри которого она расположена. Однако, поскольку в режиме работы без ограничений основной целью является попадание механизма в заданную точку, то кривая Безье удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к траектории расположения механизма.

К преимуществам использования кривой Безье можно отнести следующее:

1. Уравнения кривой представлены в параметрическом виде. Это позволяет быстро решить задачу вычисления центральных точек секций, расположенных на кривой, с помощью подстановки значения параметра

2. Простота вычисления координат опорных точек. Для кривой Безье второго порядка требуется вычислить координаты всего одной опорной точки, поскольку координаты двух оставшихся опорных точек известны из входных данных. Это обусловлено тем, что координаты первой и послед-

ней точек кривой совпадают с соответствующими точками определяющего многоугольника

3. Векторы касательных к кривой по направлению совпадают с первой и последней сторонами многоугольника. Это гарантирует необходимое расположение конечной секции

4. Степень многочлена, определяющего участок кривой, на единицу меньше количества точек соответствующего многоугольника. При использовании трех опорных точек, получается система уравнений, состоящая из многочленов второго порядка.

Расчет центральных точек секций манипулятора с помощью кривой Безье второго порядка. Кривая Безье – параметрическая кривая, задаваемая следующим выражением [4]:

$$B(t) = \sum_{i=0}^n P_i \cdot b_{i,n}(t), \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (1)$$

где P_i - функция компонент векторов опорных вершин, а $b_{i,n}(t)$ - базисные функции кривой Безье.

$$b_{i,n}(t) = \binom{n}{i} \cdot t^i \cdot (1-t)^{n-i} \quad (2)$$

где $\binom{n}{i} = \frac{n!}{i! \cdot (n-i)!}$ - число сочетаний из n по i , где n - степень полинома,

i - порядковый номер опорной вершины.

Кривая Безье второго порядка ($n=2$) задается тремя опорными точками: P_0, P_1, P_2 .

$$B(t) = (1-t)^2 \cdot P_0 + 2 \cdot t \cdot (1-t) \cdot P_1 + t^2 \cdot P_2, \quad t \in [0,1] \quad (3)$$

На рисунке 3 рассмотрен случай, при котором опорная точка P_2 расположена в плоскости XZ .

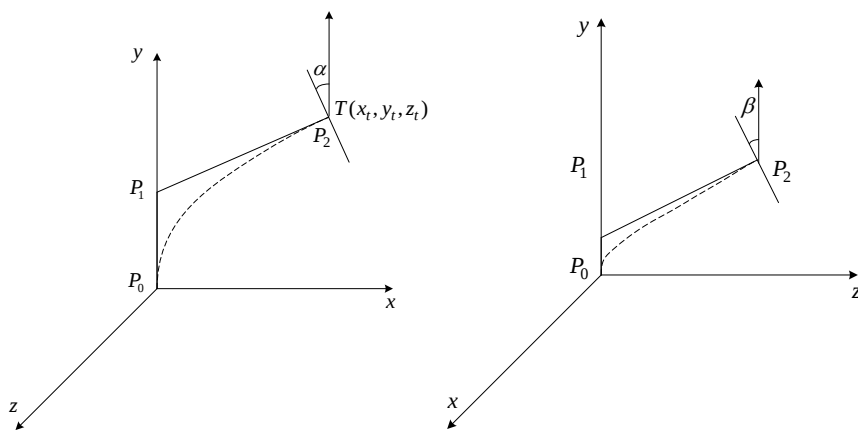


Рис. 3

P_0 - точка начала координат

P_2 - точка начала координат

В данной работе рассмотрен случай, при котором отрезок P_1P_2 является перпендикуляром к подвижному основанию последней секции манипулятора. Это обусловлено тем, что подобное решение позволяет существенно сократить объем вычислений, необходимых для решения обратной задачи кинематики.

Для нахождения координаты y точки P_1 используется проекция на плоскость XU (Рис. 4).

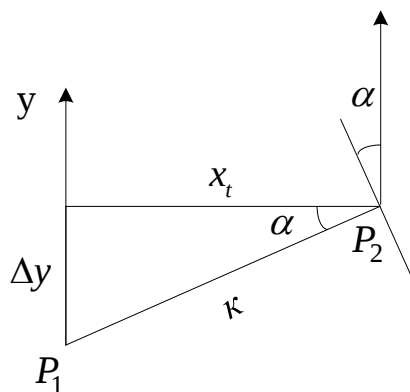


Рис. 4

Из треугольника, представленного на рисунке 4:

$$\cos \alpha = \frac{x_t}{k} \Rightarrow k = \frac{x_t}{\cos \alpha} \quad (4)$$

где k - гипотенуза, образованного треугольника

$$\sin \alpha = \frac{\Delta y}{k} \Rightarrow \Delta y = k \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

В результате преобразований получаем выражение: $\Delta y = x_t \cdot \operatorname{tg} \alpha$

Для нахождения координаты z точки P_1 используется проекция на плоскость XZ (Рис. 5).

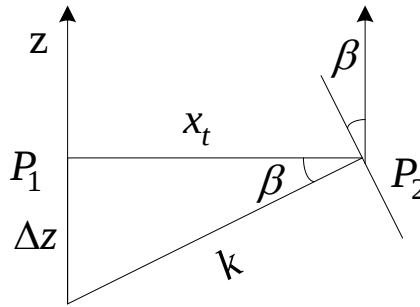


Рис. 5

Из треугольника получаем, что $\Delta z = x_t \cdot \operatorname{tg} \beta$

Далее находим координаты точки P_1 :

$$x_1 = 0;$$

$$y_1 = y_t - x_t \cdot \operatorname{tg} \alpha;$$

$$z_1 = z_t - x_t \cdot \operatorname{tg} \beta.$$

Система уравнений кривой Безье второго порядка имеет следующий вид [4]:

$$\begin{cases} x = (1-t)^2 \cdot x_0 + 2 \cdot (1-t) \cdot t \cdot x_1 + t^2 \cdot x_2 \\ y = (1-t)^2 \cdot y_0 + 2 \cdot (1-t) \cdot t \cdot y_1 + t^2 \cdot y_2 \\ z = (1-t)^2 \cdot z_0 + 2 \cdot (1-t) \cdot t \cdot z_1 + t^2 \cdot z_2 \end{cases} \quad (6)$$

Далее с помощью подстановки параметра t вычисляются координаты центральных точек секций.

Например, рассмотрим случай, когда $\Delta t = 0,2$ и количество секций $n=5$. В этом случае значение параметра t вычисляется по формуле:

$$t_i = t_{i-1} + \Delta t, i = 1 \dots n \quad (7)$$

В этом случае расстояния между двумя соседними точками будет одинаковым. Это означает, что для попадания в заданную точку суммарное выдвигание приводов каждой секции будет равным. Однако могут возникать случаи, при которых требуется обеспечить неравномерное выдвигание секций. Для этого необходимо изменять параметр $t \in [0;1]$, по определенному нелинейному закону, задаваемому условиями задачи.

Получение набора кривых, возможно за счет варьирования координат опорной точки P_2 . На рисунке 6 представлен случай, при котором проекция точки P_2 на плоскость XU не лежит на оси y .

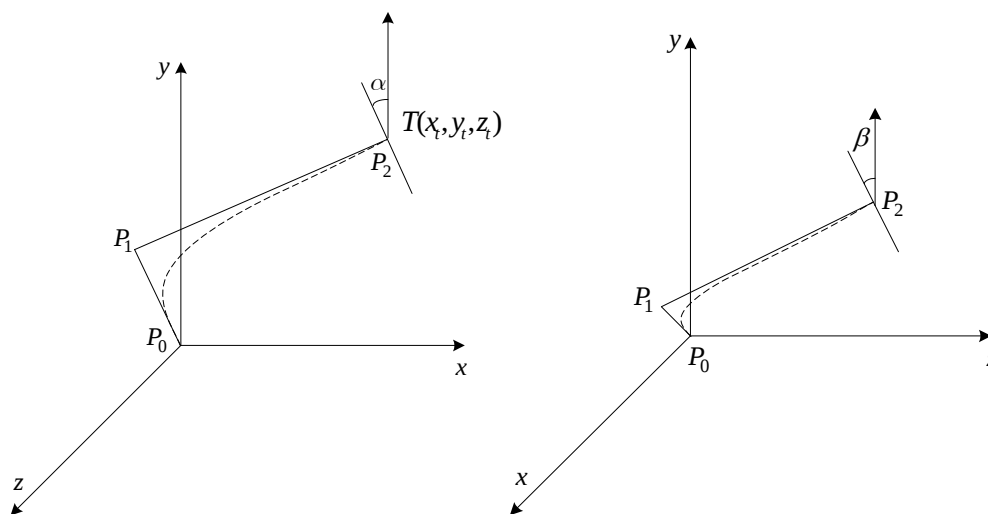


Рис. 6

На рисунке 7 представлена визуализация решения задачи построения линии конечной конфигурации для механизма с заданной структурой. Построен геометрически подобный трехмерный прототип проектируемого механизма. Механизм находится в сложенном положении.

Заключение. В данной работе представлен метод построения линии конечной конфигурации для многосекционного манипулятора, основанного на механизмах параллельной кинематики с помощью кривой Безье второго порядка. Преимущество предложенного метода заключается в том, что для построения линии конечной конфигурации в рабочем пространстве без геометрических ограничений не требуется вычисление промежуточных точек между мировой системой координат и координатами точки схвата. Это значительно сокращает количество вычислений, а кривая Безье является оптимальной кривой с точки зрения гладкости.

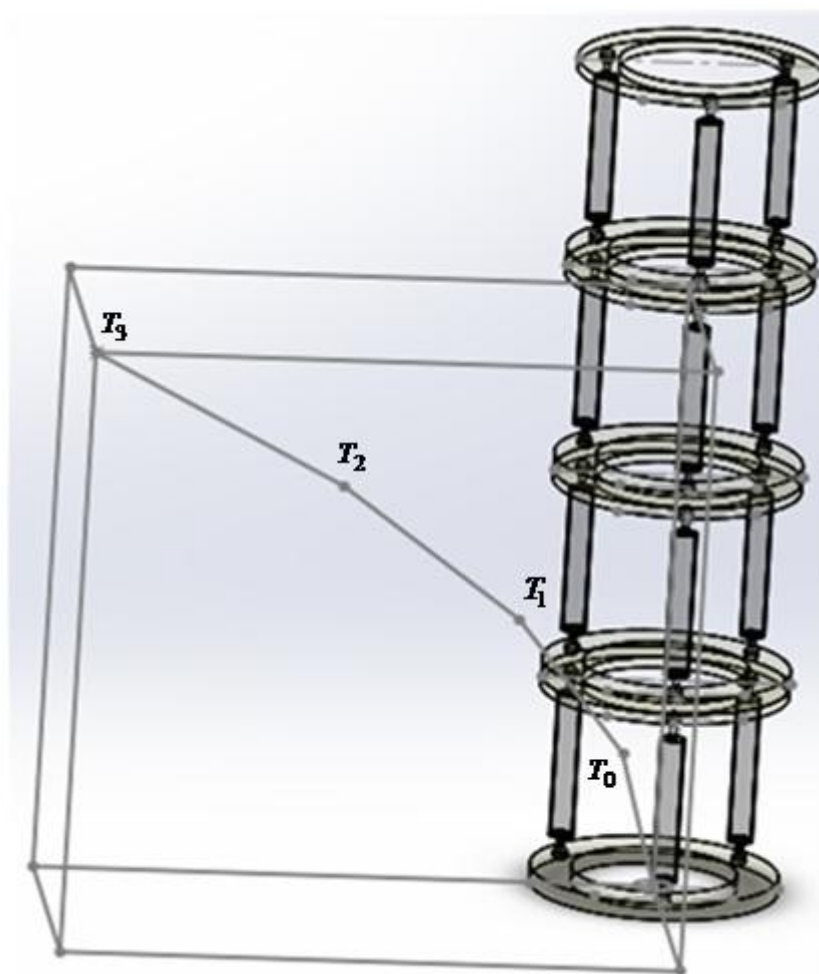


Рис. 7

Список литературы

1. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. М. : Наука, 1991, 96 с.
2. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф., Модель Б.И. Принципы классификации и методы анализа пространственных механизмов с параллельной структурой. / Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение. 1990, № 1, с. 41-49.
3. Хейло С.В., Глазунов В.А., Сухоруков Р.Ю. Решение задачи кинематики поступательно-направляющего манипулятора. // Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 2. С. 11-16.
4. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики // М.: Мир, 2001 – 604с.

Демин Павел Михайлович — ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: pasha3103@bk.ru.

Пашенко Василий Николаевич — канд. техн. наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: pashenkovn@inbox.ru.

P.M. Demin, V.N. Pashchenko

CONSTRUCTION OF THE ULTIMATE CONFIGURATION LINE FOR MULTISECTIONAL MANIPULATOR BASED ON PARALLEL KINEMATICS USING A QUADRATIC BEZIER CURVE

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga,
24800, Russia

This article discusses a method of applying a quadratic Bezier curve to build the ultimate configuration line for manipulator based on parallel kinematics. Also developed an approach for solving the inverse kinematics for this type of mechanisms.

Keywords: Bezier curve, robotic manipulator, inverse kinematics.

Demin P.M., assistant of the Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: pasha3103@bk.ru.

Pashchenko V.N., Associated professor, Ph.D. of Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: pashenkovn@inbox.ru.

И.Д. Соколова, М.С. Скворцов, К.Н. Юсупова

ПРОГРАММНЫЙ МЕТОД СИЛОВОГО РАСЧЕТА ПРИВОДА ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

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

Рассмотрен программный метод силового расчета привода главного движения металлорежущего оборудования. Приведена блок-схема, описывающая структуру программы. Проанализирован расчет шпиндельного узла.

Ключевые слова: *Металлорежущее оборудование, силовой расчет, привод главного движения, Borland Pascal.*

Цель работы: повышение точности и производительности расчета на жесткость и прочность привода главного движения металлорежущего оборудования. Данный метод можно применять для проверки домашних заданий, курсовых и дипломных проектов, основанных на расчетах приводов рабочих движений технологического оборудования.

Введение. Создание современных, точных и высокопроизводительных металлорежущих станков обуславливает повышенные требования к их основным узлам. В частности, к приводам главного движения и подач предъявляются требования по увеличению жёсткости, повышению точности вращения валов, шпиндельных узлов. Станки должны обеспечивать возможность высокопроизводительного изготовления деталей, удовлетворяющих современным непрерывно возрастающим требованиям к точности.

В большинстве станков в качестве привода главного движения применяют коробки передач со ступенчатым регулированием частоты вращения, соединённые с асинхронным электродвигателем. К приводам главного движения предъявляют следующие требования: обеспечение необходимой мощности резания, сохранение постоянства мощности резания в коробках скоростей и крутящего момента, обеспечение заданного диапазона регулирования скорости, высокий КПД, надёжность, простота обслуживания и малые размеры.

В данном методе рассматриваются несколько этапов: определение модуля зубчатых передач, расчет клиноременной передачи, валов коробки передач на прочность и жесткость (силовой расчет).

Определение модуля зубчатых передач. Модуль зубчатых передач определяется, исходя из прочности зуба на изгиб и из усталости поверхностных слоёв. Для каждой группы передач рассчитываются диаметры зуб-

чатых колес, измеренные по делительной окружности, ширина зубчатого венца, межосевые расстояния зубчатых передач.

Расчет клиноременной передачи. Следующим этапом является расчет ременной передачи. Ременные передачи – это передачи гибкой связью, состоящие из ведущего и ведомого шкивов и надетого на них ремня. В состав передачи могут также входить натяжные устройства и ограждения. Возможно применение нескольких ремней и нескольких ведомых шкивов. Основное назначение – передача механической энергии от двигателя передаточным и исполнительным механизмам, как правило, с понижением частоты вращения. Ремни должны обладать достаточно высокой прочностью при действии переменных нагрузок, иметь высокий коэффициент трения при движении по шкиву и высокую износостойкость. Ременные передачи применяются для привода агрегатов от электродвигателей малой и средней мощности; для привода от маломощных двигателей внутреннего сгорания. Наибольшее распространение в станках находят клиноременные передачи. Эти передачи широко используют при малых межосевых расстояниях и вертикальных осях шкивов, а также при передаче вращения несколькими шкивами. Теоретически тяговая способность клинового ремня при том же усилии натяжения в три раза больше, чем у плоского. Однако относительная прочность клинового ремня по сравнению с плоским несколько меньше (в нем меньше слоев армирующей ткани), поэтому практически тяговая способность клинового ремня приблизительно в два раза выше, чем у плоского. Это свидетельство в пользу клиновых ремней послужило основанием для их широкого распространения, в особенности в последнее время. Клиновые ремни могут передавать вращение на несколько валов одновременно.

В зависимости от крутящего момента на роторе электродвигателя определяется тип ремня и диаметр меньшего шкива передачи. Далее рассчитываются кинематические (скорость ремня и передаточное отношение) и следующие геометрические параметры передачи: диаметр большего шкива, межосевое расстояние ременной передачи, длина ремня, угол обхвата на меньшем шкиве, ширина шкива.

Силовой расчет. Блок-схема описания структуры программы в Borland Pascal представлена на рис.1, рис.2 и рис.3.

Результатом силового расчета ременной передачи служит определение силы, действующей на входной вал со стороны ременной передачи.

Конструктивная форма и размеры входного вала влияют на компоновку и параметры других валов редуктора. Средний диаметр вала определяют ориентировочно в зависимости от величин крутящего момента на валу и допускаемого касательного напряжения.

Для расчета вала составляют расчетную схему. Исходными данными являются схема поперечного сечения редуктора и его кинематическая схема. Расчетную схему вала представляют в виде балки на шарнирных опо-

рах, что соответствует наиболее типичному случаю для валов редуктора, когда в каждой опоре установлен один подшипник качения. Подшипник, одновременно воспринимающий осевые и радиальные нагрузки, заменяют шарнирно неподвижной опорой, а подшипник, воспринимающий только радиальные силы – шарнирно подвижной опорой.

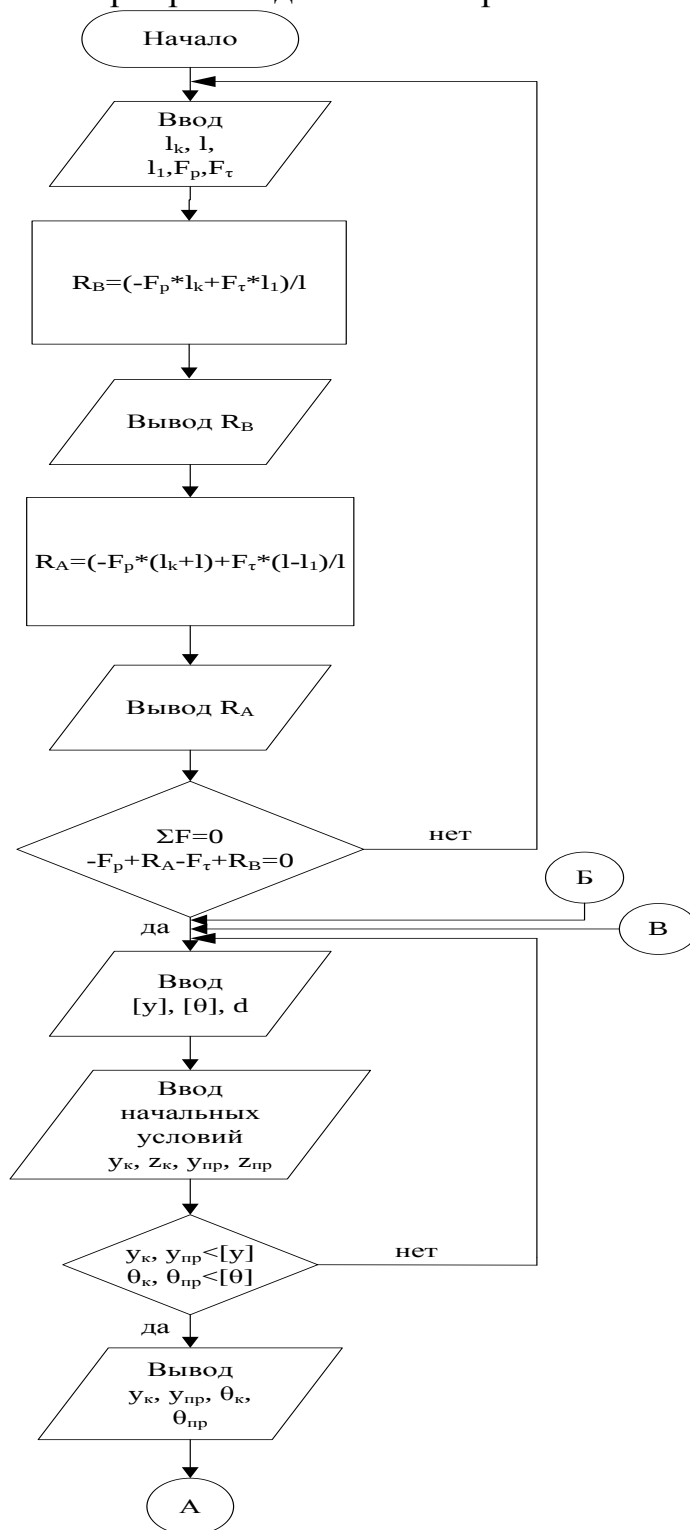


Рис.1

Если на валу расположено несколько поочередно работающих зубчатых колес, то необходимо выяснить, в каком случае имеют место наибольшие нагрузки на опоры и наибольший изгибающий момент на валу. Определяются проекции всех действующих сил в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Затем находят величины реакций в опорах вала. Уравнения прогиба и угла поворота консольной и пролетной частей вала определяют путем интегрирования дифференциального уравнения второго порядка как функции отношения суммы изгибающих моментов, действующих на валу, к произведению модуля Юнга на осевой момент инерции вала. Полученные при интегрировании неизвестные константы находят при установлении начальных условий: в сечениях опор прогибы вала приравниваются нулю.

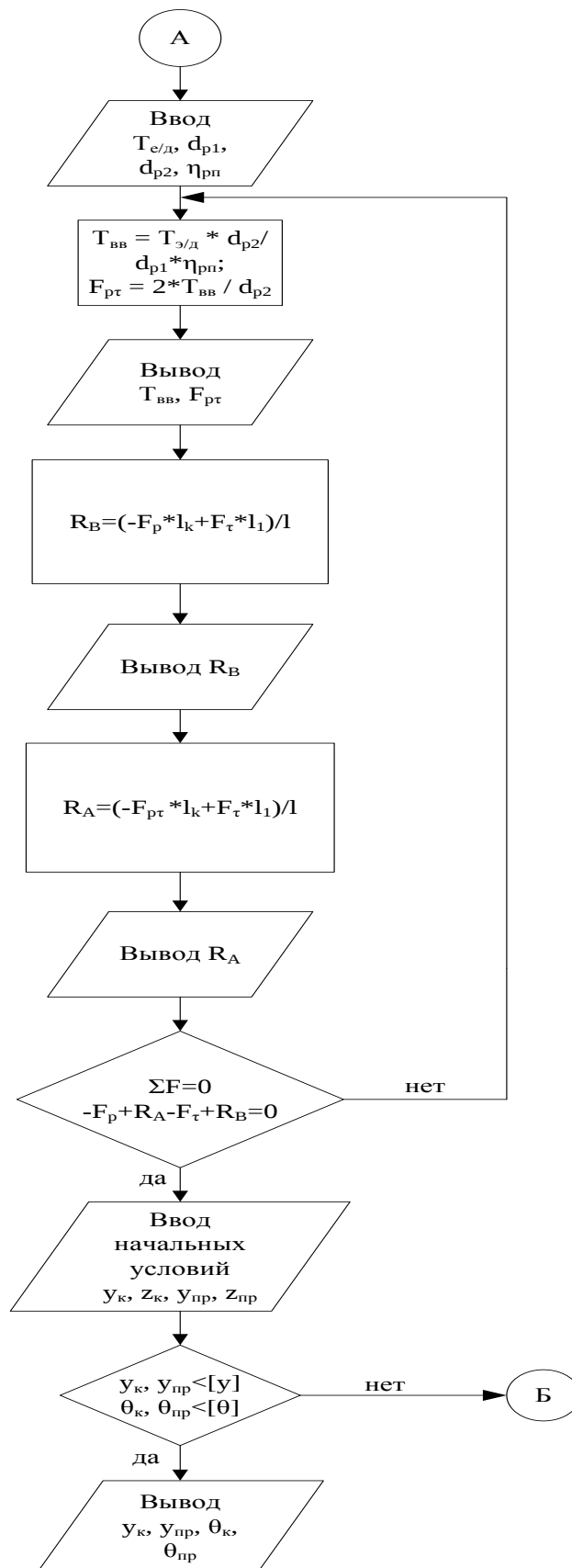


Рис.2

После нахождения констант интегрирования определяют прогибы и углы поворота вала отдельно для консольной и пролетной частей в опас-

ных сечениях. Затем эти величины сравнивают с допустимыми значениями, при превышении которых необходимы увеличение среднего диаметра вала и повторная проверка его на жесткость.

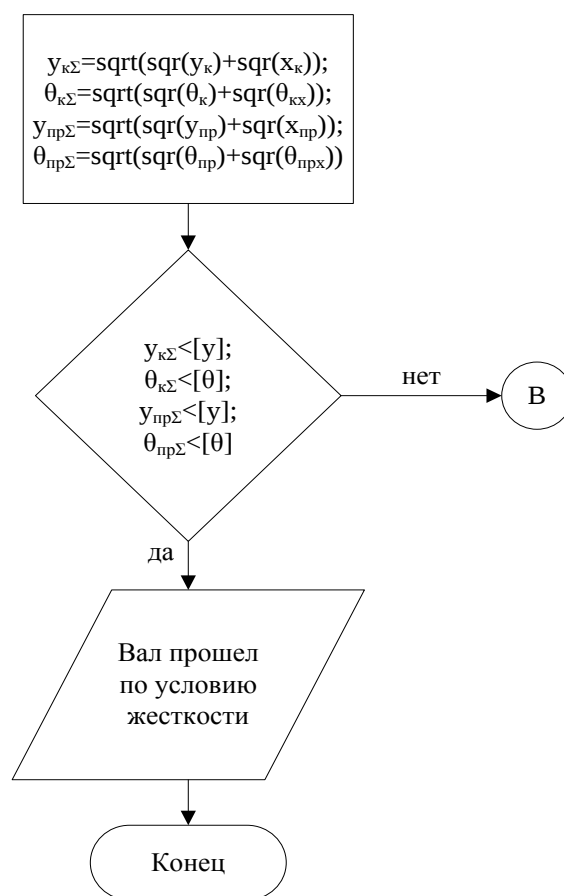


Рис.3

Расчет шпиндельного узла. Шпиндельный узел является одним из основных узлов станка, конструктивная форма и размеры которого влияют на компоновку и параметры других узлов. На предварительном этапе проектирования шпиндельного узла выбирают тип опор и схему их расположения; определяют основные конструктивные параметры шпинделя; выбирают тип приводной передачи.

Расчетную схему узла обычно представляют в виде балки с консолью на двух шарнирных опорах. Определяются основные размеры шпинделя: диаметры шеек шпинделя под переднюю и заднюю опоры, переднего конца шпинделя; вылет шпинделя; расстояние между опорами. Минимальное значение диаметра шейки шпинделя под передней опорой зависит от мощности привода главного движения и типа шпинделя. Выбор значения этого диаметра влияет на величины диаметров переднего конца шпинделя, шейки шпинделя под заднюю опору и диаметра шпинделя между опорами. Вылет шпинделя зависит от параметров переднего конца для крепления инструмента или приспособления, размеров уплотнений под подшипники, ширины первого подшипника. Его значение влияет на выбор величины

расстояния между опорами. Определяются реакции в опорах в зависимости от значения силы резания на переднем торце узла. Рассчитывают прогиб переднего торца шпинделя. Полученное значение прогиба сравнивают с допустимым значением, и при его превышении необходим пересчет размеров вала.

Заключение. Так как этот процесс итеративный, и возможно неоднократное повторение изложенных этапов, то для оптимизации процесса была разработана программа силового расчета привода главного движения металлообрабатывающего оборудования с визуальным пользовательским интерфейсом в среде Borland Pascal. Данный метод позволяет при помощи программного обеспечения легко производить расчеты, как преподавателям, так и студентам.

Список литературы

1. *Кудрявцев В.Н.* Курсовое проектирование деталей машин – Л.: Машиностроение, 1984
2. *Проников А.С.* Расчет и конструирование металлорежущих станков – М.: Высшая школа, 1968
3. *Пуш В.Э.* Конструирование металлорежущих станков – М.: Машиностроение, 1977
4. *Соколова И.Д., Беккель Л.С.* Программный метод расчета на жесткость входного вала редуктора// Научно-технические достижения в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе. Сборник трудов Всероссийской науч.-техн. конф., М., 2009г.
5. *Соколова И.Д., Беккель Л.С.* Программный метод проектного расчета шпиндельного узла// Научно-технические достижения в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе. Сборник трудов Всероссийской науч.-техн. конф., М., 2009г.

List of references

1. *Kudryavtsev V.N.* Course design of machine parts - L.: Engineering , 1984
2. *Pronikov A.S.* Calculation and design of metal-cutting machines - Moscow: Higher School , 1968
3. *Push V.E.* Construction of machine tools - Mashinostroyeniye , 1977
4. *Sokolova I.D., Bekkel L.S.* Programmatic method based on input shaft stiffness // High Tech in the instrument and the engineering and development of innovation activities in high school . Proceedings of the All-Russian Scientific - Technical. conf. , M. , 2009.

5. Sokolova I.D., Bekkel L.S. Software design calculation method of spindle assembly // High Tech in the instrument and the engineering and development of innovation activities in high school . Proceedings of the All-Russian Scientific -Technical. conf. , М. , 2009.

Соколова И.Д. — доцент, к.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sokolovairinadm@rambler.ru.

Скворцов М.С. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: skvmakser@yandex.ru.

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

I.D. Sokolova, M.S. Skvortsov, K.N. Yusupova

SOFTWARE METHOD OF CALCULATING THE POWER MAIN DRIVE CUTTING EQUIPMENT

The program method of power calculation of the drive of the main movement of the metal-cutting equipment is considered. The flowchart describing structure of the program is provided. Calculation of shpindelny knot is analysed.

Key words: *Metal-cutting equipment, power calculation, drive of the main movement, Borland Pascal.*

Sokolova I.D., docent, C.T.S. of the Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: sokolovairinadm@rambler.ru.

Skvortsov M.S., student of Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: skvmakser@yandex.ru.

Yusupova K.N., student of the Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: lapylya9206@mail.ru.

РАДИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Контроль является одним из важнейших звеньев на пути жизненного цикла детали. Именно от качества контроля зависит удовлетворенность заказчика приобретаемой продукцией, а значит и повышение конкурентоспособности предприятия на рынке. В настоящее время всё шире используются радиационные методы контроля как тип неразрушающего контроля. Эти методы имеют массу преимуществ, так как их легко автоматизировать и обеспечить сплошной контроль продукции. Именно в этом направлении сейчас развиваются многие зарубежные производители, и именно данное направление целесообразно внедрять на крупнейших российских машиностроительных предприятиях.

Ключевые слова: Радиационные методы контроля, неразрушающий контроль, качество, производительность, автоматизация.

В современных рыночных условиях, чтобы полностью удовлетворять потребителей и заказчиков, а также выдерживать огромную конкуренцию, производители обязаны уделять большое внимание качеству и надежности производимой продукции. Ведь именно эти показатели определяют долговечность, безопасность, а, следовательно, и конкурентоспособность продукции. Определить, не присутствуют ли в изделии трещины, поры, раковины и другие дефекты, а также соответствует ли полученное изделие предъявляемым требованиям, поможет контроль.

Существуют два основных способа контроля:

Неразрушающий контроль - контроль надежности и основных рабочих свойств и параметров объекта или отдельных его элементов/узлов, не требующий выведения объекта из работы либо его демонтажа.

Основными методами неразрушающего контроля являются [1]:

- магнитный;
- электрический;
- вихретоковый;
- акустический;
- радиационный;
- тепловой;
- радиоволновой;
- оптический;

- проникающими веществами.

Разрушающий контроль - совокупность методов измерения и контроля показателей качества изделия, по завершении которого нарушается пригодность объекта контроля к использованию по назначению.

Одним из главных недостатков большинства методов неразрушающего контроля является то, что таким образом можно определить только поверхностные дефекты. Чтобы проникнуть внутрь изделия необходимо использовать проникающее излучение: рентгеновское, гамма-излучение, инфракрасное, ультразвуковое, и т.д. В машиностроении часто используется радиационный метод, так как он позволяет получить полную картину внутреннего строения изделия вне зависимости от толщины. Стоит отметить, что рентгеновское излучение используется при небольшой толщине, тогда как при большой толщине используется гамма-излучение, испускаемое радиоактивными изотопами.

Методы радиационной дефектоскопии позволяют выявлять самые разнообразные дефекты в сталях и сплавах (преимущественно объемные типа пор, раковин, непроваров), а также трещины, направление которых в металле совпадает с направлением просвечивания в диапазоне углов 0 – 12°. Такой способ контроля часто применяется при контроле сварочных швов. [2]

В таблицах 1 и 2 приведены используемые в радиационной дефектоскопии источники излучения и проанализированы возможности указанных выше методов. [2]

Таблица 1

Основные характеристики источников гамма-излучения

Показатели	Радиоактивные изотопы			
	Co-60	Cs-137	Yr-192	Tm-170
Период полураспада	5,3 года	30 лет	75 дней	129 дней
Энергия, МэВ	1,33-1,17	0,662	0,2-1,06	0,084
Возможная контролируемая толщина стали, мм	10-250	10-120	5-100	До 20
Чувствительность, %	4-6	-	1,5	-

Таблица 2

Области эффективного применения источников ионизирующего излучения в радиационной дефектоскопии

Толщина контролируемого металла, мм				Радиоактивные изотопы	Напряжение рентгеновских аппаратов, кВ
Fe	Ti	Al	Mg		

1-12	2-25	8-100	20-200	Тулий-170	60-140
10-70	20-120	45-250	65-300	Иридий-192	140-400
25-100	50-170	95-300	130-420	Цезий-137	-
35-200	100-340	190-550	280-820	Кобальт-60	-

Методы радиационного контроля различаются способами детектирования дефектоскопической информации и, соответственно, делятся на [3]:

1. Радиографические методы радиационного неразрушающего контроля.

Основаны на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. На практике этот метод наиболее широко распространен в связи с его простотой и документальным подтверждением получаемых результатов.

В зависимости от используемых детекторов различают:

- пленочную радиографию;
- ксерорадиографию (электрорадиографию).

В первом случае детектором скрытого изображения и регистратором статического видимого изображения служит фоточувствительная пленка, во втором - полупроводниковая пластина, а в качестве регистратора используют обычную бумагу.

2. Радиационная интроскопия.

Метод неразрушающего контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем анализ полученного изображения проводится в процессе контроля. Чувствительность этого метода несколько меньше, чем радиографии, но его преимуществами являются повышенная достоверность получаемых результатов благодаря возможности стереоскопического видения дефектов и рассмотрения изделий под разными углами, а также "экспрессность" и непрерывность контроля. Более подробно данный метод будет рассмотрен далее.

3. Радиометрическая дефектоскопия.

Метод получения информации о внутреннем состоянии контролируемого изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением, в виде электрических сигналов (различной величины, длительности или количества). Этот метод обеспечивает наибольшие возможности автоматизации процесса контроля и осуществления автоматической обратной связи контроля и технологического процесса изготовления изделия. Преимуществом метода является возможность проведения непрерывного высокопроизводительного контроля качества изделия, обусловленная высоким быстродействием применения аппаратуры. По чувствительности этот метод не уступает ра-

диографии. Именно на этом методе построены все современные устройства, использующие рентгеноскопию как средство контроля.

При радиационнодефектоскопическом контроле качества сварных соединений применяют источники излучения следующих трех основных типов [4]:

1. Рентгеновские аппараты.

Рентгеновские аппараты — наиболее распространенные источники фотонов в диапазоне энергий от единиц до сотен килоэлектронвольт. Рентгеновское излучение в рентгеновском аппарате образуется в вакуумном приборе, называемом рентгеновской трубкой. В рентгеновской трубке помещается подогревной катод, нить накала которого служит источником термоэлектронов, и массивный анод. При приложении к катоду и аноду разности потенциалов электроны, эмитируемые катодом, ускоряются и бомбардируют анод. При торможении электронов в материале анода образуется тормозное и характеристическое рентгеновское излучение, которым просвечивают контролируемые объекты. Участок поверхности мишени, на котором преимущественно тормозится пучок электронов, называется действительным фокусным пятном рентгеновской трубки. Проекция фокусного пятна в направлении оси рабочего пучка на плоскость, перпендикулярную этой оси, называется эффективным фокусным пятном рентгеновской трубки. Для питания рентгеновской трубки в рентгеновском аппарате служит высоковольтный генератор, обеспечивающий накал катода и высокое напряжение.

Управление током и напряжением на рентгеновской трубке и контроль за работой аппарата осуществляют с пульта управления. С целью защиты обслуживающего персонала от неиспользуемого рентгеновского излучения и высокого напряжения рентгеновские трубки помещают в специальные, как правило, освинцованные защитные кожухи.

2. Гаммадефектоскопы.

Значительный объем контроля сварных и паяных соединений осуществляется с помощью гаммадефектоскопов. Основные характеристики радиоизотопных источников — энергетический спектр излучения, выход излучения, период полураспада и геометрические размеры источников.

Энергетический спектр гамма-излучения имеет характер дискретных линий, как правило, в широком диапазоне энергий и с различной относительной интенсивностью. В зависимости от энергии гамма-фотонов радиоизотопные источники излучения делят на три группы: источники с жестким гамма-излучением (энергия фотонов около 1 МэВ и более), источники с гамма-излучением средней энергии (примерно 0,3—0,7 МэВ) и низкоэнергетические источники гамма-излучения (энергия менее 0,3 МэВ). В настоящее время для гамма-дефектоскопического контроля используют радиоизотопные источники на основе следующих изотопов в порядке воз-

растания энергии: ^{170}Tm , ^{192}Ir , ^{137}Cs , ^{60}Co . Этими радиоизотопными источниками заряжают гамма-дефектоскопы различного назначения.

3. Линейные ускорители и микротроны.

В качестве источников высокоэнергетического фотонного излучения в радиационных методах неразрушающего контроля используют ускорители электронов, сообщаящие им кинетическую энергию в диапазоне 1100 МэВ: линейные ускорители, микротроны и бетатроны.

Хотя рентгенография широко используется при контроле изделий, ее применение ограничивается тем, что она требует значительных затрат на обработку и расшифровку рентгенограмм. Часто высокие темпы современного производства требуют экспресс-контроль, и в этом случае используют метод радиационной интроскопии (радиоскопии), основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем получаемое изображение анализируется в процессе контроля.

Первоначальный термин - флюороскопия - обозначает метод радиационной интроскопии, в котором в качестве радиационно-оптического преобразователя используется флуоресцентный экран. Термины - "радиография в реальном времени" и "формирование изображений в реальном масштабе времени" - используют в зарубежной литературе для описания методов радиационной интроскопии, в которых в качестве радиационно-оптических преобразователей применяют промышленные усилители радиационного изображения, т.е. устройства, в которых за счет дополнительных источников энергии, не связанных с ионизирующим излучением, в процессе облучения происходит радиационно-оптическое преобразование с коэффициентом усиления яркости более единицы.

Коэффициент усиления яркости — это отношение значения яркости выходного экрана радиационно-оптического преобразователя к значению яркости эталонного флуоресцентного экрана при одинаковых заданных условиях облучения входной плоскости преобразователя и флуоресцентного экрана.

Главное достоинство радиоскопии заключается в том, что световое изображение на выходном экране становится достаточно качественным, как только плотность потока энергии квантов радиационного изображения достигнет определенного значения.

Качество светотеневого изображения просвечиваемого объекта зависит от характеристик излучения и радиационно-оптического преобразователя, причем при радиоскопии значения некоторых характеристик (плотность потока энергии излучения, его спектральный состав, коэффициент усиления яркости радиационно-оптического преобразователя, его коэффициент передачи контраста и пр.) можно изменять в процессе анализа светового изображения. Добиться наилучшего качества этого изображения

можно, не зная оптимальных параметров радиационного интроскопа и не прибегая ни к каким расчетам.

Простота оптимизации качества световых изображений дает оператору интроскопа возможность либо увеличивать геометрические размеры светового изображения объекта, перемещая объект от входного экрана преобразователя в направлении высокоэнергетического источника, либо осуществить поворот и смещение объекта, чтобы подобрать оптимальный угол падения излучения на объект. В рентгенографии этим почти никогда не пользуются. Если облучаемый образец неоднороден по плотности или имеет значительные вариации радиационной толщины и трудно анализировать отдельные детали световой картины, можно использовать подвижные фильтры, позволяющие локально уменьшать плотность потока энергии излучения, взаимодействующего с преобразователем. Можно также вначале облучать объект фотонами с большой длиной волны, что позволит изучить области объекта слабого поглощения, а затем увеличивать энергию фотонов, чтобы последовательно наблюдать области более высокого поглощения. Этот метод позволяет выявить и определить характер дефектов как неподвижных, так и находящихся в движении объектов.

В настоящее время в состав радиационно-оптических преобразователей, кроме оптических и телевизионных устройств, широко внедряются цифровые устройства. Комбинация оптических, телевизионных и цифровых устройств позволяет наиболее полно и оптимально использовать резервы улучшения основных характеристик интроскопов по сравнению с оптическими, электронными и цифровыми системами, применяемыми по отдельности. Оптические устройства могут проводить низкочастотную фильтрацию для подавления шума и исключения мелких структур в световом изображении. Телевизионная электроника позволяет осуществлять нелинейные преобразования электрических сигналов и их обращение, высокочастотную фильтрацию и т.п. Цифровое устройство может проводить коррекцию аналоговых систем: выполнять множество простых операций и использоваться как память. С помощью цифровых устройств яркость светового изображения при различной экспозиции может изменяться в широких пределах. Специальным выбором характера указанной зависимости определенные участки контролируемого объекта со сложным профилем радиационной толщины в световой картине могут быть выделены и их структура представлена с высокой степенью контрастности. [4]

Одним из важных для практического применения свойств комбинированных систем радиационной интроскопии является почти неограниченная возможность интегрирования изображений, что позволяет использовать в системах радиационной интроскопии радиоактивные источники, в том числе и нейтронные. Во многих случаях радиоскопия предпочтительна и с точки зрения техники безопасности, так как выходной экран преобразователя может быть расположен на значительном расстоянии от источника.

Класс радиационно-оптических преобразователей изображения, т.е. устройств, предназначенных для преобразования радиационного изображения в световое, характеризуется огромным разнообразием типов приборов, их составом и технологией изготовления. Так, уже существующие и разрабатываемые радиационно-оптические преобразователи основываются на явлениях рентгенолюминесценции, электрических и тепловых эффектах в жидких кристаллах, электрооптических эффектах в монокристаллах и керамических материалах, процессе вторичной эмиссии, генерирования света в твердых телах в результате электронной бомбардировки, инъекции носителей под влиянием электрических полей и т.п. [5]

Как уже было сказано выше, в современном машиностроении радио-скопические устройства плотно связаны с использованием ЭВМ. Сканирование изделия позволяет получить его 3D-изображение с целью сравнения его размеров с размерами спроектированной ранее 3D-модели, анализа внутренних и внешних дефектов и пористости, внутреннего анализа сборочных изделий, и др.

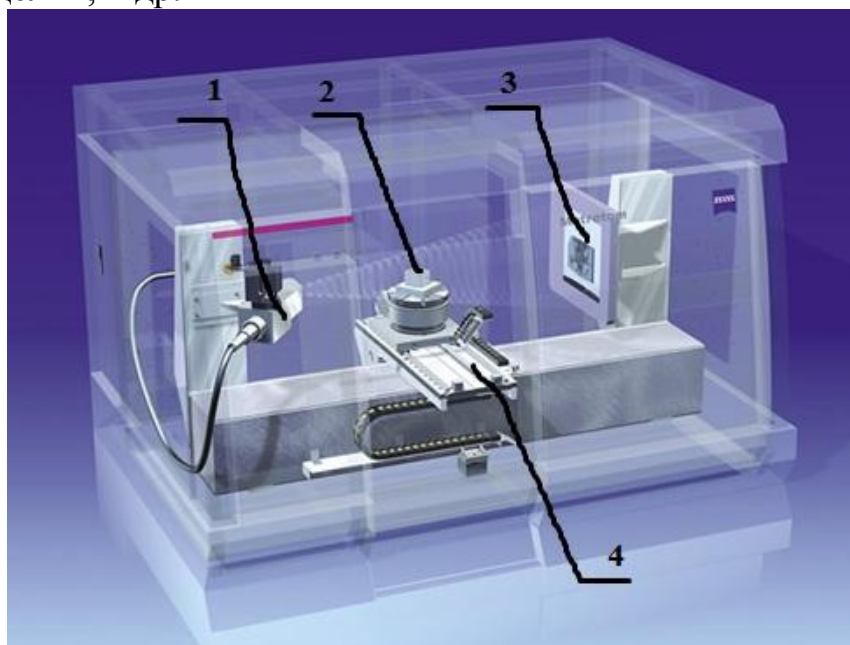


Рис.1

При радиационном контроле используют следующие основные элементы (рис.1):

- источник ионизирующего излучения (1);
- контролируемый объект (2);
- детектор, регистрирующий дефектоскопическую информацию (3);
- поворотный стол (4), который позволяет детектору получить изображение детали со всех сторон.

При прохождении через изделие ионизирующее излучение ослабляется – оно поглощается и рассеивается. Степень ослабления зависит от толщины, плотности и атомного номера материала контролируемого объекта, а также от интенсивности и энергии излучения. При наличии в веществе

дефектов изменяются интенсивность и энергия пучка излучения. Полученная детектором информация передается на ЭВМ, там обрабатывается с помощью программного обеспечения для визуализации, которое позволяет преобразовать полученные 2D-изображения в 3D-модель объекта. Далее оператор или контролер может анализировать данные, просматривать различные слои внешней и внутренней структуры и, по мере необходимости, вносить определенные поправки. На рис. 2 можно увидеть созданную таким способом 3D-модель изделия. [6]

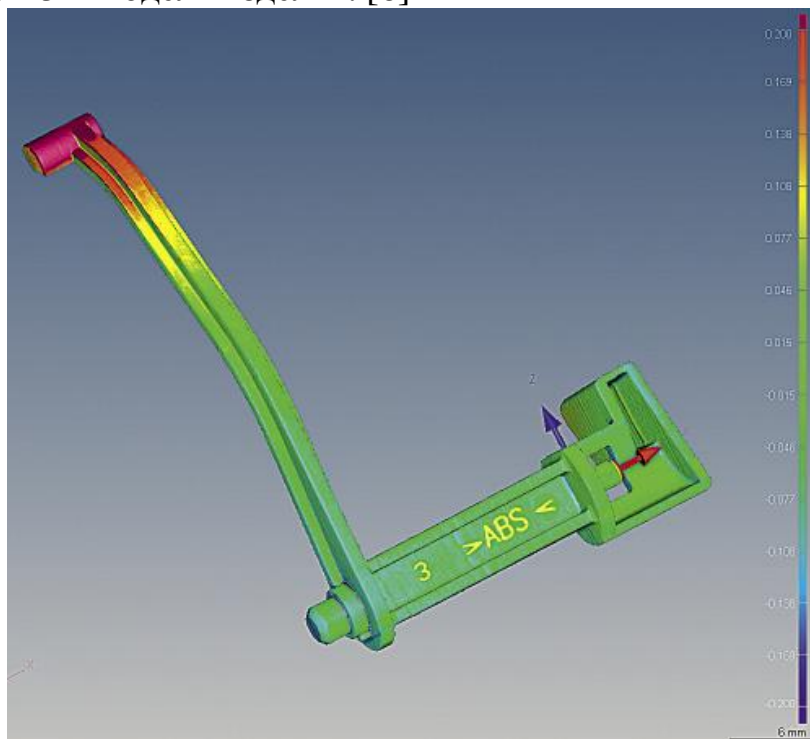


Рис.2

Стоит отметить, что разрешение полученного изображения определяется т.н. “вокселями”, т.е. кубическими пикселями, и чем меньше воксель, тем выше разрешение. А сам размер вокселя зависит от количества полученных 2D-изображений, а, соответственно, от скорости поворота стола. Число изображений может колебаться от 1000 до 4000 в зависимости от того, с какой целью проводится рентгеноскопия и какого разрешения хочет добиться сам оператор. Также в зависимости от цели и контролируемого изделия различается и время проведения данной операции: от 10 минут до нескольких часов. Но некоторые производители подобной техники производят оборудование, которое может проводить полное сканирование всего за 6 секунд, и которое может быть встроено в автоматизированную линию. [6]

В машиностроении рентгеноскопию целесообразно применять в производстве особо ответственных изделий из труднообрабатываемых материалов (например, производство частей двигателей самолетов, кораблей, деталей оборонной промышленности из титана, никеля и т.д.). Данные

системы могут также и в медицинской промышленности для контроля точности и качества медицинской техники и протезов, т.к. одним из обязательных условий является их чистота, а этот метод является бесконтактным и не загрязняющим поверхность изделий.

Список литературы

1. ГОСТ 18353-79 - Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов – 12 с.

2. *Алешин Н.П.* Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. Учебник для вузов. - М., Машиностроение, 2006, 368 с.

3. *Добромыслов В.А.* Радиационные методы неразрушающего контроля. – М., Машиностроение, 1999, 104 с.

4. *Клюев В.В., Соснин Ф.Р.* Неразрушающий контроль. Том 1. Кн.1(Визуальный и измерительный контроль). Кн. 2 (Радиационный контроль). 2-е изд. – М., Машиностроение, 2008, 560 с.

5. *Назипов Н.А., Храмов А.С., Заринова Л.Д.* Основы радиационного неразрушающего контроля. Учебно-методическое пособие. – Казань, Изд-во КГУ, 2008, 66 с.

6. *Alan Richter*, URL:http://www.ctemag.com/aa_pages/tmp/tmpb8b27dd3839912aed851778649ac7b2c.html (дата обращения 10.10.13).

Пантюков Александр Сергеевич — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: pantyukov@gmail.ru.

Никитич Валерий Тимофеевич — доцент, преподаватель кафедры М1 КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: pantyukov@gmail.ru.

A.S. Pantyukov, V.T. Nikitich

RADIATION METHODS OF CONTROL ARE THE WAY OF IMPROVEMENT OF QUALITY AND PRODUCTIVITY

Control is one of the most important links in the path of the life cycle of details. It depends on the quality control of customer satisfaction of products purchased, and thus increase the company's competitiveness in the market. Radiation control methods have many advantages, since it is easy to automate and ensure continuous production control. It is in this direction are now developing many foreign manufacturers, and it is advisable to implement this direction on the major Russian machine-building enterprises .

Key words: *Radiation methods of control, non-destructive control, quality, productivity, automation*

Pantyukov A.S., student of the Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: pantyukov@gmail.ru.

Nikitich V.T., Lecturer, Docent of Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: pantyukov@gmail.ru.

В.В. Калмыков, К.Н. Юсупова

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

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

Рассмотрены вопросы активного контроля состояния режущего инструмента. Представлены наиболее распространенные автоматизированные способы контроля. Проведен обзор основных классификаций методов контроля режущего инструмента. Сделан сравнительный анализ методов, определены преимущества и недостатки каждого из них.

Ключевые слова: Автоматизация, режущий инструмент, активный контроль, метод.

Введение. Автоматизация производства в машиностроении – это комплексная конструкторско-технологическая задача создания новых технологий и техники, принципиально отличных от арсенала средств неавтоматизированного производства. Основное направление автоматизации производственных процессов состоит в создании таких высокоэффективных технологических процессов и высокопроизводительных средств производства, применение которых было бы невозможно при непосредственном участии человека в управлении ими [1].

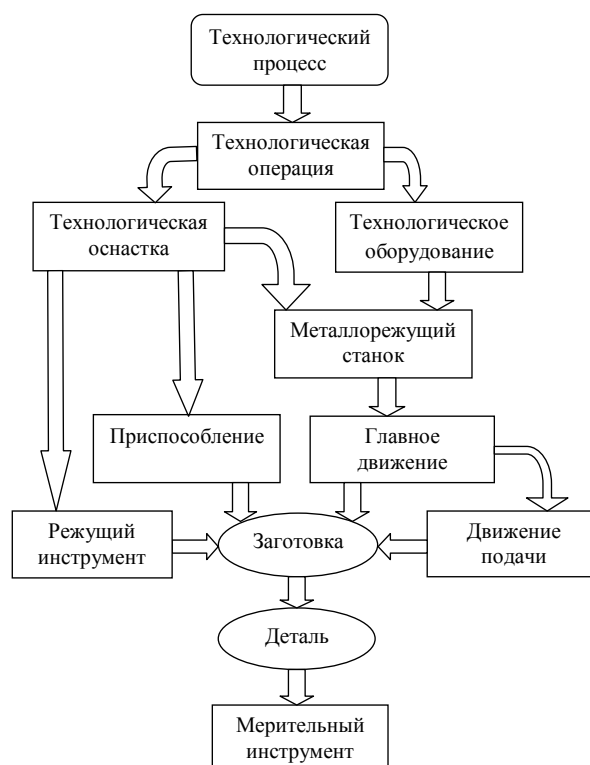


Рис.1

Комплексная автоматизация технологических процессов должна охватывать все составляющие технологической системы, в том числе и контроль выполнения операций. Структура технологического процесса представлена на рисунке 1. Основными составляющими технологической системы являются оборудование, оснастка, приспособления и инструмент [2]. Стоимость инструмента в себестоимости изготовления деталей составляет 20%, а в некоторых случаях достигает 50%. Поэтому эффективность использования режущего инструмента является актуальной темой в вопросе конкурентоспособного производства. Несмотря на обилие методов активного контроля состояния режущего инструмента вопросы автоматизации этого контроля массово в производстве пока не внедрены.

Постановка задачи. Основа автоматизации технологических процессов – это перераспределение информационных, энергетических и материальных потоков в соответствии с принятым критерием управления (оптимальности).

К основным целям автоматизации технологических процессов относят:

- Повышение эффективности производственного процесса;
- Повышение безопасности;
- Повышение экологичности;
- Повышение экономичности.

Достижение целей осуществляется посредством решения следующих задач:

- Улучшение качества регулирования;
- Повышение коэффициента готовности оборудования;
- Улучшение эргономики труда операторов процесса;
- Обеспечение достоверности информации о материальных компонентах, применяемых в производстве (в т. Ч. С помощью управления каталогом);
- Хранение информации о ходе технологического процесса и аварийных ситуациях [3].

Основной задачей работы являлся анализ основных методов активного контроля РИ, а также определение их преимуществ и недостатков.

Автоматизация контроля технологического процесса. Автоматизация контроля является одним из самых сложных вопросов комплексной автоматизации технологических процессов. Она осуществляется по двум различным направлениям: путем автоматизации послеоперационного (пассивного) контроля и технологического (активного) контроля (рис. 2) [4].



Рис.2

Активный контроль – это контроль в процессе обработки, по результатам которого можно исправить те или иные параметры детали.

Пассивный контроль – это контроль, выполняемый контролером после окончания обработки, когда требуется дать заключение о годности полученных деталей.

Методы активного контроля. Наиболее распространенные методы активного контроля представлены на рисунке 3.

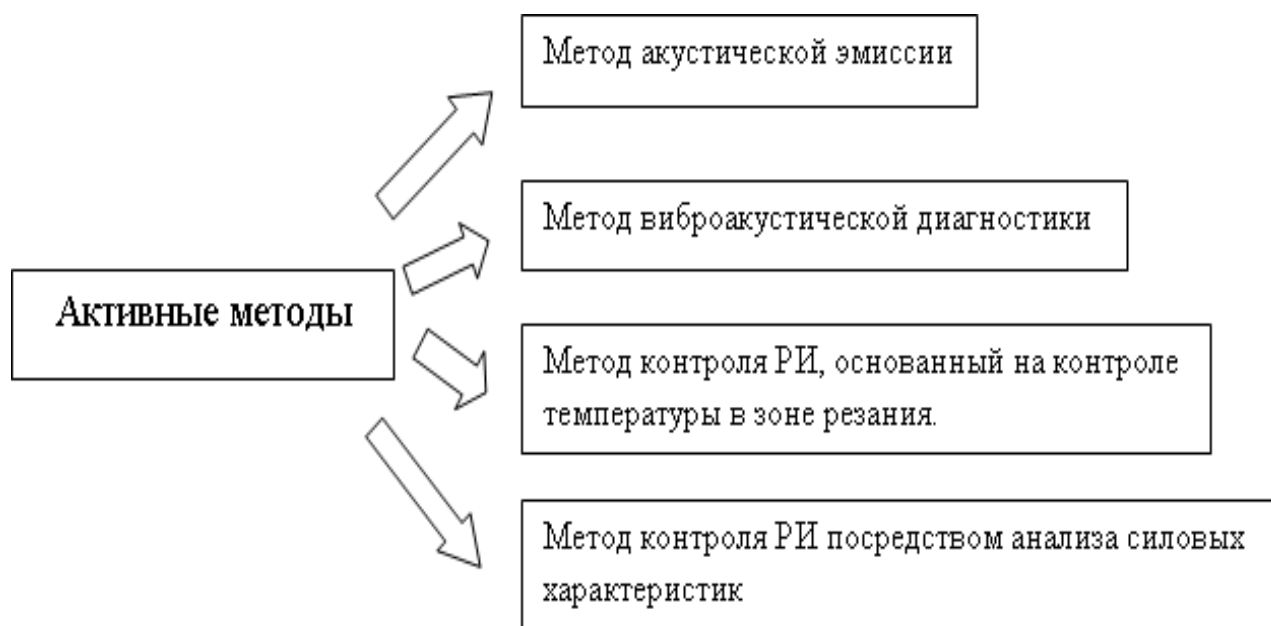


Рис.3

а) Метод акустической эмиссии (АЭ). В данном методе анализируется АЭ, генерируемая во время резания. Как было обнаружено, полная величина и величина усредненной АЭ показывают существенную корреляцию с износом резца (Ивата и Мориваки 1977). Суть метода заключается в приеме, преобразовании, обработке и регистрации волн напряжений. При развитии трещин происходит динамическая разгрузка части материала, примыкающего к берегам образующейся трещины. Иными словами регистрируются волны напряжений, анализ параметров которых позволяет судить об изменении дефектности детали и инструмента (Илюшин В.М., Гутенко Т.И. 1986).

Недостаток диагностики методом акустической эмиссии в том, что помимо износа, РИ подвержен влиянию и других факторов, таких как силы резания. Реализация данного метода на практике повлечет большие, возможно, не оправданные затраты[5].

Б) Метод виброакустической диагностики. По мере износа резца его вибрационные характеристики меняются. Это и есть то изменение, которое контролируется в этом методе для измерения износа резца. В работе Пандит и Кашу 1982г. были проанализированы вертикальные вибрации резцедержателя в полосах частот 4 -5 КГц, 8 -10 КГц и 14 -16 КГц для установления стратегии, зависящей от снимаемых данных. Вибрации и режущие силы были измерены приблизительно в течение 30 секунд в каждой операции, и полученный таким образом спектр мощности был нанесен на диаграмму. Было обнаружено, что спектральная плотность вибрации первоначально убывает при росте износа, достигает минимума, соответствующего критическому износу резца, а затем непрерывно возрастает (Либерман Я.Л., Тимашев С. А. 1993) [6], [7].

Недостатки предлагаемых авторами схем ВАД в том, что они не дают возможности следить за развитием износа, а сравнение ведется только с пороговым значением контролируемых характеристик.

Г) Метод контроля РИ, основанный на контроле температуры в зоне резания. Температура зоны контакта резец–заготовка измеряется непосредственно по инфракрасному излучению либо косвенно, термопарой [8]. Макаров А. Д. одним из первых применил этот метод в производстве. Со-лайя и Вукелья (1973) обнаружили корреляцию между износом резца и изменением поля температур (или баланса тепловой энергии) [9]. Были разработаны теоретические модели, которые предсказывают рост температуры одновременно с ростом износа. Колвелл (1975) также отметил значительную корреляцию между износом резца и температурой резания.

После установления корреляции, измеренная температура, используется для оперативного предсказания величины износа инструмента.

Эксперименты, использующие термопары для измерения температуры резания порождают проблемы шумовых сигналов, требуют сложной оснастки и строгих требований к калиброванию измерительной аппаратуры.

Д) Метод контроля РИ посредством анализа силовых характеристик (силы резания, крутящего момента и мощности резания)

В данном методе измеряются компоненты силы резания и износа задней поверхности, а затем наносятся на диаграмму для нахождения какой-либо корреляции. Микелетти др.(1976) отмечает, что износ задней поверхности линейно зависит от сил резания с большой степенью корреляции. Уехара и др. (1979) предложил новую концепцию, основанную на осциллограмме силы подачи.

Как только полная корреляция установлена, измеренная во время обработки величина режущей силы используется для предсказания износа инструмента без прерывания обработки. Таким образом, этот метод контроля состояния инструмента может использоваться непосредственно в процессе механической обработки.

Показания крутящего момента и мощности резания также используются для измерения износа резца. Ток, напряжение и скорость вращения двигателя замеряются, чтобы определить мощность резания при движении и крутящий момент. Вариации потребляемой мощности или крутящего момента связаны с износом инструмента[10]. Устанавливаются пределы для необходимой мощности или крутящего момента, основанные на допустимом максимуме износа инструмента. Измеряемые в процессе обработки величины сравниваются с данными пределами и, при необходимости, вращение шпинделя останавливается. Однако недостаток данного метода в том, что на крутящий момент и мощность резания могут иметь влияние неисправности станка или его частей.

Но корреляция между режущими силами и износом резца является сомнительной [11], поскольку на первые влияет не только износ, но также

и геометрия резца, условия резания и материал заготовки. Более того, износ задней поверхности увеличивает усилие подачи, в то время, как износ передней поверхности уменьшает его. Различие между износом задней поверхности и кратерным износом передней, является важным так как, в то время, как на полумку они влияют оба, точность размеров, в основном, зависит только от первого. Невозможно обеспечить точную информацию об износе только на базе измеряемых сил.

Преимущества автоматизации контроля:

- Замена человека в задачах, включающих тяжелый физический или монотонный труд.
- Замена человека при выполнении задач в опасных условиях (а именно: пожар, космос, извержения вулканов, ядерные объекты, под водой и т.д.)
- Выполнение задач, которые выходят за рамки человеческих возможностей по весу, скорости, выносливости и т.д.
- Экономика улучшения. Автоматизация может вносить улучшения в экономику предприятия, общества или большей части человечества.

Недостатки автоматизации контроля:

- Рост уровня безработицы из-за высвобождения людей в результате замены их труда машинным.
- Технические ограничения.
- Угрозы безопасности (уязвимость).
- Непредсказуемые затраты на разработку.
- Высокая начальная стоимость.[8]

Заключение. Метод виброакустической диагностики состояния инструмента в процессе обработки является одним из наиболее перспективных методов диагностики рассматриваемого назначения.

Уровень автоматизации производства значительно повышается, способствуя улучшению качества продукции, увеличению объемов производства и снижению себестоимости продукции. Это является важнейшим условием расширения автоматизации. Данному принципу технической политики следует уделять большое внимание.

Список литературы

1. Проектирование высокоэффективных технологических процессов автоматизированного машиностроения и прогрессивных высокопроизводительных средств автоматизации // Электронная библиотека. URL:<http://www.bibliofond.ru/view.aspx.html> (дата обращения: 10.10.2013)
2. ГОСТ 3.1109-82 ЕСТД. Термины и определения основных понятий. М., 1983, 14с.

3. Автоматизация//База знаний AllBtst. URL.http://knowledge.allbest.ru/manufacture/3c0a65635b3ad78a5d43b88421206d37_0.html (дата обращения: 8.10.2013)
4. Автоматизация контроля//Электронная библиотека. URL:http://www.marshal-group.com/avtomatizaciya_kontrolya.html (дата обращения: 7.10.2013)
5. Калмыков В.В., Попов Д.В. Прогнозирование износа режущего инструмента методом акустической эмиссии.// Тезисы докладов «1-й Российской конференции молодых ученых по математическому моделированию» М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2000.
6. Зелик В.П., Астапенко А.И., Шрам Е.В., Максимов М.А. Агрегированный цифровой комплекс для виброакустической диагностики металлорежущих станков//Вестник машиностроения. – 1987. – № 5. – С. 58–60
7. Либерман Я.Л. Системы вибродиагностики состояния режущего инструмента для токарных станков с ЧПУ//Вестник машиностроения. – 1993. – № 2. – С.31–38.
8. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1966. – 264 с.
9. Minyoung Lee, Charles E. Thomas, Douglas G. Wildes. Prospects for in-process diagnosis of metal cutting by monitoring vibration signals//Journal of materials science. – 1987. – № 22. – pp.3821–3830
10. Калмыков В.В. Вибрации, как способ диагностики состояния инструмента в процессе резания//Труды Всероссийской НТК «Создание прогрессивных технологий, конструкций и систем и социально-экономические проблемы производства» Калуга, 1998.
11. Sampath A., Vajpayee S. Tool health monitoring using acoustic emission//International Journal of Product Research. – 1987. – № 5. pp.703–719

List of references

1. Design of highly effective technological processes of the automated mechanical engineering and progressive high-performance automation equipment// Electronic library. URL.<http://www.bibliofond.ru/view.aspx.html> (address date: 10.10.2013)
2. GOST 3.1109-82 ESTD. Terms and definitions of the main concepts. М, 1983, 14с.
3. Automation//QRZ.RU:base of knowledge AllBtst.URL.http://knowledge.allbest.ru/manufacture/3c0a65635b3ad78a5d43b88421206d37_0.html
4. Control automation//QRZ.RU: Electronic library. URL.http://www.marshal-group.com/avtomatizaciya_kontrolya.html (address date: 7.10.2013)
5. Kalmykov B.B., Popov D.V. Prediction of wear of the cutting tool a method acoustic emission.//Theses of reports «The 1st Russian conference of

young scientists on mathematical modeling»; M: MGTU publishing house to them N Bauman, 2000.

6. Zoellick V.P., Astapenko A.I. Shram E.V. Maksimov M. A. The aggregated digital complex for vibroacoustic diagnostics of metal-cutting machines//the Messenger of mechanical engineering– 1987. – № 5. – Pp. 58–60

7. Liberman YA.L. Systems of vibration diagnostics of a condition of the cutting tool for lathes with CNC. Messenger of mechanical engineering. 1993 . – No. 2. Page 31-38

8. Makarov A.D. Wear and resistance of cutting tools. M: Mechanical engineering, 1966. 264 pages

9. Prospects for in-process diagnosis of metal cutting by monitoring vibration signals /Minyoung Lee [etc]. Journal of materials science. 1987. – № 22. pp.3821–3830

10. Kalmykov V.V. Vibration, as a way of diagnostics of a condition of the tool in the course of cutting//Works of the All-Russian NTK «Creation of Progressive Technologies, Designs and Systems and Social and Economic Problems of Production» Kaluga, 1998.

11. Sampath A., Vajpayee S. Tool health monitoring using acoustic emission. International Journal of Product Research. – 1987. – № 5. pp.703–719

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

Юсупова Ксения Николаевна — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Lapylya9206@mail.ru.

V.V. Kalmykov, K.N. Yusupova

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHODS OF ACTIVE CONTROL OF THE CONDITION OF THE CUTTING TOOL

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 24800, Russia

The questions of active control of a condition of the cutting tool are considered. The most widespread automated ways of control are presented. The review of the main classifications of control methods of the cutting tool is carried out. The comparative analysis of methods is made, advantages and shortcomings of each of them are defined.

Key words: Automation, cutting tool, active control, method.

Kalmykov V.V., senior teacher of the Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: sorat-vad@yandex.ru.

Yusupova K.N., student of Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: Lapylya9206@mail.ru.

В. В. Калмыков, Н. В. Кудрявцев

ФРЕЗЕРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ГОЛОВКИ РЕЛЬСА

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

В статье рассматриваются существующие варианты способов обработки головки рельса, представлены их преимущества и недостатки. Проанализирован новый способ фрезерования рельсов, показаны его преимущества и новизна.

Ключевые слова: Фрезерование рельсов, обработка головки рельса, шлифование рельсов.

Фрезерование поверхности головки рельса. Железнодорожные рельсы в процессе эксплуатации в обязательном плановом порядке подвергаются обработке для восстановления утрачиваемых эксплуатационных свойств. Обработке подвергаются новые рельсы и рельсы с наработкой до 150-200 млн. тонн брутто, эксплуатируемые с периодической обработкой. Нарботка тоннажа до следующей обработки составляет 40 - 50 млн. т. брутто.

В масштабах России потребность обработки рельсов в год составляет 50 тысяч км [1].

В настоящее время в мировой практике используют несколько способов обработки головки рельса: на рельсофрезерных станках, профильное фрезерование, активное шлифование, строгание. Специальные путевые машины выпускают ведущие иностранные фирмы: «Speno», «Fairmont Tamper», «Pandrol & Jakson», «Linsinger».

Основная техническая характеристика указанных путевых машин - скорость обработки рельсов составляет 0,5 - 1,5 км/час [1].

Существующие варианты относятся к способам обработки поверхности головки рельсов резанием в условиях рельсового пути с применением рельсообрабатывающих поездов и в заводских условиях на специальных металлообрабатывающих станках.

В заводских условиях применяется способ обработки рельсов на специальном рельсофрезерном станке модели 6992 Ульяновского завода тяжелых и уникальных станков, осуществляющий обработку поверхности головки рельсов профилирующей фрезой (рис. 1). Диаметр фрезы 560 мм, ось вращения, параллельная основанию рельса и лежащая в плоскости его поперечного сечения, при относительной скорости фрезы вдоль рельса (подаче) 1-8 м/мин и глубине срезаемого слоя 0,5-3 мм [2].

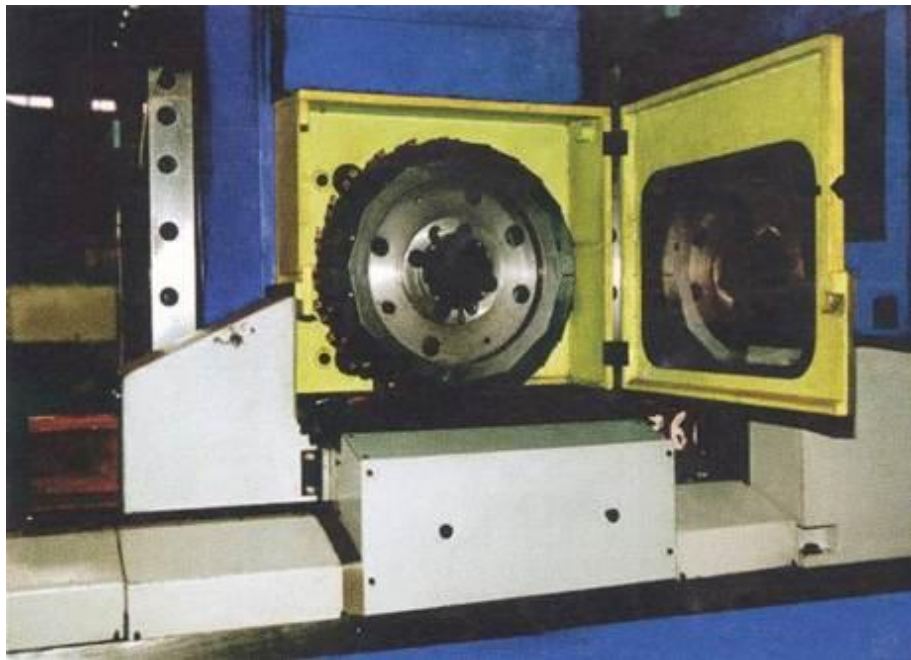


Рис. 1

Аналогичен предыдущему способ обработки рельсов на рельсофрезерных станках фирмы "Linsinger" (Австрия) и "Geismar" (Франция).

В условиях рельсового пути широко применяется способ обработки рельсов на рельсофрезерном поезде SF03-6FFF фирмы "Linsinger" (Австрия) и рельсообрабатывающем поезде фирмы "Alfa Rail Team", где используется съём припуска несколькими инструментами – профильными фрезами с осями вращения, параллельными основанию рельса и лежащими в плоскости его поперечного сечения [1].

К недостаткам данного способа относится низкая производительность — максимум до 1500 м/час и необходимость применения весьма дорогостоящего режущего инструмента - специальных профильных фрез. Самым главным недостатком указанного способа обработки является геометрия обработанной поверхности в продольном сечении головки рельса, представляющая собой волнообразную поверхность, амплитуда и шаг которой определяется режимами резания – подачей, числом оборотов фрезы, величиной срезаемого припуска, числом режущих кромок на фрезе, диаметром фрезы.

Наличие волнообразной поверхности требует выполнения последующей финишной обработки, что увеличивает себестоимость обработки [1].

Также известен способ обработки рельсов на рельсошлифовальном поезде с пассивным методом шлифования для снятия припуска с поверхности головки рельсов (рис. 2).



Рис. 2

Недостатками данного способа обработки являются незначительный съем металла с поверхности рельса, высокие эксплуатационные затраты, при этом боковые грани головки рельса не шлифуются [5].

Наименее эффективным является способ обработки рельсов строганием с применением специальных строгальных резцов с пластинами из твердого сплава, расположенных под разными углами относительно расчетной направляющей ходовой поверхности рельса, для удаления наклепанного металла и наплывов.

Недостатком данного способа является невысокая производительность и низкая стойкость режущего инструмента [2].

Самым распространенным является способ обработки поверхности головки рельсов с активным методом шлифования, где обработка ведется активными (вращающимися) шлифовальными кругами. Способ предусматривает съем припуска одновременно несколькими вращающимися инструментами (абразивными кругами), установленными на разных участках вдоль и поперек рельса со смещением друг относительно друга. Их перемещение вдоль рельса и вращение вокруг своих осей с расположением осей в поперечных сечениях рельса такого, что перпендикулярные им рабочие торцовые плоскости инструментов касательны к расчетной направляющей ходовой поверхности рельса. Это позволяет обрабатывать не только поверхность катания рельса, но и придавать головке профиль, соответствующий средней изношенности, необходимый для оптимального распределения нагрузки, приходящейся на рельс [3].

Этот способ шлифования головок рельсов вращающимися шлифовальными кругами при относительной скорости их перемещения вдоль рельса 4 — 6 км/час обеспечивает максимальный припуск, снимаемый за один проход. Для съема с поверхности головки рельса припуска толщиной от 0,5 до 2 мм потребуется от 4 до 14 проходов, при этом фактическая производительность обработки поверхности головки рельсов существенно уменьшится и составит 1,5 - 0,45 км/час [1].

Способ активного шлифования имеет недостатки, а именно: интенсивный износ дорогостоящих абразивных кругов вызывает большую запыленность окружающей среды абразивом с металлической стружкой, что является экологической проблемой, и приводит, в частности, к вопросу герметизации помещений и узлов рельсошлифовального поезда [1].

В итоге, производительность обработки рельсов способом активного шлифования и способом профильного фрезерования поверхности головок рельсов одного и того же порядка.

Способы профильного фрезерования и активного шлифования с низкой фактической производительностью обработки требуют продолжительного «окна», что вызывает ограничение или нарушение графика движения поездов и, как следствие, требует высоких капитальных и эксплуатационных расходов.

Перед новым способом обработки поверхности головки рельса, предложенным авторами Никулиным Н.А., Петровым В.И., Никулиным М.Н. и др., поставлена задача существенно повысить производительность обработки головки рельса при обеспечении ее правильного профиля и высокого качества обработанной поверхности, в частности, за счет уменьшения количества проходов при увеличении толщины припуска, снимаемого с головки рельса.

В данном случае поверхность головки рельса обрабатывают инструментами, которые устанавливают на разных участках вдоль и поперек рельса со смещением друг относительно друга. Инструменты перемещаются вдоль рельса и вращаются вокруг своих осей. Оси располагаются в поперечных сечениях рельса так, что перпендикулярные им рабочие торцевые плоскости инструментов касательны к расчетной направляющей ходовой поверхности рельса, которая, если головка рельса обрабатывается за несколько проходов, является промежуточной для рассматриваемого прохода, и базовой, если проход инструмента последний или единственный. При этом поверхность головки рельса обрабатывают инструментами правого и (или) левого вращения с резцами, главные режущие кромки которых установлены в рабочих торцевых плоскостях инструментов. Обработку производят, перемещая инструменты с относительной скоростью вдоль

рельса, составляющей не менее одной десятой оптимальной скорости резания материала рельса [1].

Предлагаемый способ обработки поверхности головки 1 рельсов предусматривает снятие припуска одновременно несколькими инструментами 2. Обрабатывающие инструменты устанавливают на разных участках вдоль и поперек рельса 1 со смещением друг относительно друга (рис. 3). Инструменты перемещаются вдоль рельса и вращаются вокруг своих осей $O_q O_q$. Оси располагают в поперечных сечениях рельса так, что перпендикулярные им рабочие торцовые плоскости $T_q T_q$ инструментов касательны к расчетной направляющей GLN ходовой поверхности рельса в точках K (рис. 4) [4].

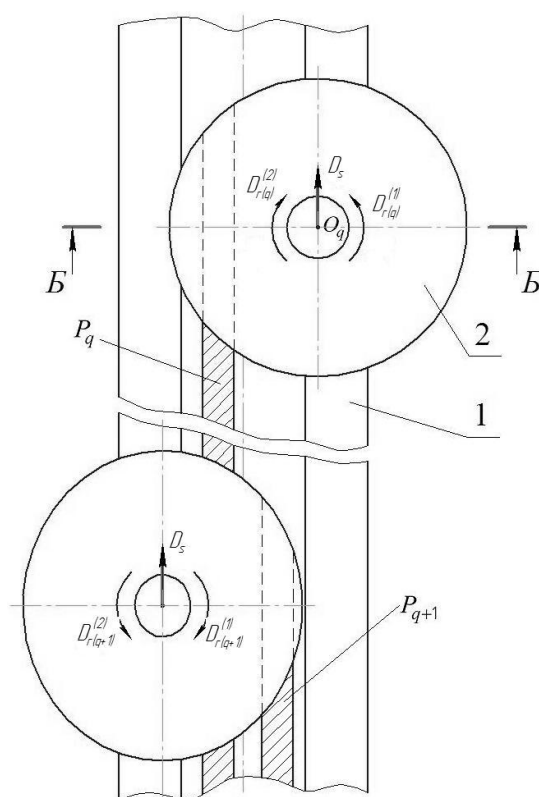


Рис. 3

Сущность предлагаемого способа заключается в том, что обрабатывающие инструменты 2 выполнены, например, в виде фрез или резцовых головок, правого и (или) левого вращения с резцами 3, главные режущие кромки AB которых размещают в рабочих торцовых плоскостях $T_q T_q$ инструментов (рис. 4).

Б-Б

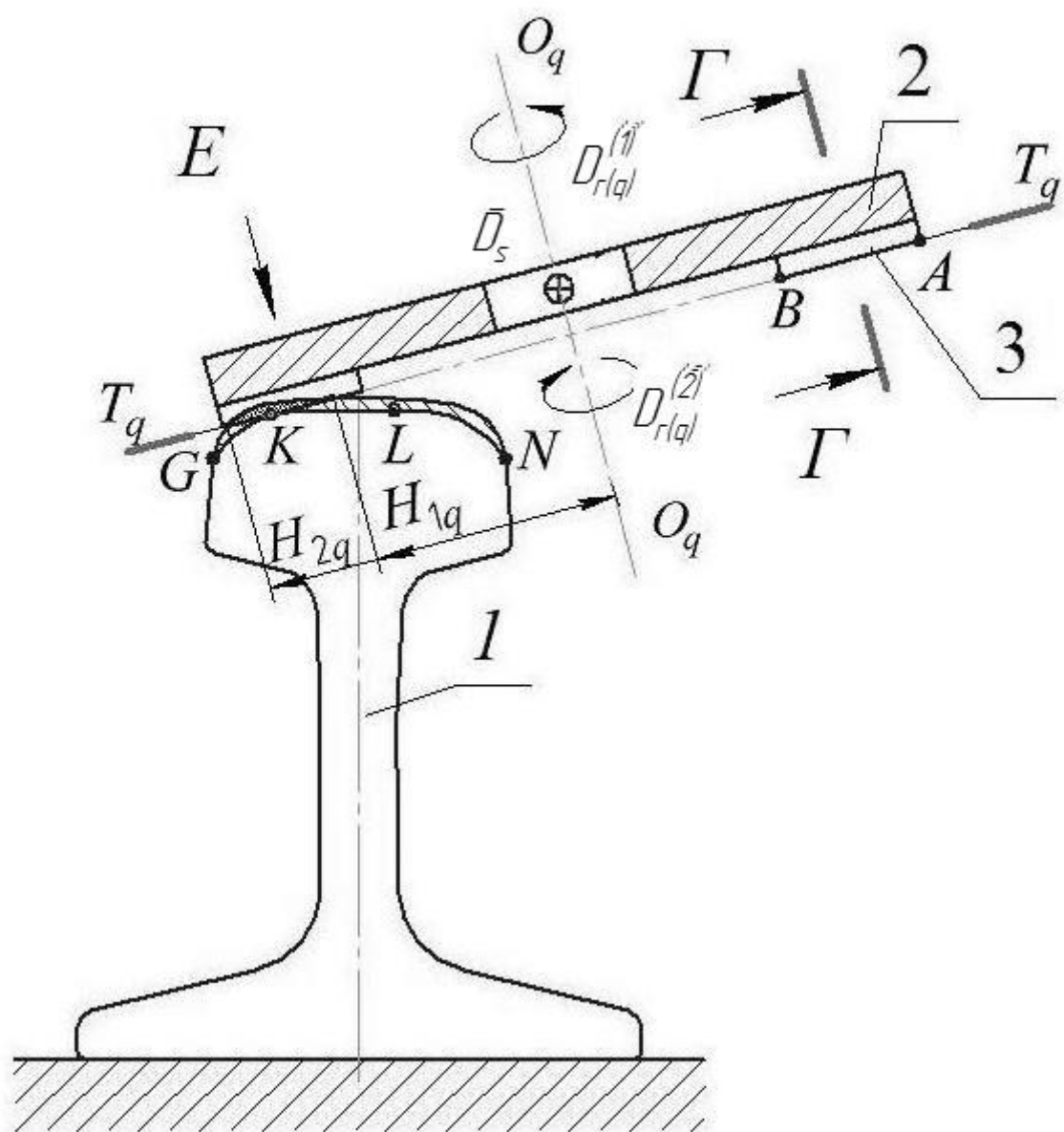


Рис. 4

Обрабатывающим инструментам обеспечивают относительную скорость D_s вдоль рельса не меньше одной десятой оптимальной скорости резания материала рельса.

Обрабатывающие инструменты устанавливают так (рис. 5,6), что расстояние H_{2q} от оси инструмента $O_q O_q$ до дальней границы $P_{2q} P_{2q}$ обработанной им плоской поверхности P_q определяется математической зависимостью.

Вершинам главных режущих кромок A обрабатывающих инструментов обеспечивают линейную окружную и соответствующую угловую скорости и подачу на резец. При этом главные режущие кромки AB резцов g -

го инструмента входят в зону резания в точках C_1 и B_1 ; и выходят из зоны резания в точках C_2 и B_2 (рис. 5,6).

При попутной обработке поверхности головки рельса угол β_q , между вектором относительной скорости D_s обрабатывающих инструментов вдоль рельса и вектором линейной окружной скорости $D_{r(q)}$ (M) любой точки M их главных режущих кромок AB , находящейся в зоне резания $C_1C_2B_2B_1$ на расстоянии r_q от оси O_qO_q инструмента, должен быть тупым, а при встречной обработке – острым. Сумма этих векторов определяет вектор скорости резания.

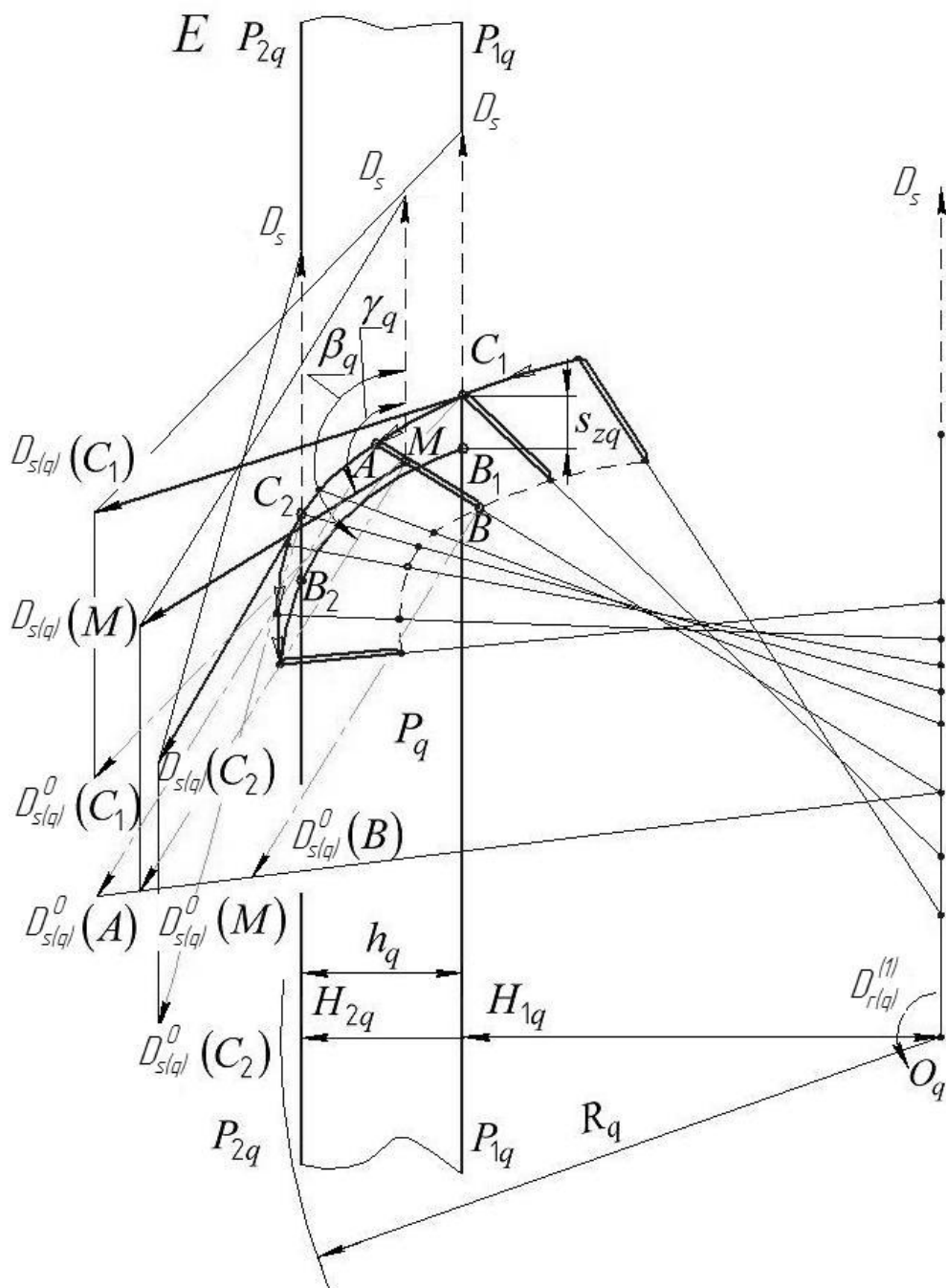


Рис. 5

Для уменьшения продольной и поперечной составляющих вектора результирующей силы резания, равного сумме векторов сил резания, действующих на все режущие кромки инструментов, находящиеся каждая в своей зоне резания, устанавливают так, что на одних участках вдоль и (или) поперек рельса инструменты одновременно осуществляют попутную обработку рельса, а на других – встречную [4].

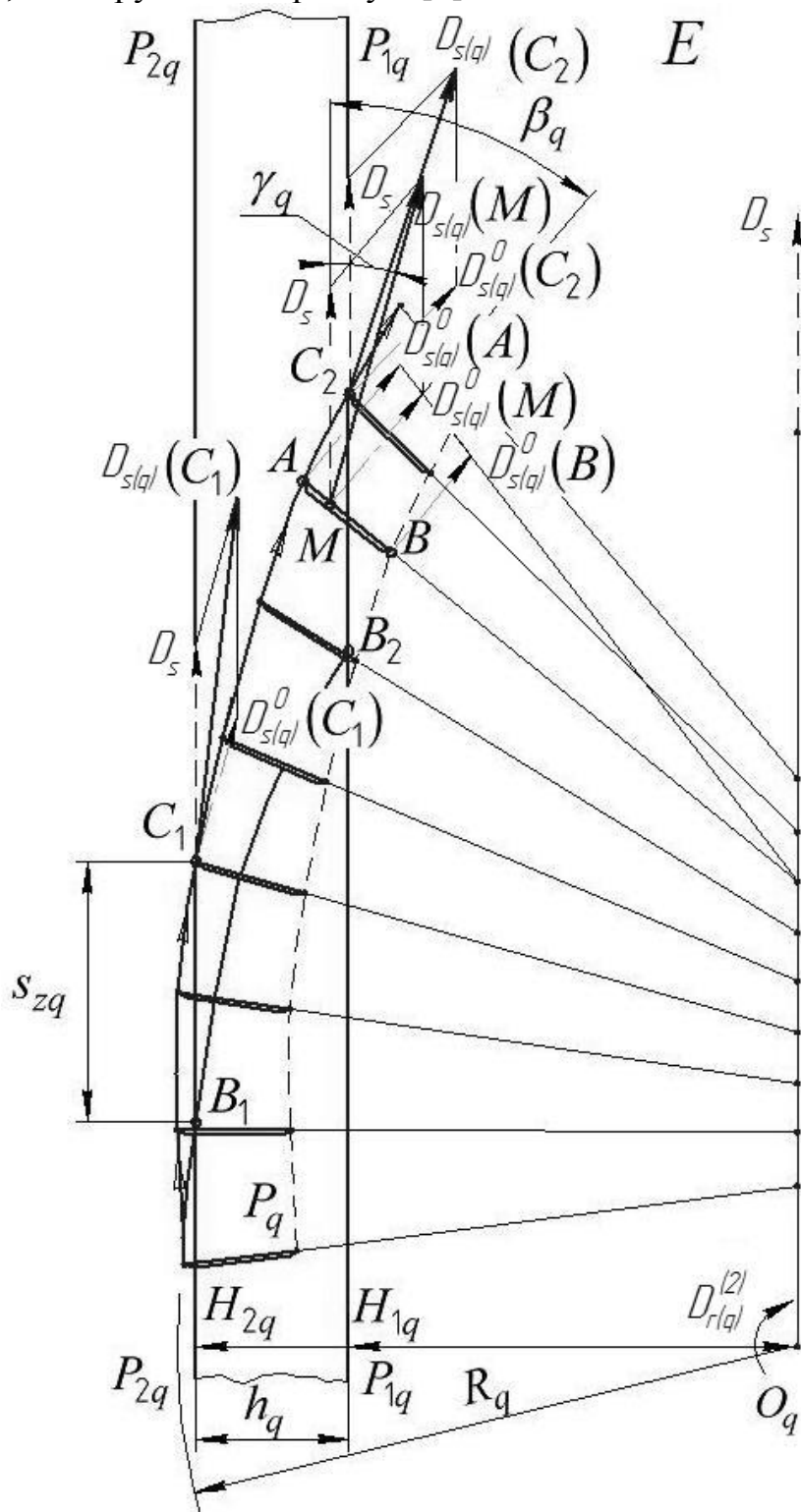


Рис. 6

Кроме одновременной обработки поверхности головки рельса несколькими инструментами ее можно обрабатывать последовательно за несколько проходов одним обрабатывающим инструментом.

Таким образом, предложенный способ позволяет на высокоскоростных режимах резания в зависимости от свойств материала рельсов, конструктивного выполнения обрабатывающих инструментов и применяемого в них инструментального материала значительно повысить производительность до 4000-6000 м/час и качество обработанных поверхностей головок рельсов.

Для пояснения эффективности использования путевых машин на базе предлагаемого способа обработки поверхности головки рельса сравним со способом обработки активными шлифовальными кругами, т.к. рельсошлифовальные машины имеют наиболее широкое распространение.

Эффективность предлагаемого способа обработки поверхности головки рельса, складывается из следующих показателей:

- рабочая скорость обработки — до 6 км/час;
- толщина слоя металла, снимаемого с головки рельса одним инструментом за один проход при рабочей скорости движения машины — до 2 мм (при необходимости толщина снимаемого слоя за один проход может быть и более);
- меньшее количество обрабатывающих инструментов;
- меньшее количество единиц подвижного состава;
- пожаробезопасность (нет искр, характерных при абразивной обработке);
- экологическая чистота (отсутствует абразивная пыль с частицами металла характерная при шлифовании);
- возможность эксплуатации в тоннелях, метро и на линиях городов (без дополнительного оснащения машины системами отсоса пыли в случае шлифования и при этом нет гарантии полной утилизации абразивной пыли);
- выше показатель шероховатости обработанной поверхности;
- выше стойкость режущего инструмента;
- минимальное значение силы тяги машины для преодоления сопротивления от сил резания;
- отсутствие системы орошения и пожаротушения (при шлифовании необходим запас воды для технологических нужд);
- быстрота и лёгкость замены инструмента и (или) режущих пластин;
- возможность применения режущего инструмента различного диаметра и высоты с обеспечением оптимальных режимов обработки и доступностью к обрабатываемой поверхности;
- меньше установленная мощность машины;
- уменьшение эксплуатационных затрат;
- повышение эксплуатационной надёжности.

Расчеты и опытные исследования подтверждают реальность предлагаемого способа обработки поверхности головки рельсов и создания новых машин [1].

Список литературы

1. Никулин Н.А., Петров В.И., Никулин М.Н. и др. Обработка поверхности головки рельса// Путь и путевое хозяйство.- 2013.-№ 7-С. 7-9.
2. Певзнер В.О., Шеронова Т.Н. Технология, механизация и автоматизация путевых работ. — М.: Транспорт, 1996. — С. 108—113.
3. Пат. США № 4843765, МКИЕ01В 31/17, 1989. -С. 8-11.
4. Пат. РФ № 2287039 с приоритетом от 27.01.2005. -С. 3-9.
5. ОАО «РПМ» [Электронный документ]. Продукция <http://www.rempm.ru/production/travelingcars/>. (Дата обращения: 25.11.2013).

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

Кудрявцев Николай Владимирович — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: eksnikolay@mail.com.

V. V. Kalmykov, N. V. Kudryavtsev

MILLING THE SURFACE OF THE RAILHEAD

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 24800, Russia

This article discusses how to handle existing versions of the rail head, presented their advantages and disadvantages. Analyzed a new method of railmilling, showing its advantages and novelty.

Key words: Railmilling, processing railhead, grinding rails.

Kalmykov V.V., lecturer of the Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: sorat-vad@yandex.ru.

Kudryavtsev N. V., student of the Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: eksnikolay@mail.com.

Т. В. Павлова, В. В. Калмыков

МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

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

В настоящее время Калужская область является лидером по темпам роста машиностроительного производства. Его эффективность является одной из актуальных проблем для региона.

Быстрый рост современного машиностроительного производства предъявляет повышенные требования к механической обработке резанием. При этом все большее применение находят высокопроизводительные мехатронные системы, требующие повышения надёжности и работоспособности режущего инструмента которое можно обеспечить следующими средствами [1]:

- использованием различных методов улучшения режущих свойств инструмента:

- 1)упрочняющие технологии;

- 2)использование СОТС (смазывающе-охлаждающих технологических средств);

- 3)применение износостойких покрытий и их комбинирование.

- разработкой современных методов оценки триботехнических свойств режущего инструмента;

- научно обоснованного выбора режимов резания с учетом особенностей температурно-силовых условий процесса.

Работоспособность режущего инструмента – это его способность осуществлять процесс резания с заданной производительностью и качеством обработки [2]. Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособности.

Тот или иной вид износа зависит как от свойств материала заготовки и материала режущей пластины, так и от внешних условий, нагрузки и скорости скольжения [3]. Нагрузка, точнее относительное внедрение, обуславливает вид нарушения фрикционных связей. При скольжении поверхностные слои нагреваются, в результате чего свойства их изменяются. В некотором интервале сближений и температур вид нарушения фрикционных связей остается неизменным, типичным для данных условий. В связи с этим оказывается возможным различать виды износа. Существует несколько классификаций видов износа.

Первая классификация была предложена Бринелем в 1921 г., который в зависимости от кинематического признака и наличия прослойки между поверхностями различал износ [3]:

- при трении качения со смазкой;
- при трении качения без смазки;
- при трении скольжения со смазкой;
- при трении скольжения без смазки;
- между двумя твердыми телами;
- с разделением твердых тел промежуточным шлифующим порошком.

Барвелл и Стронг в 1958 г. предложили теорию износа, происходящего вследствие:

- адгезии;
- коррозии;
- наличия абразивных частиц;
- пропахивания твердыми неровностями более мягкого контртела;
- различных причин – эрозии поверхностей, усталости и др.

Костецкий Б.И., рассматривая процессы, протекающие в поверхностных слоях металлов под воздействием сил трения, различает следующие виды износа:

1. износ схватыванием первого рода;
2. окислительный, связанный с поглощением кислорода воздуха
3. поверхностным слоем металла;
4. тепловой;
5. абразивный;
6. осповидный (усталостный).

Швецовой Е.Н. и Крагельским И.В. [3] разработана классификация видов износа, построенная на рассмотрении трех последовательных этапов:

- взаимодействие поверхностей, происходящее при скольжении;
- их изменение;
- разрушение поверхностей.

Многих учёных, занимающихся проблемами эффективности машиностроительного производства, таких как Гаркунов Д.Н., Костецкий Б.И., Крагельский И.В., Бутенко В.И., Албагачиев А.Ю. и др., особенно волновал вопрос об изучении поверхностной энергии – γ , и ее проявлениях. Примерно 75% всей энергии, затрачиваемой на образование поверхности

трения (или качения) направляющих элементов, связано с теплом. Оно уходит в различных направлениях, которые в настоящее время определены четко. Энергия поверхностного слоя составляет примерно 25% общей энергии. Она также условно может быть распределена на большое количество составляющих. Величины этих составляющих оказываются не только разными, но и изменяющимися в каждый момент времени в соответствии с особенностями воздействия технологической среды. Суммарное значение этой части энергетики поверхностного слоя также постоянно изменяется, но колеблется вокруг значения 25%.

- Технологическое воздействие на поверхность направляющих элементов на производстве выражается, прежде всего, рациональным выбором режимов обработки и регламентированием условий обработки.

- Необходимо иметь в виду еще одно важнейшее обстоятельство. Направляющие элементы нельзя рассматривать обособленно друг от друга, равно, как и их энергетические состояния.

- Синергетический подход к соударению двух микровыступов поверхностей направляющих элементов требует особого рассмотрения. Однако и здесь, рассматривая собственное соударение как бифуркацию, можно использовать коэффициент трения как своеобразный инструмент для формирования пост-бифуркационного самоорганизующегося пространства. Такой процесс может быть распространен на всю поверхность контакта направляющих элементов.

- Традиционно, контакт рассматривается как результат зацепления и деформации, взаимно внедряющихся шероховатостей (неровностей) двух сопряженных поверхностей. Согласно этой гипотезе, коэффициент трения будет тем меньше, чем меньше шероховатость, т. е. чем тщательнее обработаны трущиеся поверхности.

- Однако в свете рассмотрения вопроса контактирования заготовки и режущего инструмента необходимо ориентироваться на схему на рис. 2. При относительном перемещении режущей кромки Дг и наличии силы Q возникают упруго-пластические состояния в местах микроконтактов шероховатостей. Деформирование микроповерхностей происходит практически всегда, несмотря на то, что углы β (по схеме рис. 2) малы и не превосходят практически $35...40^\circ$ в зависимости от метода обработки [4]. Одна пара сопряженных микровыступов очень условно показана в деформированном виде.

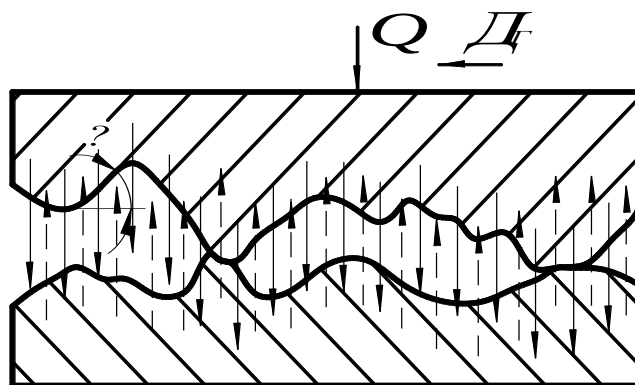


Рис. 2

- Проявление энергетического поля показано условно стрелками так, что каждый контакт поверхности резца и заготовки сопровождается передачей соответствующей порции энергии. Очевидно, что как деформирование микровыступов, так и передача энергии происходят всегда, даже тогда, когда между соприкасающимися поверхностями имеется малый зазор.

- Таким образом, контакт необходимо рассматривать не только как результат зацепление микровыступов, но и с учетом сил энергетического взаимодействия, проявляющихся при взаимодействии двух поверхностей. При весьма малых зазорах и расстояниях между контактирующими поверхностями происходит более интенсивный обмен накопленной энергией, который изменяет тем самым характер взаимодействия - коэффициент трения. Эта гипотеза, вероятно, может более полно объяснить природу и причину возникновения трения, происходящего в результате взаимодействия тщательно обработанных поверхностных слоев направляющих элементов.

- Одновременно с этим, большой научный интерес вызывает процесс передачи энергии в зависимости от зазора между микровыступами, пластическое деформирование, а, следовательно, и интенсивный обмен энергии, в зонах контактов в наибольшей степени обычно происходит на поверхностях, параметры шероховатостей которых $0,1 < Ra < 2,5$ мкм, а радиусы кривизны микронеровностей 30 – 670 мкм, толщина деформированного слоя 17-58 мкм. И вероятно, обмен энергии идет по принципу перетекания ее из “объемов” с большим количеством – в меньшие.

- Для создания наименьшего коэффициента трения необходимо, как это следует из рабочей гипотезы, чтобы разность значений энергий трущейся пары была бы минимальной. Наилучшим является вариант, когда энергии частей одинаковы, а их разность равна нулю.

•В итоге можно предположить, что имеются две важнейшие проблемы: использование поверхностной энергии для более полной оценки свойств поверхностных слоев режущего инструмента и обрабатываемой заготовки и создания методических основ для управления параметрами трения как основного фактора влияющего на интенсивность износа [4].

Список литературы

1. *Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш.* Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. - М.: Машиностроение, 2005. 200 с.
2. *Хает Г.Л.* Прочность режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1975. 168 с., ил.
3. *Крагельский И.В.* Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
4. *Мусохранов М.В.* Роль поверхностной энергии при формировании деталей в прецизионном машиностроении // Сборка в машиностроении и приборостроении. - 2005. - № 6 - С.9-11.

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

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

А.О. Штокал, В.К. Шаталов

МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ СОЗДАНИЯ ИЗОЛЯЦИОННОГО СЛОЯ НАГРЕВАТЕЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА

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

В 2017 году планируется запуск космической обсерватории «Спектр-УФ», основным инструментом которой является телескоп Т-170М (см. рис. 1).

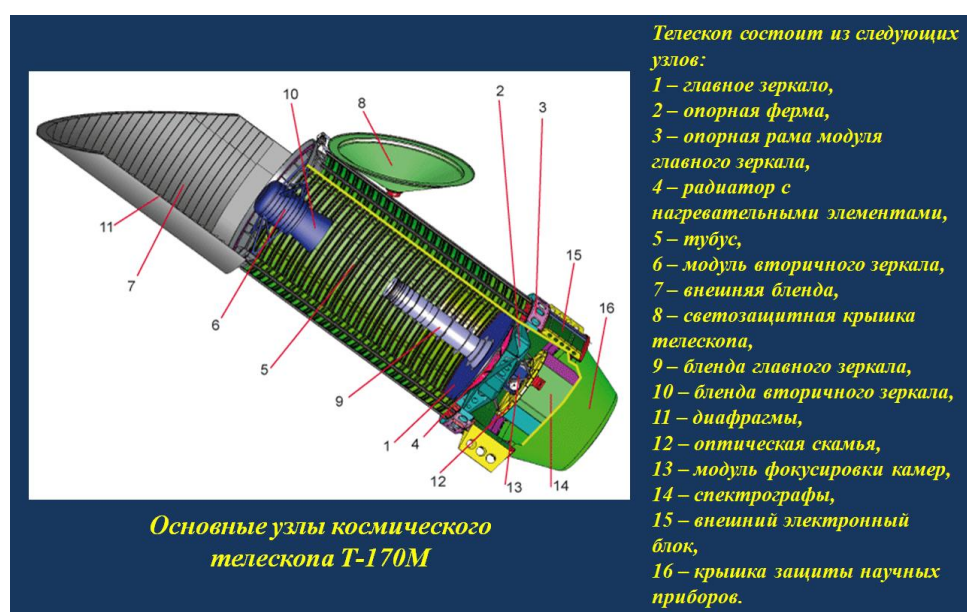


Рис. 1

Номером 6 на данном рисунке обозначен модуль вторичного зеркала – один из главных узлов телескопа, обеспечивающий точное взаиморасположение главного и вторичного зеркал телескопа, следовательно, качество получаемой телескопом информации. Тепловой режим работы модуля вторичного зеркала обеспечивается нагревателем, тарелка которого изображена на рис. 2.

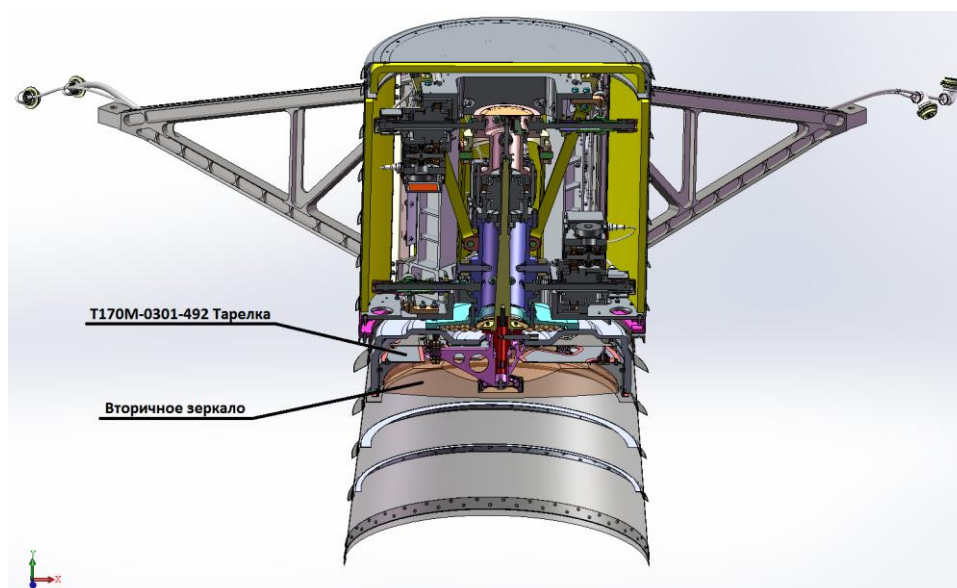


Рис. 2

Тарелка представляет собой лист толщиной 2 мм из алюминиевого сплава АМгб.М. На её поверхности необходимо нанести изоляционное покрытие. В качестве изоляционного покрытия предлагается использовать покрытие, выполненное микродуговым оксидированием (МДО-покрытие), т.к. его пробойное напряжение доходит до 6000 В [1]. Далее на МДО-покрытие необходимо вакуумным способом нанести токопроводящий слой – меандр из нихрома. Электросопротивление диэлектрического слоя – МДО-покрытия в холодном состоянии и при нормальной влажности должно быть более 500 МОм при напряжении 500 В. Изоляция нагревательного элемента (прочность изоляции) в холодном состоянии должна выдерживать без пробоя в течение 1 минуты испытательное напряжение 500 В. Необходимо учесть, что при нанесении меандра из нихрома вакуумным способом происходит проникновение нихрома в поры МДО-покрытия, из-за чего его электросопротивление снижается. Полностью исключить пористость нельзя – это особенность механизма нанесения покрытия, поэтому после операции нанесения покрытия поры необходимо будет заполнять. Важно учесть один фактор – заполняющий материал должен выделять минимально возможное количество газов в вакууме. Рядом находится вторичное зеркало (см. рис. 2), выделившиеся газообразные вещества осядут на зеркале и снизят его оптические свойства. Поэтому органические материалы, такие как фторопласт, гексаметилдисилаксан, полипараксилилен, в качестве материала-наполнителя пор не подойдут. Желательно использовать неорганические материалы в качестве материала-наполнителя пор.

Для проведения эксперимента были изготовлены пластины размером 100x100 мм и толщиной 2 мм из алюминиевого сплава АМгб.М (см. рис. 3 слева), которые были покрыты микродуговым оксидированием (см. рис. 3 справа).

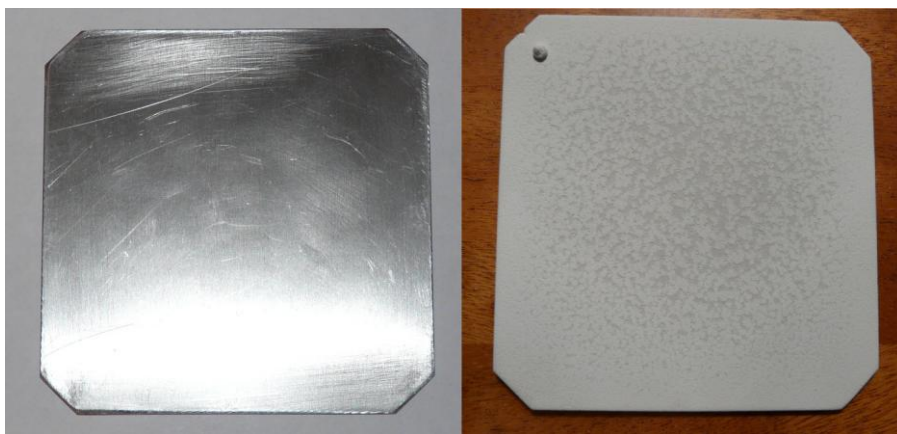


Рис. 3

Толщины МДО-покрытия с неснятым технологическим слоем составляют 260...275 мкм, 165...175 мкм и 65...75 мкм, а со снятым технологическим слоем – 175...200 мкм, 90...110 мкм и 35...50 мкм. В качестве операций по заполнению пор предлагается кипячение в жёсткой воде в течение 1,5 часов, термическая оксидация при температуре 300 °С в течение 3 часов и нанесение на поверхность МДО-покрытия слоя диоксида циркония. Эксперимент заключается в измерении электросопротивления и прочности изоляции каждого из полученных образцов и сравнении с образцами, поры в покрытии которых не заполнялись, чтобы определить наилучший материал-наполнитель. Также будет исследовано газовыделение каждого полученного покрытия в вакууме. Эксперимент сейчас находится в стадии проведения на ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина».

Список литературы

1. *Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Борисов А.М., Крит Б.Л.* Микродуговое оксидирование (окончание) // Приборы. - 2001. - №10. - С. 26-36.

Штокал А.О. — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Cuaa-themoc1@yandex.ru.

Шаталов В.К. — заведующий кафедрой «Технологии обработки материалов» (М5-КФ), профессор, доктор технических наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vkshatalov@yandex.ru.

О. В. Новик, В. В. Калмыков

НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ А.Л. ЧИЖЕВСКОГО В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

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

На первом международном конгрессе в Нью-Йорке в 1939 году, посвященном биологической физике и биологической космологии, Александр Леонидович Чижевский был назван «Леонардо да Винчи XX века». Это сравнение и на сегодняшний день не кажется удивительным. Идеи выдающегося русского ученого до сих пор находят новые воплощения в современной науке и технике. Наряду с такими выдающимися учеными, как К. Э. Циолковский и В. И. Вернадский, он положил начало новому космическому мировоззрению.

С 16 лет Чижевский начал разрабатывать гипотезу о влиянии солнечной активности на биологические и социальные процессы. Примерно в это же время он стал исследовать влияние искусственно ионизированного воздуха на животные организмы и человека. В своих публикациях А.Л. Чижевский предрекал, что область применения искусственной ионизации воздуха безгранична и оказался пророчески прав.

Многие идеи Чижевского были впоследствии подхвачены научным сообществом, развиты и реализованы. Например, появилось понятие аэроионизация. Он впервые экспериментально пытался установить факт противоположного физиологического действия положительных и отрицательных ионов в воздухе на живые организмы, применил искусственную аэроионизацию. В ряде своих научных работ, посвященных воздействию отрицательно заряженных ионов кислорода, Чижевский приписывал им положительный физиологический эффект. В настоящее время в ряде стран аэроионифицируют больничные палаты, санатории, учебные аудитории, служебные помещения, офисы, залы для физкультуры и спорта, заводы и фабрики, частные квартиры и т. д.

Достаточно было, к примеру, всего лишь одного из таких его достижений, как открытие возможности управления химическими процессами при помощи электричества, чтобы его имя навсегда вошло в историю науки.

Сегодня идеи великого ученого нашли применение в области машиностроения. В настоящее время метод электроокраски стал основным на любом крупном предприятии, имеющем дело с покраской материалов и поверхностей: вагоны метро, самолеты, океанские лайнеры — все это ок-

рашивается в электрическом поле по методу Чижевского. В частности, многие автоконцерны применяли ионизацию лакокрасочного тумана для наиболее плотного и равномерного покрытия кузовов автомобилей. Эффект «металлик» так популярный среди автомобилистов был бы не возможен без работ Чижевского. Исследования последних лет еще более расширили применение идеи ионизации в казалось бы совершенно далеких от первоначально задуманных целей.

В условиях присоединения России к Всемирной торговой организации, когда обостряющаяся конкуренция заставляет повышать качество выпускаемой продукции, очень востребованными являются новые методы металлообработки.

Предъявление новых требований к защите окружающей среды и охраны труда на предприятиях повлекло за собой исследования, направленные на оптимизацию процессов в зоне резания, а также исключение вредных факторов, влияющих как на рабочего и зону обслуживания, так и на окружающую среду.

Исследования многих авторов показали эффективность теплоотвода ионизированным воздухом на порядок выше, чем воздухом при традиционных схемах охлаждения. Существуют исследования, доказывающие значительное увеличение эффективности воздуха как СОТС (смазочно-охлаждающего технологического средства), если его предварительно ионизировать, так как при этом, кроме значительного снижения тепловыделения, происходит смазка контактных поверхностей инструмента и заготовки тонкой оксидной пленкой. Область применения воздуха как СОТС ограничивалась его меньшей эффективностью по сравнению с жидкими средствами, такими как эмульсии, масла, мыльные растворы и другие. При охлаждении обычным воздухом отсутствует эффект смазки. Для полноценной замены жидких СОТС воздухом используют так называемое СЭО (сухое электростатическое охлаждение) путем подачи в зону резания ионизированного и озонированного воздуха высокоточным коронным разрядом из специальной установки. А возникающая оксидная пленка на обрабатываемой заготовке выполняет роль твердой смазки. СЭО позволяет увеличить стойкость инструмента до 1,5 раз за счет уменьшения адгезионного воздействия в контактной зоне с помощью эффекта электрической поляризации Дерягина.

Использование воздуха в качестве СОТС имеет преимущества в сравнении с жидкостными аналогами и в большей степени отвечает санитарно-гигиеническим требованиям, предъявляемым к организации производства.

Проблемы рационального применения смазочно-охлаждающих технологических средств определяются двумя основными факторами – экономическим и экологическим. По оценкам специалистов и опыту промышленных

предприятий затраты на СОТС до 4 раз превышают расходы на режущие инструменты и достигают 17 % себестоимости изготовления деталей машин. В то же время СОТС являются загрязнителями окружающей среды, а на их изготовление затрачивают значительное количество дефицитного сырья. При правильно выбранном составе и способе использования СОТС можно резко уменьшить силы трения в контактных зонах «инструмент–заготовка–стружка», уменьшить тепловыделение и усилить отвод тепла, а также обеспечить удаление стружки и отходов обработки из зоны резания и с рабочих поверхностей станка. В результате в существенной степени уменьшаются износ, затупление и засаливание инструмента, повышаются его работоспособность и период стойкости. Все это позволяет значительно повысить производительность обработки и улучшить качество деталей. Поэтому совершенствование составов и техники подачи СОТС является одним из основных направлений развития современной технологии машиностроения.

В последние годы в Калужской области открыто множество высокотехнологичных машиностроительных производств автомобильного кластера. В ближайшее время начнет работу новый завод корпорации «Фольксваген» по производству двигателей для автомобилей. Это производство сопряжено со значительным объемом лезвийной металлообработки, где процессы резания потребуют эффективных подходов к их реализации.

Анализ результатов исследований показывает, что при обработке с подачей в зону резания охлажденного ионизированного воздуха наблюдается существенное повышение стойкости режущего инструмента по сравнению с обработкой без охлаждения и незначительное снижение по сравнению с поливом эмульсией. Величина шероховатости поверхности при подаче охлажденного ионизированного воздуха существенно меньше, чем при отсутствии охлаждения и незначительно отличается от варианта обработки с поливом эмульсией.

Экспериментально доказана возможность ионизации воздуха устройством, работающим на принципе вихревого энергетического разделения газов. Наибольшее влияние на эффективность работы ионизатора оказывают влажность и давление воздуха. Величина средней шероховатости обработанной поверхности при использовании вихревого ионизатора сравнима с величиной средней шероховатости при поливе эмульсией. При этом она в 2,5 раза ниже, чем при отсутствии охлаждения и в 1,8 раза ниже, чем при охлаждении обдувом сжатым воздухом. Стойкость режущего инструмента при охлаждении ионизированным воздухом незначительно (на 5÷10 %) уступает стойкости инструмента при охлаждении поливом эмульсией.

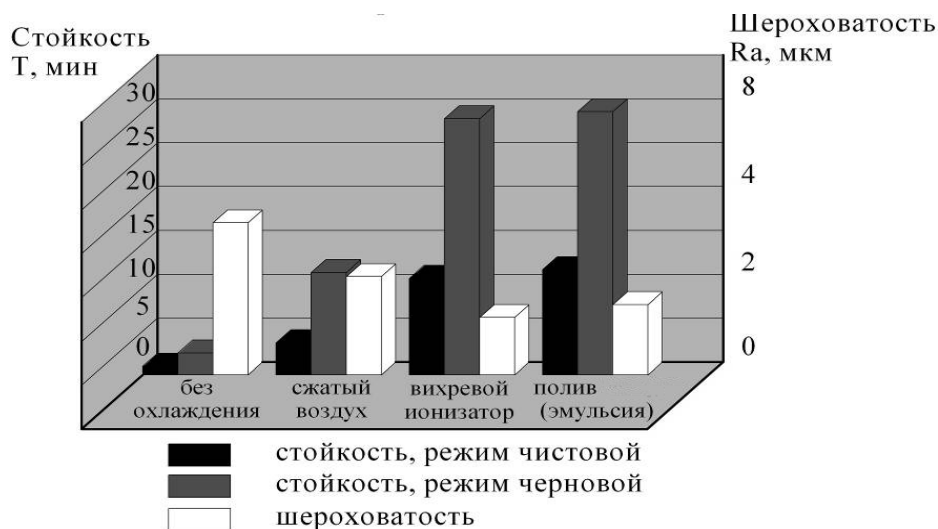


Рис.1 Диаграмма зависимости средней шероховатости (R_a) обработанной поверхности при отсутствии охлаждения; при охлаждении обдувом сжатым воздухом; поливом жидкостями; подачей в зону резания ионизированного воздуха от вихревого ионизатора.

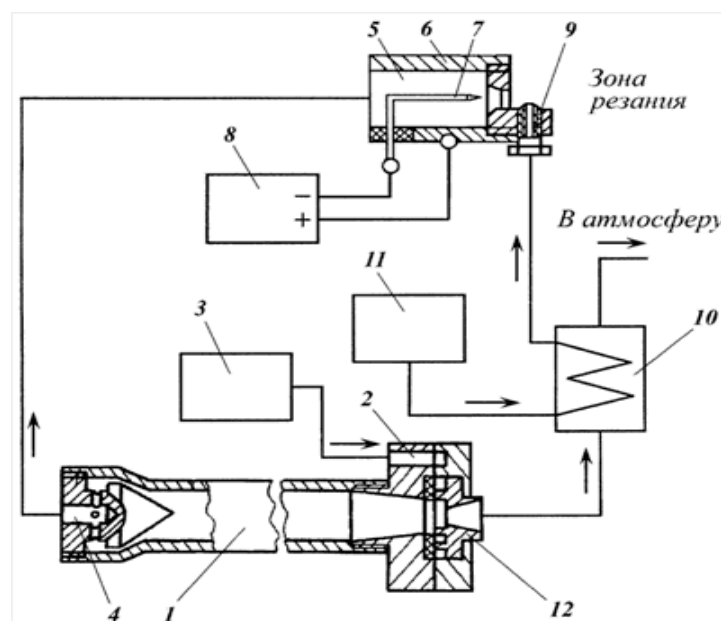


Рис. 2. Схема сухого электростатического охлаждения ионизированным воздухом.

Устройство для охлаждения зоны резания металлорежущего станка (рисунок 2) содержит вихревую трубу 1 с сопловым вводом 2, через который в нее подается воздух от источника сжатого воздуха 3, например, от компрессорной установки. Патрубок вывода горячего потока 4 соединен с ионизатором 5, выполненным в виде кольцевого положительного электрода 6 и игольчатого отрицательного электрода 7, которые подсоединены к электрическому источнику питания 8. В зоне прохождения ионизированного потока воздуха установлен эжектор 9, подключенный через трубное пространство рекупера-

тивного теплообменника 10 к увлажнителю 11. Патрубок вывода холодного потока 12 соединен через межтрубное пространство теплообменника 10 с атмосферой.

Исследованиями установлено[1]:

- охлажденный в вихревой трубе ионизированный воздух, увеличивает стойкость инструмента при обработке стали 45 до 10 раз по сравнению с резанием «всухую» и до 1,5 раз по сравнению с применением эмульсии; снижает температуру в контактной зоне в 2-3 раза; улучшает характеристики процесса резания и качество обработанной поверхности;
- уменьшение величины остаточных напряжений на 10-15% при обработке с использованием охлажденной ионизированной среды по сравнению с резанием «всухую» и использованием эмульгированных и масляных жидкостей;
- увеличение условного угла сдвига и уменьшение поверхностных значений твердости с 260 до 240 кг/мм² и глубины деформированного слоя при резании в среде охлажденного ионизированного воздуха по сравнению с обработкой «всухую», что объясняется изменением условий взаимного перемещения сопряженных поверхностей инструментального и обрабатываемого материала;
- уменьшение коэффициента трения на 25-30% при применении охлажденной ионизированной среды по сравнению с трением на воздухе, что обусловлено интенсивным формированием оксидов железа (FeO и Fe₃O₄) на трущихся поверхностях.

Такой способ охлаждения зоны резания находит широкое применение при обработке легированных, коррозионностойких и жаропрочных сталей, сплавов на основе никеля, вольфрама, а также в металлообработке, где применение охлаждающих жидкостей недопустимо, например, в электровакуумной промышленности.

Кроме того, охлажденный ионизированный воздух не вызывает трещин на инструменте при высокоскоростных методах обработки, где высокие температуры в зоне резания ускоряют процесс образования защитных окисных пленок.

К настоящему времени создано большое разнообразие технических средств для подготовки ионизированных газов, в том числе multifunctionальных вихревых устройств для подачи СОТС в зону резания в распыленном состоянии, а так же устройств для увлажнения и кондиционирования воздуха.

Данные возможности стали доступными для современного машиностроения благодаря использованию и развитию идей нашего земляка, великого русского ученого Александра Леонидовича Чижевского. Существует уверенность, что и в будущем ученые найдут новые способы применения его на-

учного наследия в самых неожиданных проявлениях для пользы человечества.

Список литературы

Курапов К.В., Наумов А.Г., Федулов Е.А. Повышение охлаждающей способности ионизированного воздуха // Физика, химия и механика трибо-систем: Межвуз. сб. науч. тр. Иваново: 2007. Вып. 6. С.112-113.

Климочкин К.О., Есов В.Б. Модернизация системы охлаждения металлорежущих станков с применением устройства охлаждения ионизированным воздухом (УОИВ). - Ремонт, Восстановление, Модернизация, 2011.

Худобина Л. В. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник - М.: Машиностроение, 2006. - 544 с.

Новик О. В. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: oli.nowik@yandex.ru.

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

А.В. Волков

О СЛЕДСТВИИ КОНЦЕПЦИИ Ю.М.ЕРМАКОВА ДЛЯ РАСЧЁТА УСИЛИЙ РЕЗАНИЯ

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

В практике проектирования процессов резания традиционно используются эмпирические формулы для расчета составляющих силы резания. Однако при современных методах оптимизации автоматизированного производства данный подход не обеспечивает заданной точности расчетов, что может приводить к значительным ошибкам, которые через справочную литературу попадают в соответствующие модули САПР, снижая их эффективность [1]. Это становится тем более важным, что в отечественных и зарубежных справочниках по режимам резания, зачастую используемых разработчиками САПР, сведения о точности представленных формул практически отсутствуют, на что обращал внимание, например, Г. И. Грановский [2]. В то же время чисто аналитическое определение сил резания является одной из сложнейших задач теории резания металлов [3].

Процесс резания по Ю. М. Ермакову [4] — комплексное явление, соединяющее в себе способ резания, объект воздействия, станок и инструмент. При этом способ резания характеризуется видом подводимой энергии, кинематическим соотношением движений инструмента и заготовки, схемой срезания припуска, режимами резания, определяющими динамическое взаимодействие, а также комбинациями механической с другими видами энергии, приемами и инструментами.

Схема процесса резания по данным Ю. М. Ермакова, включающая двадцать основных взаимовлияющих входных параметров, при учете выходных параметров, подпараметров, их характеристик и переменных факторов, образует огромное количество сочетаний при числе вариантов их взаимодействия до $3,8 \cdot 10^{31}$ [4]. В связи с таким количеством взаимодействий параметров и факторов, действующих в системе резания, в том числе и при силовых расчетах, представляет интерес создание гипотетической математической модели оценки перспектив достижения требуемой степени точности расчета усилий резания.

Пусть имеется зависимость, определяющая функциональную связь точности расчета усилия резания с количеством учитываемых параметров и факторов процесса резания. Данную зависимость, в случае стремления обеих её лучей к бесконечному числу сочетаний с одинаковой скоростью, можно представить в виде равнобочной гиперболы (первый луч по оси y — при возрастании погрешности расчета с одним параметром, либо одной его характеристикой, а второй — по оси x — при снижении погрешности расчета усилия резания до весьма малой величины и стремлении количест-

ва параметров к числу сочетаний по Ю. М. Ермакову). Таким образом, априорно мы можем задать две точки этой кривой. Определив еще три точки из аналитико-экспериментальных данных о точности расчета усилий резания при конкретном количестве параметров по Г. И. Грановскому [2], А. В. Панкину [5] и Н. Н. Зореву [6], найдем все пять точек, что достаточно для построения кривой второго порядка.

Применив ограничения: $x \geq 0,1$ и $y \geq 0,1$, где x — количество параметров и факторов резания, а также их сочетаний, а y — погрешность определения усилия резания в долях процента, получили в первом квадранте зависимость $xy = a^2/2$, где a — расстояние от центра симметрии до вершины гиперболы, или половина действительной оси. То есть мы полностью определили кривую «точность расчетов усилий резания – количество учитываемых параметров и факторов процесса резания» на основе простого уравнения равнобочной гиперболы. Данная зависимость может быть пригодна для определения погрешностей расчетов усилий резания конструкционных сталей при обработке твердосплавными резцами.

Таким образом, разработана гипотетическая математическая модель оценки зависимости средних погрешностей расчетов усилия резания ΔP_z , от количества действующих параметров, факторов и их сочетаний, определяющих процесс резания.

Полученная зависимость является следствием концепции Ю. М. Ермакова, построена на основе уравнений механики резания, экспериментально подтверждённых авторами классических работ по теории резания. Интерполяционные возможности модели реализованы с погрешностью $\pm 12\%$ (в диапазоне от двух до одиннадцати параметров). Экстраполированная часть модели может быть пригодна для предварительной оценки погрешностей расчетов усилий резания при практически любом достижимом количестве параметров и факторов резания.

По результатам экспериментального подтверждения работоспособности модели могут быть выработаны рекомендации в части оценки достижимой точности расчета усилия резания.

Список литературы

1. *Пестрецов С. И.* Компьютерное моделирование и оптимизация процессов резания : учеб. пособие. — Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. — 104 с.
2. *Грановский Г. И., Грановский В. Г.* Резание металлов : Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. — М. : Высшая школа, 1985. — 304 с.
3. *Старков В. К.* Физика и оптимизация резания материалов. — М.: Машиностроение, 2009. — 640 с.

4. *Ермаков Ю. М.* Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. — М.: Машиностроение, 2005. — 272 с.
5. *Панкин А. В.* Обработка металлов резанием. — М.: Машгиз, 1961. — 520 с.
6. *Зорев Н. Н.* Расчет проекций силы резания. — М.: Машгиз, 1958. — 56 с.

Волков А.В. — доцент, к.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: nina1945@li.ru.

С. Н. Бриченков

О ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМОВ АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА СИЛ РЕЗАНИЯ

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

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 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. Аналитическое определение сил резания - одна из сложнейших задач теории резания металлов, над которой трудятся коллективы многих научных школ.

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. В обоснование достоверности механизма стружкообразования путем сдвиговой деформации срезаемого металла по плоскости скалывания был принят постулат постоянства действующего значения касательного напряжения пластического течения по предполагаемой плоскости сдвига.

Критерием оптимальности математической модели оптимизации условий обработки В.К. Старковым выбрана удельная энергоемкость, дающая возможность расчета усилия резания по упрощённой формуле Н.Н. Зорева (1956 г.) с использованием факторов процесса, известных заранее: механические свойства обрабатываемого материала σ_b и ψ , параметры геометрии инструмента γ и λ , коэффициент усадки стружки ξ и параметр θ . Формула (1) Н.Н. Зорева, отличается значительной простотой от современных, например, рассмотренных в работах Ю.Н. Внукова (2007-2008 г.г.), и использована В.К. Старковым как наиболее удачная из известных для расчета главной (тангенциальной) составляющей силы резания при использовании модели сливного стружкообразования.

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

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

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

где

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

Здесь Φ - угол сдвига, °; ξ - усадка стружки по толщине; ω - угол действия, °;

$\theta = \Phi + \omega$ - параметр, °; λ - угол наклона главной режущей кромки, °; ψ - равномерное относительное поперечное сужение образца.

Экспериментальные исследования влияния различных условий резания на процесс стружкообразования Н.Н. Зорева показали, что даже для прямоугольного свободного резания процесс стружкообразования непосредственно зависит от четырех факторов: угла действия, переднего угла, свойств обрабатываемого материала, скорости резания. По рекомендации Н.Н. Зорева для точных подсчетов усадки стружки в широком диапазоне изменения толщин среза В.К. Старковым использовалась формула (3), учитывающая влияние толщины среза на усадку стружки при постоянной стойкости инструмента:

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

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. По 128 опытам она составила в среднем 10%, при максимальной величине 15%. Точность расчётов по алгоритму на основе определения усадки стружки Н.Н. Зоровым считается более низкой, но не уточнялась.

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 $\mu_3 = 0,41$, а по передней поверхности $\mu_n = 0,7$. Для процесса точения жаропрочных сплавов им получена экспериментальная формула определения усадки стружки:

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

где f — относительное содержание легирующих элементов в жаропрочном сплаве.

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 %. Исследование процесса резания сплавов типа ХН77ТЮР, ХН55ВТФКЮ, ХН56ВМКЮ ЖС6КП при сливном стружкообразовании, в условиях локализации пластически

деформируемой зоны показало, что алгоритм определения усилий резания по усадке стружки Н.Н. Зорева дал расхождение опытных значений P_z с расчетными при точении 23%.

В работе Ю.Н. Внукова (2008 г.) рассматривались алгоритмы аналитического расчета сил резания при прямоугольном несвободном резании, разработанные Н.Н. Зоревым. Автор считает, что рассмотренные алгоритмы Н.Н. Зорева представляют интерес только как принципиальные, и по причине 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.

Важно уточнить, что в расчетах Н.Н. Зорева температура в зоне резания по умолчанию принимается равной 600°C , и если в экспериментах температура имеет другое значение, то при расчетах это может оказывать влияние на точность результатов.

В данной работе рассмотрен упрощённый базовый алгоритм определения составляющих силы резания по величине усадки стружки по Н.Н. Зореву и В.К. Старкову, и проведено сравнение экспериментальных и расчетных значений главной составляющей силы резания с данными полученными по формуле А.Л. Воронцова при аналогичных режимах резания, характеристиках инструмента и обрабатываемого материала. Результаты этого сравнения сведены в таблицу.

Во всех случаях использовалась сталь прошедшая нормализацию, твердосплавный инструмент с главным углом в плане $\varphi = 45^{\circ}$, параметр $\theta = 40 \div 50^{\circ}$.

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

Принимая во внимание, что погрешность при определении силы резания по формуле Н.Н. Зорева ранее принята равной 23%, а погрешность при определении силы резания по формуле А.Л. Воронцова в результате расчетов составила в среднем 7%, построим гистограмму. Полученная гистограмма показана на рис. 1.

Введем 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;

+0,69 – минимальное значение погрешности при расчетах силы резания по формуле Воронцова;

+18,21 – соответственно максимальная погрешность при расчетах.

Анализируя гистограмму 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. Из этого следует, что формула Воронцова может ис-

пользоваться для определения составляющей силы резания P_z и дает значение с достаточной точностью.

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 обрабаты- ваемого материала			Режимы резания		Составляющие силы резания		Погрешность при сравнении	
								Расчетные по Н.Н. Зо- реву и В.К. Старкову	Эксперимен- тальные по А.Л. Воронцову		
	γ, град	λ, град	Марка материала	Сужение, ψ	σ _в , МПа	t, мм	S, мм/об		P _z , Н		P _z , Н
Сталь конструкционная углеродистая качественная											
1	8	0	Сталь 10	0,5	330	0,5	0,21	208.4	228	9,4	
									227,4	9,11	
2	25	0	Сталь 10	0,5	330	1,00	1,00	1688	1800	6,64	
									1849,2	9,55	
3	15	8	Сталь 45	0,4	600	3,00	0,2	1369	1480	8,11	
									1618,3	18,21	
4	-5	0	Сталь 45	0,4	600	3,00	0,2	1534	1760	14,73	
									1769,2	15,33	
Сталь конструкционная легированная											
5	0	0	Сталь 20Х	0,48	470	0,5	0,3	432.3	430	-0,53	
									435,3	0,69	
6	0	0	Сталь 20Х	0,48	470	0,5	0,23	333.8	350	4,85	
									350,8	5,09	

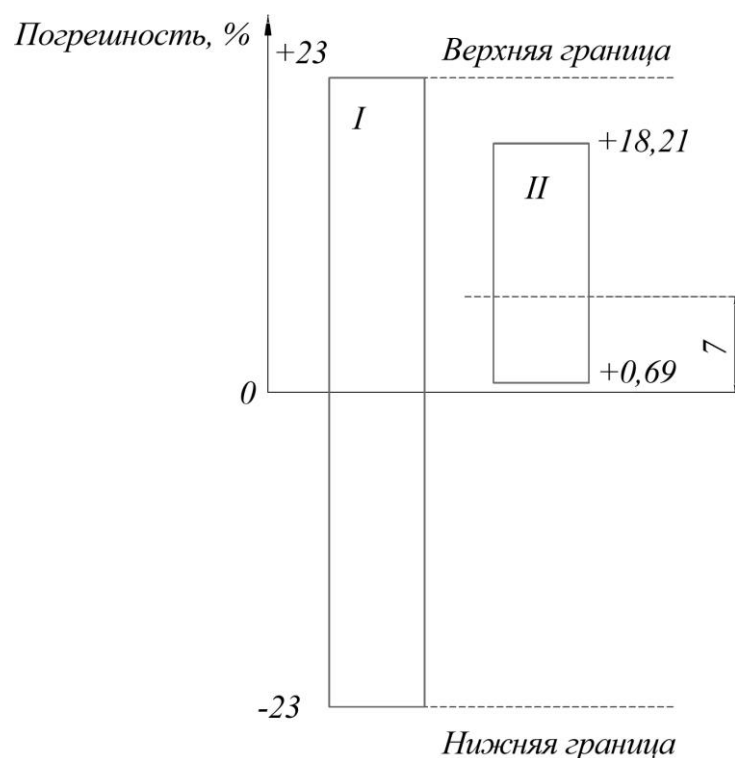


Рис. 1

Список литературы

1. Беспяхотный 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.
2. Верещака А.С. Резание материалов: Учебник/А.С. Верещака, В.С. Кушнер. — М: Высш. шк., 2009. — 535 с.
3. 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 «ХПИ», 2008.- Вып.74. - С.31-56.
4. Воронцов А. Л., Султан-Заде Н. М, Албагачиев А. Ю. Разработка новой теории резания. Современная теория разрушения при пластической деформации // Вестник машиностроения. - 2008. - С. 67 – 76.
5. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. — 367 с.
6. Зорев Н.Н. «Расчёт проекций силы резания». Машгиз, Москва, 1958. — 56 с.
7. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. — 304 с

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

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

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

Бриченков С. Н. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: brichenkov.sergei@yandex.ru.

Е.В. Логутенкова, Ф.И. Антонюк

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОЦЕССА ОСАДКИ С ПРЯМЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ

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

Для изготовления стержневых изделий с фланцем холодной объемной штамповкой (ХОШ) на прессах применяют такие технологические операции, как высадка и прямое выдавливание. Однако, при формообразовании фланцев относительно больших диаметров ($D > (4...6)d$) высадкой на прессах увеличивается количество переходов (от 4 до 6), что приводит к снижению эффективности операции ХОШ [1].

Применение операции прямого выдавливания характеризуется ростом удельных деформирующих сил с увеличением отношения диаметра фланца к диаметру стержня (D/d). Это отношение определяет предельную величину относительной деформации при прямом выдавливании - $\psi = 1 - \left(d/D\right)^2$. Например, для низкоуглеродистой стали 10 максимальная относительная степень деформации при прямом выдавливании не превышает 0,75...0,8, так как удельные силы при этом могут достигать 2200 МПа [1, 2]. Такая величина удельных сил деформирования близка к предельно допустимой (2500 МПа).

Таким образом, с учетом выше указанных ограничений, для стержневых поковок с фланцем относительно больших диаметров рекомендуется применять комбинированную операцию осадки с прямым выдавливанием, схема которой представлена на рисунке 1 [3,4].

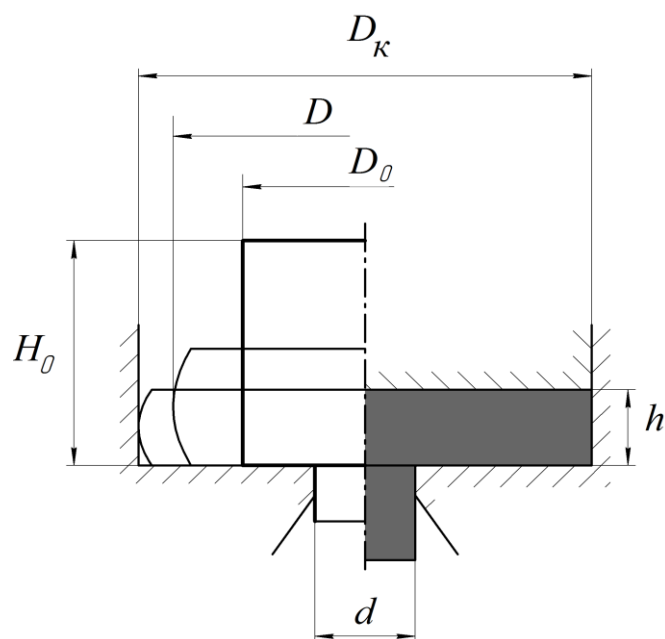


Рис.1

На первой операции рекомендуют выдавливать стержень с фланцем с $D_0/d \leq 2,0$ и $H_0/D_0 \leq 2...3$, на второй – осаживать головку до требуемого диаметра $D_k = \left(\frac{D_0}{\sqrt{1-E}} \right)$ ($E = 1 - \left(\frac{h}{H_0} \right)$ - степень деформации осадки). При этом некоторая часть объема осаживаемой головки прямым выдавливанием вытесняется в стержень.

Формоизменение фланца на стержне происходит в результате одновременного действия двух операций, поэтому оно должно оцениваться показателями, характеризующими как процесс осадки (E), так и процесс выдавливания ($\varepsilon = \ln \left(\frac{D}{d} \right)^2$ - логарифмическая степень деформации выдавливания).

Проведены экспериментальные исследования, и получены зависимости удельных деформирующих сил комбинированной операции и операции прямого выдавливания от величины логарифмической степени деформации выдавливания. В выполненных экспериментах поковки изготавливали из сплава АД1 с равными геометрическими параметрами (D_k , d , h). Для обеспечения различных степеней деформации осадки ($E = 0,4$; $0,6$ и $0,75$) на первой операции изготавливали заготовки с диаметрами фланцев $D = 20$, 16 и $12,5$.

Анализируя результаты экспериментов, можно сделать вывод, что соотношение удельных деформирующих сил осадки с выдавливанием и удельных сил прямого выдавливания зависит от степени деформации

осадки. При величине $E = 0,4 \dots 0,5$ удельные силы прямого выдавливания больше удельных сил комбинированной операции. Если степень деформации при осадке $E = 0,6$, удельные силы исследуемых операций равны, а при степени деформации осадки $E = 0,75$ удельные силы комбинированной операции превышают удельные силы прямого выдавливания.

Таким образом, уменьшая степень деформации осадки фланца при увеличении степени деформации выдавливания на первой операции, соотношение удельных сил деформирования исследуемых операций можно регулировать.

Список литературы

1. Ковка и штамповка: Справочник в 4-х т. Т.3 Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого – М.: Машиностроение, 1987. – 384с.
2. Холодная объемная штамповка: Справочник / Под ред. Г.А. Навроцкого – М.: Машиностроение, 1973. – 496с.
3. *Овчинников А.Г.* Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. – М.: Машиностроение, 1983.-200с.
4. *Евстратов В.А.* Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. – Харьков: Вища школа, 1987. – 144 с.

Логутенкова Е.В. — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: logutenkovae@mail.ru.

Антонюк Ф.И. — профессор, доктор технических наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: logutenkovae@mail.ru.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБОМАШИН НА 3D-ПРИНТЕРЕ.

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

В настоящее время существуют технологии изготовления деталей из различных материалов с применением технологии 3D-печати.

1. Сведения о 3D-принтере. Первый 3D принтер был изобретен в 1986 году компанией 3D Systems. Назывались SLA или стереолитографические машины (stereolithography apparatus). Первые стереолитографические машины использовались главным образом в исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, связанной с оборонной промышленностью. Первые лазерные машины – сначала стереолитографические (SLA-машины), затем порошковые (SLS-машины), были чрезмерно дороги, а выбор материалов довольно скудный. Широкое распространение цифровых технологий в области проектирования (CAD), моделирования и расчетов (CAE) и механообработки стимулировало взрывной характер развития технологий 3D-печати. В настоящее время сложно указать область материального производства, где в то или иной степени не использовались бы 3D-принтеры.

2. Методы аддитивных технологий. Классификации аддитивных технологий пока не приняты. Различные авторы подразделяют их:

- по применяемым строительным и модельным материалам (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и т.д.);
- по наличию и отсутствию лазера;
- по методам подвода энергии для фиксации слоя построения (с помощью теплового воздействия, облучения ультрафиолетовым или видимым светом, посредством связующего состава и т.д.);
- по методам формирования слоя.

Наиболее популярны два метода аддитивных технологий beddeposition и direct deposition.

3. Оборудование. Почти все компании, использующие лазер, по-разному называют свои технологии. Вероятно, чтобы таким образом как-то отличить себя на рынке от конкурентов. Однако, по технической сути, все они являются технологиями селективного лазерного сплавления – SLM-технологиями, но именно это название негласно закреплено за компанией SLM Solutions.

АМ-машины – это целый комплекс, включающий в себя устройства для просеивания и смешения порошков, загрузки, разгрузки и очистки машины, системы фильтрации и охлаждения, системы хранения порошков,

системы генерации, подачи инертных газов и др. Все это необходимо учитывать при решении вопроса о приобретении такой машины для рационального обустройства места инсталляции.

4. Используемые материалы. В данный момент существуют разнообразные материалы, с различным набором свойств. Материалы, наиболее применяемые в турбиностроении, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Используемые материалы

Материал	Особенности	Применение
Нержавеющая сталь 17-4 (GP1)	Слои на 20 или 40 микронов. 20-25 HRC после изготовления. 45 HRC после закалки. Максимальная температура - 550°C, 1022°F.	Детали, требующие высокой устойчивости к коррозии. Детали, требующие особенно высокой податливости.
Нержавеющая сталь 15-5 (PH1)	Слои на 20 или 40 микронов. 30-35 HRC после изготовления. 40 HRC после закалки. Максимальная температура - 460°C, 860°F.	Детали, требующие высокой устойчивости к коррозии. Детали, требующие особенно высокой твердости и прочности.
Хром кобальт (MP1)	Слои на 20 или 40 микронов. 40-45 HRC после изготовления. Максимальная температура - 1150°C, 2100°F.	Детали, требующие высоких механических свойств при повышенных температурах и с хорошей устойчивостью к коррозии. Например, турбины и другие части для двигателей. Изделия, имеющие очень маленькие части, такие как тонкие стенки, булавки, требующие особенно высокой прочности.

Сталь мартенсит- ная (MS1) (Инструментальная сталь)	Слои на 40 мик- ронов. 33-37 HRC после изготовления. 50-54 HRC после закалки. Максимальная температура - 400°C, 750°F.	Прочность пресс-форм и встав- ки для моделирования. Все стандартные термопласты с ис- пользованием стандартных па- раметров впрыска, с достижи- мой службы инструмента до миллионов частей. Литье в пресс-формы для не- скольких тысяч деталей из лег- ких сплавов. Детали, требующие особо высо- кой прочности и твердости.
Сплав титана (Ti64)	Слои на 20-60 микронов. 41-44 HRC после изготовления. Максимальная температура - 350°C, 660°F.	Детали, требующие комбинации высоких механических свойств и низкого определенного веса. Например, компоненты двигате- лей для космических аппаратов и мотоспорта.
Алюминий (AlSi10mg)	Слои на 30 мик- ронов. 120 ± 5 HBW по- сле изготовлении. 112 ± 5 HBW по- сле закалки.	Детали, требующие комбинации хороших тепловых свойств с низким весом. Например, мотоспорт и авиация.
Сплав никеля (IN718) (Inconel)	Слои на 20 или 40 микронов. 30 HRC после из- готовления. 47 HRC после за- калки. Максимальная температура - 650°C, 1200°F.	Детали двигателей турбин воз- душного и наземного базирова- ния. Ракеты и прикладные компонен- ты для космонавтики. Компоненты химической и пе- рерабатывающей промышлен- ности. Нефтяные скважины, нефтегазо- вая промышленность

4 Состояние производства деталей на 3D-принтере. В данный мо-
мент ведется активное внедрение технологии 3D-печати в различных от-
раслях промышленности. Выбор в пользу новой технологии сделан в связи
с тем, что аддитивное производство расходует меньше материала. Это
снижает издержки, поскольку изделия к тому же получаются более лёгки-
ми. Ведутся активные работы по исследованию прочностных характери-

стик изделий, изготовленных посредством 3D-печати. Компания Solid Concepts произвела классический армейский пистолет M1911 на 3D-принтере. Пистолет успешно выдержал полевые испытания. После 50 выстрелов никаких поломок и неисправностей выявлено не было. Следует отметить, что при каждом выстреле давление в стволе напечатанного пистолета подскакивает до 1400 килограмм на квадратный сантиметр. Материалом для пистолета послужила нержавеющая сталь 17-4 и сплав инконель 625, а накладку на рукоятки было напечатано из нейлона, так же методом селективного лазерного спекания. Одна из проблем которую способна решить технология 3D-печати, это закоксовывание топливных форсунок. Традиционные топливные форсунки впрыскивают топливо при температуре 3000⁰. С течением времени на поверхности форсунки откладывается углерод, что приводит к снижению производительности двигателя и сокращения его срока службы. Новые топливные форсунки печатаются сразу с внутренней системой связей для поддержки и каналом охлаждения предназначенных предотвратить закоксовывание форсунок. Такая деталь служит в 5 раз дольше и весит на 25% меньше, чем деталь изготовленная традиционными методами. В данный момент GE Aviation полностью перевели процесс изготовления форсунок на 3D-принтер. Благодаря 3D-принтерам мы можем брать традиционные детали и переделывать их. Несколько таких деталей могут значительно уменьшить массу авиационного двигателя.

5 Перспективы. Во многих отношениях мы воспринимаем технологию 3D-печати как технологию, которая пришла на смену традиционным технологиям, таким как литье, низкая обработка, пайка, сварка. Примечательно, что теперь благодаря 3D-печати мы можем сделать цельные детали, которые раньше спаивались, сваривались из множества отдельных частей. Так к 2020 году, GE Aviation планирует изготовить более ста тысяч деталей на 3D-принтере для авиационных двигателей. В данный момент ведутся разработки сверхмощных лазеров и процессов параллельной проверки качества, которые увеличат максимальную скорость печати в 20 раз по сравнению с тем, что мы имеем сегодня. Так же ведутся работы по производству новых материалов, благодаря которым, детали будут легче и прочнее.

В России 3D-технология развивается на научно-исследовательском уровне. (ОАО «НИАТ НТК», ОАО «АБ Универсал»). Производство 3D-принтеров, не налажено. Новая технология 3D-печати стоит на уровне развития. Один из путей развития, это получение упругих деталей на 3D-принтере. Так как на данный момент этот вопрос не решен.

3D-печать в будущем позволит производить высококачественную, высокоточную и прочную, продукцию более быстро и менее затратно, нежели традиционные технологии.

Список использованных источников

1. *Довбыш В.М.* Аддитивные технологии и изделия из металла - 57 с.
2. <http://www.gereports.com>
3. <http://www.solidconcepts.com/>
4. <http://gpiprototype.com>
5. <http://www.eos.info/en>
6. <http://3dtoday.ru/>

Ковтун Александр Владимирович — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: zik_777_90@mail.ru.

Смоляр Сергей Григорьевич — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: smolyar_sergei@mail.ru.

Землянский Анатолий Васильевич — доцент, кандидат технических наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: zemlyansky.k1kf@yandex.ru.

В.В. Калмыков, Н.В. Кудрявцев, И.С. Гольцов

СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ КАФЕДРЫ «ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ» МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА

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

Технология машиностроения как наука призвана разрабатывать и совершенствовать процессы создания деталей, а также снижать их себестоимость[1]. Движущей силой данной науки стали такие школы как: научная школа МГТУ им. Н.Э. Баумана, научная школа Брянского института БГТУ и др.

Научные инженерные и научно-педагогические школы МГТУ им. Н. Э. Баумана отличаются по крайней мере три особенности: высокий естественно-научный уровень, заложенный и поддерживаемый профессурой университета, фундаментальность общепромышленных научных направлений, общероссийский масштаб некоторых школ, зародившихся или получивших широкое развитие в стенах МГТУ [4].

Система подготовки специалистов в МГТУ им. Н. Э. Баумана, базирующаяся на практическом обучении студентов, повлекло создание научной школы технологов-машиностроителей. Главные направления научной школы профессора В.М. Кована сформировались на основе требований производства.

Исследования по технологии машиностроения ведутся в ВУЗе с 1869 г. Особенно широкое развитие они получили с 1936 г., когда заведующим кафедрой технологии механосборочного производства стал основатель кафедры и технологической школы МВТУ – МГТУ заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор В.М. Кован.

Виктор Михайлович Кован является одним из основоположников теории точности технологических процессов механической обработки, кафедры «Технологии машиностроения» и создателем учения о расчете припусков на обработку в машиностроении. Под его руководством в 1945 г. организована первая в СССР учебная лаборатория по технологии машиностроения.

В 20-30е годы XX века промышленности требовалось увеличить точность деталей, уменьшить шероховатость поверхностей, увеличить производительность. Без научного подхода к этой проблеме нельзя было развивать отечественную промышленность. Главному направлению науки соответствовало учение о точности и припусках на механическую обработку. Теперь, на рубеже XXI века можно с уверенностью сказать, что

направление научной школы В.М. Кована было выбрано верно, т.к. за истекшие годы точность изготовления деталей увеличилась примерно в 2000 раз и продолжает расти, а проблема качества изделий стала еще более актуальной.

Вокруг В.М. Кована сплотилась группа молодых ученых и уже с 1936 года на защиту стали выноситься кандидатские диссертации по актуальным вопросам технологии машиностроения. Начинает развиваться литературная деятельность научной школы проф. В.М. Кована. Именно им в 30-х годах были выпущены первые учебные пособия и книги рекомендуемые как учебники для ВТУЗов. До 1930г. книг по технологии машиностроения практически не было, приходилось довольствоваться статьями в зарубежных журналах описательного характера[4].

В 1944г. выходит труд В.М. Кована "Технологии машиностроения", который был утвержден в качестве учебника для машиностроительных вузов страны. В 1947-48г.г. коллектив кафедры принял участие в издании 5,6 и 7 томов энциклопедического справочника "Машиностроение", а В.М. Кован был ответственным редактором этих томов.

Всего В.М. Кованом было издано более 30 крупных научных трудов. Под его руководством с 1936 года по 1960г. было защищено 27 кандидатских диссертаций по самым различным направлениям технологии машиностроения, которые нашли свое дальнейшее развитие в научно-исследовательских работах и трудах его учеников: д.т.н., проф. В. С. Корсакова, к.т.н., доцентов А.Г. Косиловой М.Д. Солодова, М.А. Калинина, Н.М. Капустина. Это работы, посвященные проблемам определения технологических параметров, необходимых для построения высокопроизводительных технологических процессов; исследования погрешностей, обуславливающих точность обработки и качество поверхности; влияние качества обработки сопрягаемых деталей на качество соединений.

Одним из важнейших положений научной школы проф. В.М. Кована является разработка расчетно-аналитического метода определения ожидаемой точности изготовления деталей и сборки машин.

Бурное развитие промышленности потребовало выделения четко очерченного курса "Технологии машиностроения", большая заслуга в котором принадлежит заслуженному деятелю науки и техники РСФСР, д. т. н., проф. В. С. Корсакову[3].

Одну из важнейших ролей в развитии научной школы технологов машиностроителей проф. Владимир Сергеевич Корсаков, возглавивший кафедру после смерти В.М. Кована в 1962 году. Развитие научной школы происходило по трем направлениям: точность при изготовлении деталей, технологические основы автоматизации процессов механической обработки и сборки, автоматизация проектирования технологических

процессов, которые актуальны и по сей день. Профессор В. С. Корсаков существенно развил ряд направлений. Он стал основателем научной школы в области теоретических основ технологии машиностроения и станкостроения. За 24 года им опубликованы более 20 монографий и учебников, был научным руководителем 74 аспирантов и многих соискателей, успешно защитивших кандидатские диссертации. Одними из его трудов были учебники "Основы технологии машиностроения" для специальностей машиностроения (который переведен на многие языки) и для конструкторских специальностей (1974г. и 1977г. издания); Учебник по "Основам конструирования и расчетам приспособлений" (1971г., 1983г. издания); учебник "Автоматизация производственных процессов" (1978г.).

С первых дней своего существования кафедра работала в тесном содружестве с такими предприятиями - гигантами нашей промышленности, как ЗИЛ, ГАЗ, 1 ГПЗ, "Красный пролетарий", и многими предприятиями оборонной промышленности. В тяжелейшие годы Великой Отечественной войны коллектив кафедры не снизил своей работоспособности. Ижевскому оборонному заводу очень пригодился огромный опыт В.М.Кована и его сотрудников в области технологии машиностроения. Одновременно завод оказался замечательной лабораторией для дальнейшего развития его научной школы. В эти годы были проведены глубокие исследования физических явлений, возникающих в поверхностных слоях деталей машин в процессе их изготовления.

В 50-е годы научная школа еще больше оформилась в организационном, научном и методическом отношении и стала ведущей в стране. Учение о точности было дополнено исследованиями по оценке качества деталей методами математической статистики.

Государственное значение имеют труды школы по определению припусков на обработку. Отходы механических цехов в виде стружки составляет несколько миллионов тонн металла в год. Научное определение величины припуска позволяет не только экономить материал, но и обеспечивает решение целого комплекса сложных технологических задач. Эти исследования выполнялись в течение многих лет по хоздоговорной и госбюджетной тематике и были внедрены на заводах автомобильной, оборонной промышленности и станкостроения.

Проблема припусков оказалась настолько важной, что для ее решения и развития потребовалось провести ряд Всесоюзных конференций, написать несколько книг и выпустить государственные стандарты.

С 1984г. по 1990 кафедрой руководил Антон Михайлович Дальский, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат премии Совета Министров СССР, академик Академии проблем качества. Научные интересы проф. Дальского А.М. лежат в

области прецизионного машиностроения и технологической наследственности. Он автор и редактор более 20 монографий, учебников и справочников. Под его руководством защищено 34 кандидатских диссертации. Проф. Дальский А.М. является научным консультантом 5 докторских диссертаций. Более 20 лет отдано им работе в экспертном совете ВАК СССР, а также совете по машиностроению в Комитете по Ленинским и Государственным премиям. Около 30 лет он был председателем диссертационного совета по специальности «Технологии машиностроения». Тесно связан с Брянской технологической школой, особенно в области качества поверхностного слоя заготовок и деталей машин. Является участником всех научных конференций, проводимых как в г. Брянске, так и в других городах по проблеме качества машин. Неоднократно выступал в качестве официального оппонента по диссертационным работам, защищаемым в БГТУ. В 1992 г. под руководством академика АУК А.М. Дальского в НУК МТ создана лаборатория "Технологическая наследственность". В лаборатории подготовлена программа "Разработка общей теории технологического наследования для создания прецизионных изделий машиностроения", объединившая в научном плане практически все кафедры факультета.

С 1992 года кафедрой руководил доктор техн. наук проф. Александр Васильевич Мухин. Под его руководством начата разработка нового научного направления "Теоретическая технология"[3].

В настоящее время кафедрой руководит доктор технических наук, профессор Александр Сергеевич Васильев. Сегодня осуществляется развитие научной школы по следующим направлениям:

- технологическая наследственность в различных состояниях объекта машиностроения (Рук. д.т.н. проф. Дальский А. М.);
- разработка концептуальных основ теоретической технологии (Рук. д.т.н. проф. Мухин А. В.);
- автоматизация поддержки технологических решений (Рук. д.т.н. проф. Кондаков А.И.);
- разработка технологических схем формообразования поверхностей из труднообрабатываемых материалов импульсами электрического тока (Рук., к.т.н., доц. Заставный Е.А.);
- повышение точности обработки на станках с ЧПУ (Рук., к.т.н., доц. Мельников Г.Н.);
- направленное формирование качества изделий машиностроения в многосвязных технологических средах (Рук. д.т.н., профессор Васильев А.С.)

Подготовка высококвалифицированных инженеров-технологов в области машиностроения основывается на знаниях, полученных студентами при изучении профилирующих дисциплин, и овладении

существующими методами оценки качества изделий (как статистических, так и расчетно-аналитических), выбора рациональных схем базирования заготовок при обработке и контроле готовых деталей, разработки технологических процессов механической обработки, расчета припусков, расчета и проектирования технологической оснастки. Будущие специалисты должны иметь практические навыки выполнения технологических расчетов и обоснования принятых технологических решений[2].

Достижения и идеи ученых, преподавателей и студентов кафедры находят свое практическое применение в различных областях машиностроения, а также отражаются в учебных планах специальности "Технологии машиностроения", в содержании основных учебных дисциплин подготовки специалистов - выпускников кафедры. Научная школа кафедры «Технологии машиностроения» никогда не исчерпает свои ресурсы и будет актуальна до тех пор, пока существует производство.

Список литературы

1. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
2. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана: [Электронный ресурс]. 1999-2013. URL: <http://www.bmstu.ru>. (Дата обращения: 01.12.2013).
3. Колесников А.Г. Научно-учебный комплекс «Машиностроительные технологии»: [Электронный ресурс] // 2005-2013. URL: <http://mt.bmstu.ru/>. (Дата обращения: 01.12.2013).
4. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Научные школы университета: [Электронный ресурс] // 1999-2013. URL: http://www.bmstu.ru:8090/mstu/nauchrab/science_history/. (Дата обращения: 01.12.2013).
5. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Становление и развитие научной школы кафедры: [Электронный ресурс] // 1999-2013. URL: <http://www.bmstu.ru/~mt3/science.html/>. (Дата обращения: 01.12.2013).

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

Кудрявцев Николай Владимирович — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: eksnikolay@mail.com.

Гольцов Илья Сергеевич — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ygamuz@mail.ru

ТОЧНОСТЬ ОПЕРАЦИИ ЗАКРЫТОЙ ШТАМПОВКИ, ВЫПОЛНЯЕМОЙ НА ВИНТОВОМ ПРЕССЕ

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

При выполнении операции закрытой штамповки одним из параметров точности, который зависит от характеристик оборудования, является высота штампуемой поковки, так как диаметральные размеры зависят лишь от точности оснастки (штампа). Поэтому возникает необходимость в определении ожидаемой погрешности высотных размеров поковок, штампуемых на конкретном типе пресса. Операция закрытой штамповки может выполняться на кривошипных, гидравлических и винтовых прессах. Точность закрытой штамповки на кривошипных и гидравлических прессах достаточно полно исследована [1]. Практически отсутствуют работы, в которых исследовалась точность этой операции, выполняемой на винтовом прессе.

Ожидаемую погрешность высотных размеров можно определить расчетно-аналитическим методом, используя основные положения теории параметрической чувствительности [2].

Согласно этой теории погрешность, вызванную влиянием первичного фактора (исходной погрешностью), можно представить в виде:

$$\delta x_{1_i} = K_i \cdot \delta x_i,$$

где K_i – коэффициент преобразования (коэффициент чувствительности) исходной относительной погрешности δx_i в относительную погрешность исследуемого параметра δx_{1_i} .

Определив значения K_i , можно выявить влияние исходных погрешностей на точность выходного параметра.

В общем виде были получены зависимости для определения коэффициентов чувствительности для операций, выполняемых на винтовом прессе при условии сохранения всего объема поковки в полости штампа, к которому относится операция закрытой штамповки:

$$K_i = \frac{C \frac{\partial A}{\partial x_i} + P \frac{\partial P}{\partial x_i}}{\left(C \frac{\partial A}{\partial x_2} + P \frac{\partial P}{\partial x_2} \right) \cdot \frac{\partial V}{\partial x_1} \cdot \frac{1}{\frac{\partial V}{\partial x_2}} - \left(C \frac{\partial A}{\partial x_1} + P \frac{\partial P}{\partial x_1} \right)} \cdot \frac{x_i}{x_1}, \quad (1)$$

$$K_V = \frac{\left(C \frac{\partial A}{\partial x_2} + P \frac{\partial P}{\partial x_2} \right) \cdot \frac{1}{\frac{\partial V}{\partial x_2}}}{\left(C \frac{\partial A}{\partial x_2} + P \frac{\partial P}{\partial x_2} \right) \cdot \frac{\partial V}{\partial x_1} \cdot \frac{1}{\frac{\partial V}{\partial x_2}} - \left(C \frac{\partial A}{\partial x_1} + P \frac{\partial P}{\partial x_1} \right) \cdot \frac{V}{x_1}}, \quad (2)$$

где K_i и K_V – коэффициенты преобразования погрешности параметра x_i и погрешности объема в погрешность высоты поковки соответственно; C – жесткость системы пресс-штамп; P – номинальная сила сопротивления поковки деформированию; x_1 – высотный размер поковки; x_2 – размер поковки, связанный с размером x_1 условием постоянства объема; x_i – параметр поковки, влияющий на точность поковки.

Работу пластического деформирования поковки можно представить как:

$$A = \int_h^{h_0} P(r, d) dh, \quad (3)$$

где $P(r, d)$ – сила сопротивления поковки деформированию, как функция параметров r и d ; h_0 и h – высота исходной заготовки, и высота поковки в конечный момент деформирования соответственно.

Сила сопротивления поковки деформированию [3]:

$$P = \sigma_s \frac{\pi d^2}{4} \left[1,5 \ln \frac{d}{2r} - 0,5 \left(1 - \frac{2r}{d} \right) \right], \quad (4)$$

где σ_s – напряжение текучести материала поковки с учетом его упрочнения,

d – диаметр поковки, r – радиус на кромках поковки.

Условие постоянства объема исходной заготовки может быть представлено в виде:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h - r^2 \cdot \pi d = const. \quad (5)$$

Вычислив частные производные (3), (4), (5) и подставив их в (1) и (2) получим формулы для определения коэффициентов преобразования погрешностей $\delta\sigma_s$ и δV в относительную погрешность высоты поковки δh :

$$K_{\sigma} = \frac{1,5 \ln \frac{d}{2r} - 0,5 \cdot \left(1 - \frac{2r}{d}\right)}{h \left(2 - 1,5 \frac{d}{r}\right) \cdot \frac{1}{-8r}}, \quad (6)$$

$$K_V = 1 - \frac{4r^2}{d \cdot h}. \quad (7)$$

Из анализа полученных формул видно, что величина коэффициентов преобразования, а значит и степень влияния исходных погрешностей на высоту поковки зависит только от геометрических параметров поковки. Причем, если диаметр (d) и высота (h) являются заданными параметрами, то величину радиуса (r) на кромках поковки, можно задавать разной, и она будет определять жесткость поковки. С уменьшением радиуса жесткость поковки увеличивается [1].

Для поковок $d = 30$ мм и $h = 12$ мм с различными радиусами на кромках по формулам (6) и (7) были выполнены расчеты. Результаты расчетов в виде графиков представлены на рис. 1, показывающих зависимость коэффициентов преобразования от жесткости поковки, определяемой величиной радиуса.

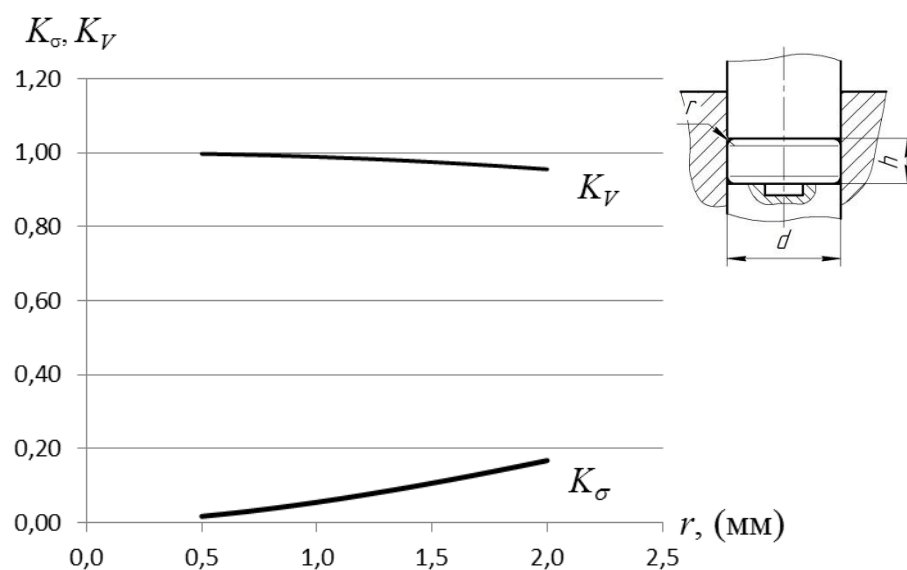


Рис. 1

Из анализа полученных графиков следует вывод, что с уменьшением жесткости поковок (увеличением радиуса на кромках) влияние погрешности $\delta\sigma_s$ на точность высоты поковки увеличивается, а погрешности δV — уменьшается. Также видно, что погрешность объема исходных заготовок оказывает доминирующее влияние на точность высоты поковки. Рассеяние

механических свойств материала поковки ($\delta\sigma_s$) при малых величинах радиуса ($r \leq 0,5\text{ мм}$) практически не влияет на точность.

Список литературы

1. Антонюк Ф.И. Анализ и обеспечение высокой точности холодной объемной штамповки на прессах научно обоснованным выбором жесткости элементов технологической системы. Диссертация д-ра технических наук. М. – 2004. – 450с.

2. Кофанов Ю.Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств: Учебник для вузов. – М: Радио и связь, 1991. –360 с.

3. Атрошенко А.П., Федоров В.И. Металлосберегающие технологии кузнечно-штамповочного производства. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 279 с.: ил.

Вяткин А.Г. — доцент, к.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: and-vyatkin@mail.ru.

Вяткин А.А. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: a-vyatkin@inbox.ru.

Ф.И. Антонюк

УДЕЛЬНЫЕ СИЛЫ ХОЛОДНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ВТУЛОК С ФЛАНЦАМИ

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

При проектировании технологических процессов холодной объемной штамповки особенно важное значение приобретает знание о величине удельных деформирующих сил, так как этот показатель является главным ограничением области применения холодной объемной штамповки.

Известно, что экономически целесообразная стойкость штампов обеспечивается, если величина удельных деформирующих сил не превышает 2000...2500 МПа. Для расчетов указанного параметра применяют различные теоретические методы прикладной теории пластичности. Среди таких методов особое место занимает метод верхней оценки (МВО), так как он достаточно универсален по широте диапазона решаемых задач и по сравнению с другими методами характеризуется существенно меньшей трудоемкостью. В частности, задачи по определению нагрузок можно решать не только аналитически, но и графическим способом. Он более «нагляден», так как инженеру легче представить, каким должно быть кинематически возможное поле скоростей, чем поле напряжений. Опыт показывает, что даже сравнительно простое поле скоростей позволяет найти верхнюю оценку для нагрузки, которая не более чем на 15% превышает результат точного решения [1]. Под последним понимают решение, удовлетворяющее полной системе уравнений не только для скоростей, но и для напряжений.

В выполненной работе для определения удельных деформирующих сил холодного выдавливания втулок с фланцами применена разновидность МВО – метод единичных деформируемых областей, называемый также методом ячейковой оптимизации. Его сущность заключается в том, что очаг пластической деформации (ОПД) делят на несколько прямоугольных единичных областей – элементов с условно фиксированными размерами. Затем единичные области объединяют условием несжимаемости [2].

Для таких областей верхние оценки известны и соответствуют деформации прямоугольной полосы при осадке (стесненной или свободной). При объединении единичных областей указанные верхние оценки приводят к активной поверхности, передающей удельную нагрузку с единой скоростью. Для определения нефиксированных размеров (ОПД) верхнюю оценку удельных сил минимизируют.

На рис.1 показано кинематически возможное поле скоростей, состоящее из двух прямоугольников, деформируемых стесненной (односторонней) осадкой.

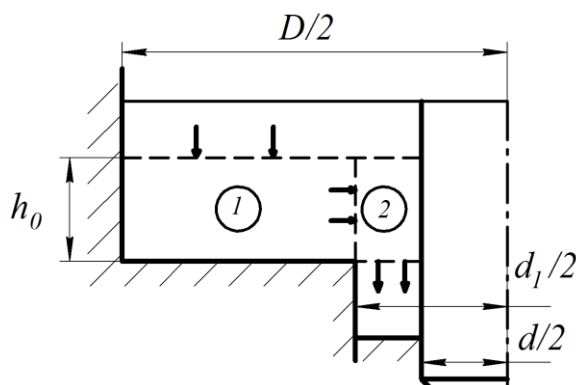


Рис.1

Используя известное тривиальное решение для указанного случая, получена следующая зависимость для определения величины удельных сил на стационарной стадии, когда высота фланца больше очага пластической деформации:

$$\frac{p}{\sigma_s} = \left[2 + (2 \cdot \mu + 1) \left(\frac{(D - d_1)}{8 \cdot h_0} + \frac{h_0}{2 \cdot (d_1 - d)} \right) \right] \cdot \left(\frac{D - d_1}{D - d} \right) + \frac{h_0 \cdot \mu}{D - d}, \quad (1)$$

где σ_s – напряжение текучести упрочняемого материала поковки с учетом интенсивности деформации;

μ – коэффициент контактного трения на рабочих поверхностях штампа;

h_0 – высота очага пластической деформации.

Высоту ОПД на стационарной стадии определим из условия минимума удельной силы, т.е. $\frac{\partial q}{\partial h} = 0$.

В результате получим:

$$h_0 = \frac{D - d_1}{2} \cdot \sqrt{\frac{(d_1 - d) \cdot (2\mu + 1)}{(D - d_1) \cdot (2\mu + 1) + 2\mu \cdot (d_1 - d)}}. \quad (2)$$

С учетом изменившихся условий трения на верхней торцевой поверхности фланца величина удельных деформирующих сил на стационарной стадии, когда высота фланца меньше h_0 , определится по формуле:

$$\frac{p}{\sigma_S} = \left(2 + \frac{\mu \cdot (D - d_1)}{2 \cdot h_0} + \frac{(2\mu + 1) \cdot h_0}{2 \cdot (d_1 - d)} \right) \cdot \left(\frac{D - d_1}{D - d} \right) + \frac{h_0 \cdot \mu}{D - d}, \quad (3)$$

Список литературы

1. *Степанский Л.Г.* Расчеты процессов обработки металлов давлением.— М.: Машиностроение, 1979г.
2. Теория пластических деформаций металлов. Под ред. Е.П. Ункова, А.Г. Овчинникова.— М.: Машиностроение, 1983г.

Антонюк Ф.И. — профессор, доктор технических наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: logutenkovae@mail.ru.

СЕКЦИЯ 2.

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Д.А. Ткачев, К.Ю. Труханов, Г.П. Пантюхов

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СВАРКИ КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ

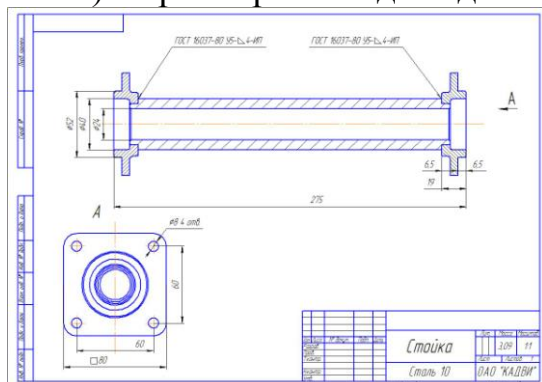
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

В современном сварочном производстве большую роль играет относительный объем автоматизации процессов. Высокая степень автоматизации производства позволяет снижать временные и материальные затраты, повышает производительность и культуру труда на предприятии, обеспечивает высокое качество получаемой продукции. Сочетание данных эффектов от внедрения автоматических линий и установок позволяет получить предприятию конкурентное преимущество перед другими производителями.

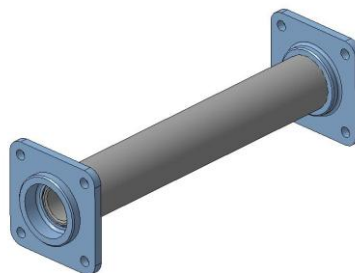
Автоматизацию сварочного производства можно осуществлять в различных масштабах. Это могут быть простые задачи: изменение силы сварочного тока сварки или автоматическое перемещение сварочной головки по заданной траектории. Решаются также и более сложные задачи, например, полная автоматизация процесса получения сварного соединения детали, включающая в себя движение сварочной головки вдоль линии шва с непрерывным контролем и регулировкой ее смещения, автоматическое регулирование параметров сварочной дуги.

В основе автоматизации производства лежит применение программируемых контроллеров и различных датчиков. Датчик преобразует контролируемую величину в удобный для измерения, передачи и преобразования сигнал. Сигнал поступает на вход контроллера, где с помощью специальных логических схем и команд принимается решение о воздействии на управляемую систему.

Рассмотрим возможную схему автоматизации получения кольцевых швов при соединении деталей, выполненных из труб небольшого диаметра, между собой или приварка их к фланцам. Примером подобной конструкции является корпус трансмиссии. На рисунке 1 приведен общий вид (рис. 1а) и трехмерная модель данного узла (рис. 1б).



а)



б)

Рис. 1

В качестве блока управления предлагается использовать программируемый контроллер Siemens LOGO! 12/24RC. На рисунке 2 представлена схема установки для автоматической сварки в защитных газах плавящимся электродом деталей вращения.

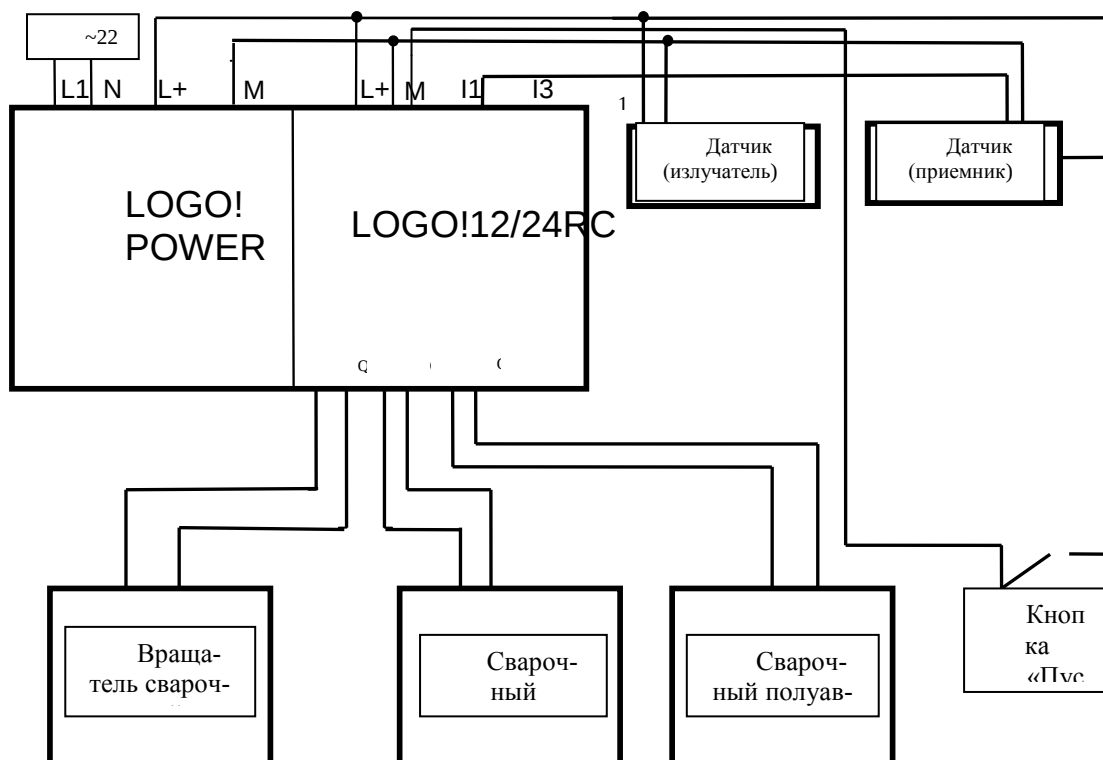


Рис. 2

Оптоэлектронный датчик фирмы BALLUFF фиксирует прохождение технологических отверстия расположенных на фланце вращателя.

Планируется, что применение вышеописанной автоматизированной установки позволит заменить четыре поста ручной аргонодуговой сварки, повысит качество и стабильность прочностных свойств получаемой продукции и приведет к снижению себестоимости изготавливаемого узла. Таким образом, применение автоматизированных и автоматических установок в области сварочного производства является одним из перспективных направлений развития сварочной отрасли.

Ткачев Дмитрий Анатольевич — ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tkachoff88@mail.ru.

Труханов Константин Юрьевич — ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: konstantin.truhanov@yandex.ru.

Пантюхов Геннадий Петрович — заместитель директора по информатизации КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: pgp@bmstu-kaluga.ru.

Д.А. Ткачев, Н.Н. Максимов

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА СВАРКИ НА НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

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

В процессе получения соединений в листовых конструкциях методами сварки, большое значение имеет уровень текущих напряжений, который может влиять на деформационную способность конструкции, точность конечных размеров, работоспособность сварного соединения.

Основными причинами возникновения собственных напряжений в сварных соединениях и конструкциях являются: неравномерное распределение температур в металле при сварке, литейная усадка, структурные и фазовые превращения в затвердевающем металле при его охлаждении.

Процессы сварки плавлением характеризуются местным нагревом металла с образованием неравномерного температурного поля в сварном соединении. При наличии непрерывной связи между нагретыми и холодными участками металла свариваемой детали в нем возникают сжимающие и растягивающие внутренние напряжения.

Предотвращение возникновения сварочных напряжений и деформаций является сложной задачей. Мероприятия по снижению их могут осуществляться на разных стадиях создания сварных конструкций: до сварки – на стадии проектирования самой конструкции и разработки технологического процесса ее изготовления, во время выполнения сварки конструкций и после выполнения сварочных работ.

На первой стадии очень много в этом вопросе зависит от выбора наиболее рациональных конструктивных и технологических решений. Одним из вариантов снижения уровня внутренних напряжений в конструкции является снижение тепловложения при сварке за счет уменьшения сечений сварных швов, их количества, рационального распределения швов по поверхности детали.

В качестве объекта исследования был выбран участок сварного стыка прерывистого шва в плоской листовой конструкции. Целью данных исследований является установление зависимости величины внутренних напряжений в листовой конструкции от продолжительности процесса и параметров режима сварки.

В качестве рассматриваемых параметров были выбраны продолжительность процесса сварки (при постоянной скорости) для двух различных режимов сварки.

Для исследования напряженно-деформированного состояния металла при сварке тонких листов была создана модель нестационарного нагрева и охлаждения. В качестве источника теплоты используется двойной эллипсоид постоянной мощности, передвигающийся прямолинейно с постоянной скоростью вдоль сварного стыка. Сварная конструкция представлена в виде двух пластин размером $350 \times 50 \times 3$ мм из стали 17ГС, шаг сетки разбиения геометрической модели принимается равным 2 мм. Определение внутренних напряжений в модели происходит в момент времени, соответствующих окончанию нагрева пластин сварочным источником тепла. Пример температурного поля от источника тепла мощностью $q = 1000 \text{ Вт}$, скоростью $V = 10 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$ по окончании процесса сварки представлен на рисунке 1.

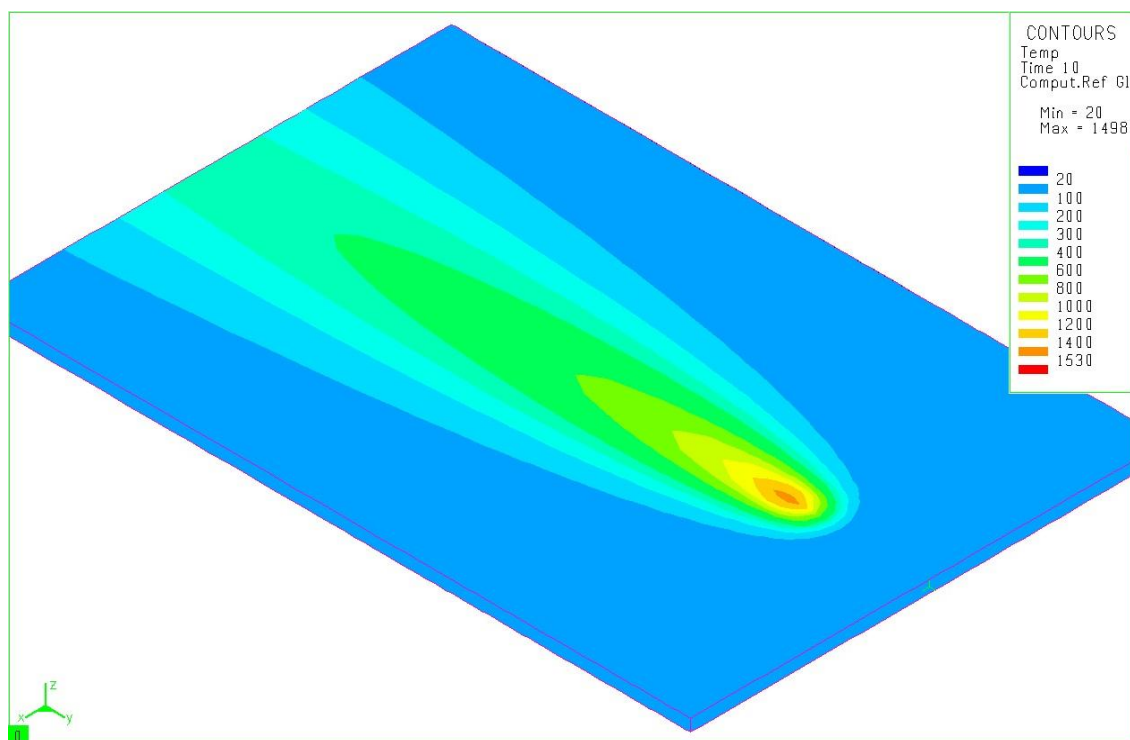


Рис. 1

Для уменьшения влияния посторонних факторов на картину распределения внутренних напряжений закрепление образца не производится. При построении моделей использовались свойства стали, зависящие от температуры. В таблице 1 представлены зависимости основных физико-

механических свойств для стали 17ГС в зависимости от температуры металла.

Таблица 1

Физико-механические свойства стали 17ГС в зависимости
от температуры

$T, ^\circ C$	$\lambda, \text{Вт/м} \cdot ^\circ C$	$C, 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot ^\circ C$	$\alpha, 10^{-6} 1/^\circ C$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_B, \text{МПа}$
20	42,9	0,468	11,5	360	510
100	41,5	0,486	11,9	346	500
200	41,5	0,502	12,5	321	455
300	39,4	0,519	13,1	301	427
400	39,0	0,536	13,6	276	370
500	36,3	0,548	14,0	227	308
600	34,9	0,586	14,4	180	241
700	33,7	0,645	14,7	88	103
800	32,6	0,695	15,0	51	62
900	31,5	0,687	15,2	37	41
1000	29,7	0,674	15,2	24	26
1100	28,9	0,687	15,2	16	17

В качестве результатов моделирования были получены картины распределения временных напряжений в образце, а также их максимальные значения. Пример распределения внутренних напряжений вдоль оси ОХ во время сварки, в момент времени $t = 20\text{с}$ представлен на рисунке 2, вдоль оси ОУ - на рисунке 3.

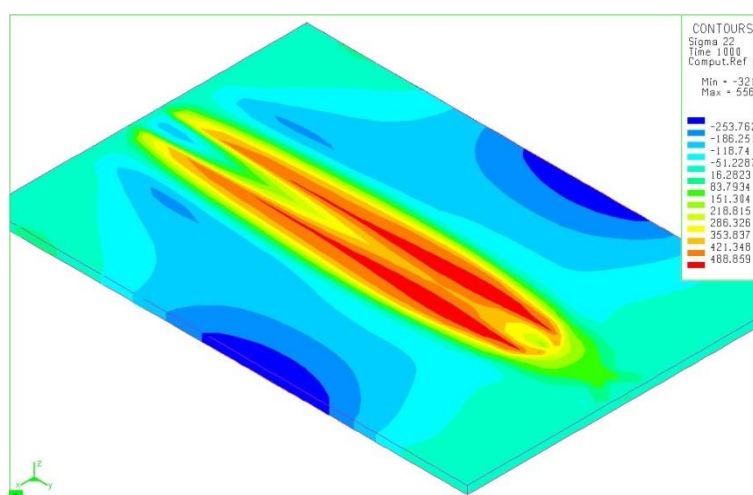


Рис. 2

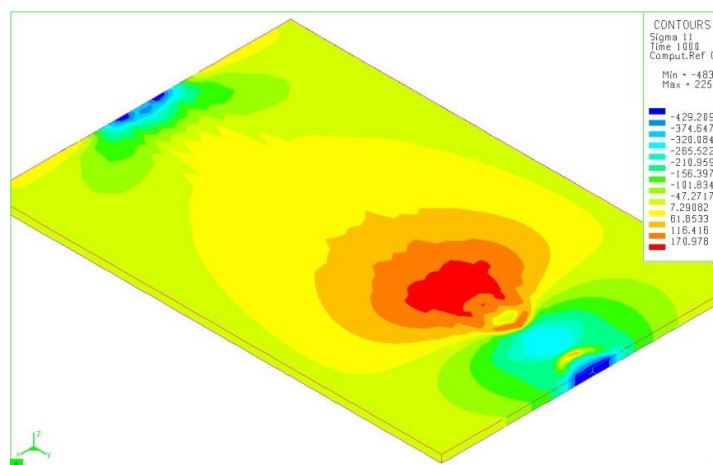


Рис. 3

В качестве оцениваемой величины были взяты максимальные остаточные напряжения (σ_x и σ_y), возникающие в моделируемом образце. Результаты моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2

Максимальные внутренние напряжения для различных режимов при переменном времени сварки

№	t, c	Режим 1 ($q = 3000 \text{ Вт}$, $V = 10 \text{ мм/с}$)			Режим 1 ($q = 5200 \text{ Вт}$, $V = 15 \text{ мм/с}$)		
		σ_x , МПа	σ_y , МПа	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$, МПа	σ_x , МПа	σ_y , МПа	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$, МПа
1	2	123	51	133	96	44	106
2	5	140	57	151	114	49	124
3	10	162	62	173	127	53	138
4	15	181	66	193	136	55	147
5	20	183	67	195	138	56	149

Основываясь на результатах, полученных при моделировании процесса сварки тонких пластин можно сделать следующие выводы. Характер распределения и величина внутренних напряжений при моделировании укладывается в рамки существующей теории, следовательно, можно судить о достоверности представленной модели. Продолжительность процесса сварки непосредственно влияет на величину и характер распределения напряжений в образце. Очевидно, что с ростом продолжительности процесса сварки происходит увеличение уровня внутренних напряжений. Также можно заметить, что при переходе на «форсированный» режим, обеспечивающий полное проплавление деталей, более высокий и равномерный нагрев, происходит снижение внутренних напряжений.

Ткачев Дмитрий Анатольевич — ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tkachoff88@mail.ru.

Максимов Николай Николаевич — доцент, к.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2-kf@bmstu-kaluga.ru.

Г.В. Орлик, К.А. Чечеткин

НАНЕСЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА НИЗКОУГЛЕРОДИСТУЮ СТАЛЬ

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

Как известно, основные проблемы получения бронзового высококачественного покрытия на низкоуглеродистой стали связаны с образованием в процессе наплавки различных микро – дефектов и, в первую очередь, трещин на границе «сталь-бронза». Указанные дефекты существенно снижают общую работоспособность антифрикционного покрытия.

При наплавке бронзы на сталь в зоне сплавления и в наплавленном металле вследствие окисления элементов сплава, например алюминия, наблюдается образование оксидных включений, способствующих зарождению газовых пор.

Результатом газового анализа установлено содержание кислорода, водорода и азота в наплавленном и исходном состоянии для бронзы Бр АМц 9-2 (Таб.1).

Таблица 1.

Объект исследования	[O],%	[N],%	[H],%
Проволока БрАМц9-2	0,0245	0,0061	0,00123
Наплавленный металл проволокой БрАМц9-2	0,0127	0,0121	0,00100

На концентрацию кислорода в наплавленном металле влияет наличие в свободном состоянии алюминия, являющегося эффективным раскислителем. Поэтому содержание кислорода в наплавленном металле меньше, чем в исходном.

При дуговом процессе наплавки интенсивное поглощение азота осуществляется жидким металлом сварочной ванны и зависит от времени пребывания расплава в жидком состоянии, а так же от степени чистоты используемого защитного газа.

Источником водорода, отрицательно влияющим на качество наплавленного слоя является повышенная влажность защитного газа и его повышенное содержание в присадочной проволоке. В этом случае причиной

пористости становится абсорбация водорода. При увеличении степени легирования и повышенном содержании связующих веществ, вероятность порообразования снижается.

При воздействии легирующих элементов бронзы с кислородом в сварочной ванне появляются оксиды, которые могут быть инициаторами трещин.

Легирование алюминиевых бронз такими металлами, как Mn, Fe и Ni, существенно уменьшают их склонность к газонасыщению при высокотемпературном нагреве и вероятность образования оксидных включений. Следует учитывать, что содержание железистых составляющих в наплавленном металле определяет распределение микротвердости по высоте наплавленного слоя.

За счет быстротечности процесса нанесения плакирующего слоя окислы полностью не удаляются из него. Использование комбинированных дуговых способов нанесения покрытий позволяет снизить тепловложение в основной металл, что способствует уменьшению глубины проплавления последнего. Глубина проникновения зависит не только от исходных характеристик наплавляемого и основного металла, но и от возникающих в наплавленном металле и в зоне сплавления в процессе наплавки концентраторов напряжения. В виде включений, диффузионных и кристаллизационных прослоек, и дефектов металлургического происхождения.

Учитывая значительную зависимость конечного состава наплавленного металла при дуговой наплавке от процессов окисления, происходящих в дуге и сварочной ванне, а так же от полноты перемешивания расплавленных составляющих присадочной проволоки, необходимо обратить особое внимание на выбор параметров режима наплавки.

Один из основных факторов, обуславливающих сложность наплавки бронзовых сплавов - высокая склонность к трещинообразованию.

Образование трещин зависит от технологии ведения процесса наплавки, параметров режима наплавки, состава присадочной проволоки и класса стали. Стойкость бронз против образования горячих (кристаллизационных) трещин, при прочих равных условиях, зависит от эффективного интервала кристаллизации. Чем уже этот интервал, тем стойкость к образованию горячих трещин выше, что соответствует общим представлениям о склонности металлов и сплавов к образованию горячих трещин. Установлено, что алюминиевые бронзы имеют интервал кристаллизации от 20 до 30 °С, медно - никелевые – от 65 до 70 °С, оловянные бронзы около 150 °С.

Возникновение кристаллизационных трещин в процессе наплавки бронзы на сталь, в определенной степени связано с пребыванием критического содержания железа в шве, что отрицательно сказывается на характе-

ре кристаллизации сплава, из-за превышения критической величины растягивающих напряжений.

Помимо зоны сплавления в сечении наплавленного шва можно выделить следующие зоны: зона сплавления, зона термического влияния стали, околошовная зона и зона термического влияния бронзы. Наиболее критичной с точки зрения образования трещин является зона термического влияния стали. Протяженность зона термического влияния стали зависит от исходного состояния стали и составляет 1,4 – 2,1 мм. В данной зоне можно выделить участки характеризующиеся свойственной им микроструктурой и размером зерна. К ним относятся: участок оплавления зёрен, участок с признаками перегрева, участок неполной перекристаллизации и т.д. Чем выше температура нагрева и скорость охлаждения металла зоны термического влияния соединения, тем значительнее изменение его структуры и, соответственно механических свойств. Металл зоны, прилегающей к наплавленному шву, после процесса наплавки характеризуется низкими пластичностью ($\delta = 2 - 4 \%$) и ударной вязкостью ($a_n = 150 \text{ кДж/м}^2$).

При наплавке на границе зоны сплавления в стали имеются искажения кристаллической решётки, характеризующиеся накоплением избыточной свободной энергии по границам зёрен стали в местах наибольших искажений. Это приводит к увеличению скорости диффузии атомов бронзы. Под действием диффузии происходит сдвиг кристаллов железа и заполнение освободившегося объёма бронзой, с частичным растворением в себе кристаллов железа. По мере снижения температуры расплава в процессе кристаллизации под действием упругих напряжений сжатия кристаллы железа уменьшаются в размерах, что приводит к увеличению объёма проникновения бронзы в сталь.

Увеличение содержания углерода приводит к проникновению меди в поверхностные слои стали. Диффузия углерода из растворенного медью слоя стали вызывает неоднородность углерода в зоне сплавления. Степень неоднородности распределения углерода зависит от его исходного содержания в стали, времени контакта с жидкой бронзой, а так же от параметров режима наплавки.

Зона термического влияния бронзы обычно имеет крупнозернистую структуру с постепенным уменьшением зерна по мере приближения к зоне сплавления. Ширина зоны для сплавов составляет 2,2...4,1 мм. Содержание железа на границе сплавления максимально (0,4...0,8%) ,а по мере удаления от зоны сплавления падает до нуля.

Наряду с образованием трещин в зоне термического влияния, в зависимости от способа наплавки бронзы повышается склонность к образованию холодных трещин в околошовной зоне стали. Такие трещины образуются в твёрдом состоянии на расстоянии 0,5...5 мм от границы сплавления.

ния. Установлено, что их образование зависит от пластических свойств при повышенных температурах. Различная склонность бронз к образованию трещин в околошовной зоне определяется различным уровнем пластических свойств при повышенных температурах. Для различных сплавов величина температурного интервала 250 – 700⁰С. В данном интервале наблюдается резкий провал пластичности. Минимальным уровнем пластических свойств обладают медноникелевоалюминиевые сплавы и оловянные бронзы, максимальным марганцево-алюминиевые бронзы. Повысить характеристики пластичности при температуре выше 300⁰С позволяет добавление микролигирующих добавок. Наиболее эффективна комплексная добавка (бора 0,5 % и ванадия 0,5 %). Введение этих компонентов позволяет повысить величину относительного удлинения бронзы в интервале провала пластичности до 20%. А именно, чем ниже уровень пластических свойств, тем больше склонен сплав к образованию трещин в твердом состоянии. Минимальная величина относительного удлинения в температурном интервале провала прочности бронз $\delta_{\min}$ может служить количественной характеристикой склонности к образованию трещин в твердом состоянии. Предлагается следующая оценка свариваемости медных сплавов в зависимости от уровня $\delta_{\min}$: хорошо свариваемые сплавы - $\delta_{\min} \geq 20$ %, удовлетворительно – от 6 до 20%, ограничено – от 2 до 5,9%, плохо или не свариваемые - менее 2%.

Хорошо наплавляемые сплавы не требуют применения специальных технологических приемов. При нанесении удовлетворительно наплавляемых сплавов желательно не создавать большой сварочной ванны и отслеживать температуру подогрева образца в процессе наплавки. Наплавку ограниченно наплавляемых сплавов рекомендуется производить на минимальной погонной энергии с охлаждением металла соединения после выполнения каждого прохода.

Полная оценка наплавки бронзы должна производиться с учетом ее стойкости к образованию, как кристаллизационных трещин, так и трещин в твердом состоянии.

Орлик Геннадий Владимирович — доцент, к.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstu-kaluga.ru.

Чечеткин Кирилл Андреевич — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstu-kaluga.ru.

А.В. Вовченко, К.Ю. Труханов, А.В. Царьков

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ СВАРОЧНЫХ ШВОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

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

В современном промышленном производстве большое внимание уделяется контролю качества. На заводах производителей автокомпонентов широко применяется сварка. Одним из способов проверки качества изготовления сварных деталей автомобилей является контроль геометрии сварочного шва. Для этого из детали с помощью абразивного инструмента вырезается образец и изготавливается макрошлиф. Далее с помощью микроскопа выполняется измерение контролируемых геометрических параметров шва, таких как глубина и ширина проплавления, усиление шва и ряд других параметров. Способ измерения, а так же норма оценки параметров зависит от толщины свариваемых деталей и вида соединения.

В условиях современного конвейерного производства контролю подвергается большое количество деталей. Поэтому автоматизация данного процесса позволит повысить производительность и качество на предприятии. Так как швы имеют различную геометрию, то четкая алгоритмизация процесса измерения их параметров затруднена. Таким образом, представляется возможным применение алгоритмов нечеткой логики для контроля геометрии сварных соединений.

Значительную часть проблем связанную с распознавания образов в настоящее время решают с помощью применения нейронных сетей. Можно провести следующую классификацию нейронных сетей:

- по характеру обучения: с учителем и без учителя;
- по алгоритму настройки весов: фиксированная и динамическая;
- по типу выходной информации: аналоговая и двоичная;
- по типу модели нейронной сети: сеть прямого распространения, рекуррентные нейронные сети, радиально-базисные функции и самоорганизующиеся карты.

Плюсами нейронных сетей являются:

1. *Адаптируемость.* Нейронная сеть может лучше всего адаптироваться под различные, часто нестандартные условия, что очень сложно реализуемо с помощью обычных программных алгоритмов;
2. *Распознавание.* Хорошо подготовленная нейронная сеть может распознавать объекты различного размера и сложности;

3. *Решение не стандартных задач.* Хорошо обученная нейронная сеть может решать совершенно нестандартные задачи, которые часто не по силам решить на обычном программном коде.

4. *Обучаемость.* Является естественным свойством нейронных сетей.

К недостаткам можно отнести:

1. *Сложная переобучаемость.* Если нейронная сеть уже обучилась чему то, то её будет сложно переучить обратно.

2. *Большое ресурса потребление.* Нейронные сети, реализованные на программном уровне, при их использование, потребляют значительную долю процессорной мощности, что при решении сложных задач говорит нам о предпочтительном использование физически реализованных нейронных сетях.

3. *Невозможное извлечение приобретенных знаний.* Практически невозможно извлечь приобретенные знания из бесконечно закрученных связей в нейронных сетях.

4. *Отсутствие формализованных алгоритмов настройки сети,* что заставляет привлекать высококлассных специалистов в связи с высокой сложностью структуры нейронной сети.

Важным этапом при разработке нейронной сети для распознавания образов по графическим изображениями является предварительная обработка этих изображений. На рисунке 1 приведено исходное изображение макрошлифа.

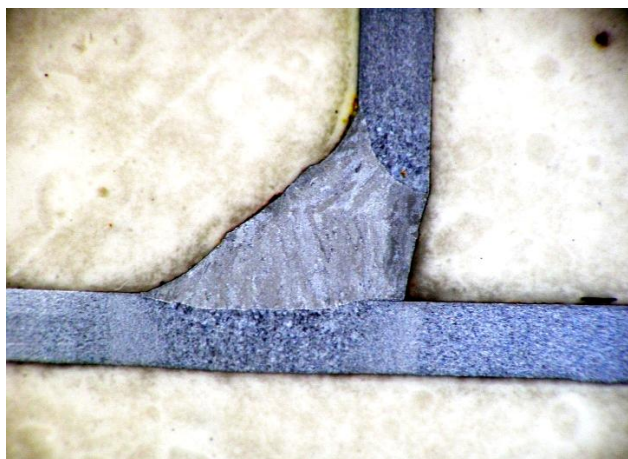


Рис. 1

На рисунке 2 приведены результаты обработки исходного изображения различными методами: метод Превитта (рис. 2а), бинаризация цвета и метод Кони (рис. 2б), метод Собеля (рис. 2в), метод Гаусса (рис. 2г). Обработанные изображения на рисунке 2 для наглядности приведены в инвер-

тированном виде.

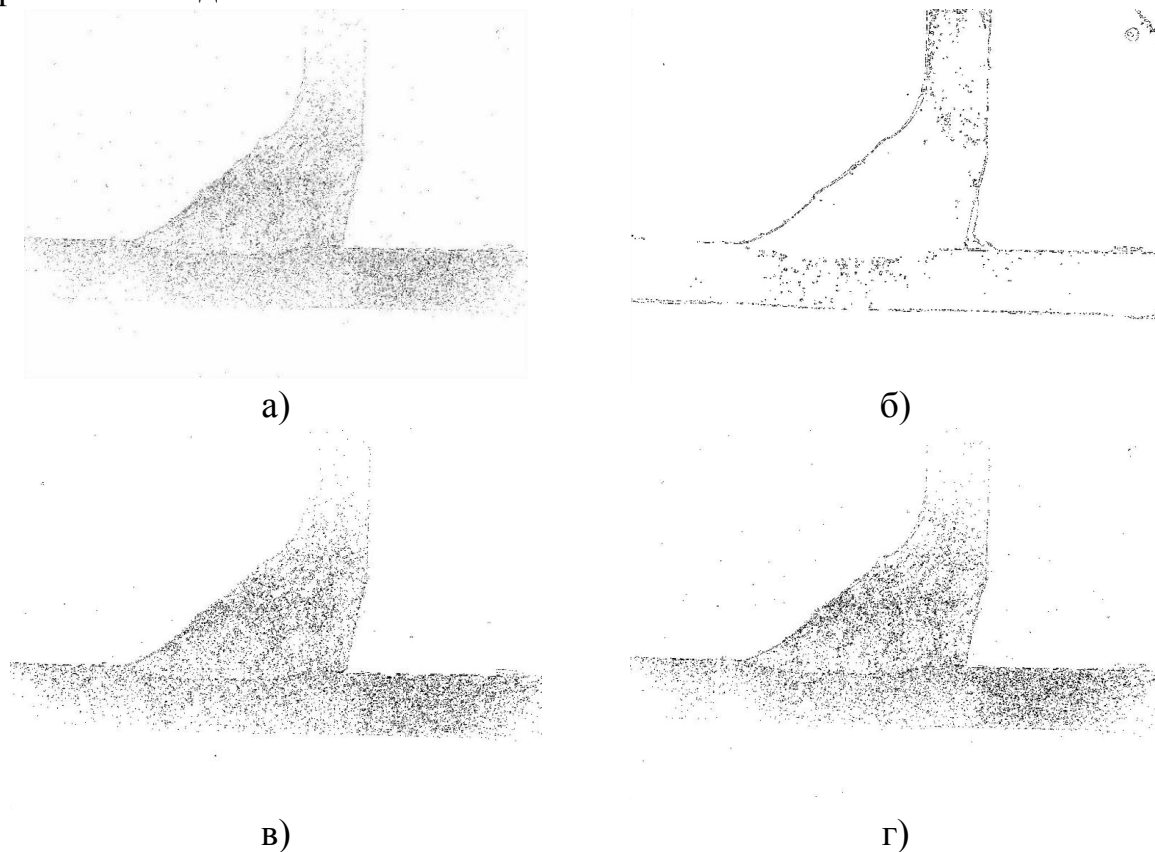


Рис. 2

Данные методы подготовки изображений достаточно хорошо выделяют геометрию шва. В дальнейшей работе планируется применить обработанные изображения для обучения нейронных сетей.

Вовченко Александр Владимирович — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: tkachoff88@mail.ru.

Труханов Константин Юрьевич — ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: konstantin.truhanov@yandex.ru.

Царьков Андрей Васильевич — заведующий кафедрой, доктор технических наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: pgp@bmstu-kaluga.ru.

СЕКЦИЯ 3.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

В.В. Кузнецов, Л.Н. Кечиев

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПОРОГА ОТКАЗА МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ

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

Предложена методика упрощённого расчёта порога отказа МОП-транзисторов при электростатическом разряде. Методика может применяться в тех случаях если схемотехническая модель транзистора недоступна. С применением данного метода расчёта была разработана программа ESD-MOSFET-calc.

Ключевые слова: МОП-транзистор, электростатический разряд, модель заряженного компонента

Чтобы выполнить схемотехническое моделирование НВМ и CDM ЭСР, методика которого описана в публикации [1], надо иметь в распоряжении Spice-модель МДП-транзистора. Spice-модели содержат множество трудноизмеримых параметров и часто недоступны. По данным обстоятельствам, актуальна разработка приближённых методик расчёта порога отказа МОП-транзисторов при ЭСР по параметрам транзисторов, которые можно получить в результате измерений с помощью аппаратуры измерения электрических параметров общего назначения.

Эквивалентную схему воздействия CDM ЭСР на МОП-транзистор, смонтированный на печатной плате, можно упрощённо представить как замыкание ёмкости печатной платы C_{pcb} на ёмкость затвор-исток C_{gs} МОП-транзистора.

На рис ёмкость печатной платы C_{pcb} заряжена до напряжения ЭСР U_{esd} . После замыкания ключа обе ёмкости становятся соединены параллельно и согласно закону сохранения заряда выполняется равенство:

$$Q = C_{pcb}U_{esd} = (C_{gs} + C_{pcb})U_{gs} \quad (1)$$

Если после ЭСР напряжение U_{gs} затвор-исток превысит напряжение U_{bd} пробоя подзатворного диэлектрика, то ЭСР с напряжением U_{esd} будет опасно для МОП-транзистора. Таким образом, формула для вычисления опасного напряжения ЭСР запишется в виде:

$$U_{esd} = \frac{C_{gs} + C_{pcb}}{C_{pcb}} U_{bd} \quad (2)$$

Ёмкость C_{pcb} печатной платы (ПП) можно приближённо вычислить без учёта краевых эффектов по формуле для ёмкости плоского конденсатора, зная площадь металлизации S и толщину ПП d . Диэлектрическую проницаемость стеклотекстолита можно приближённо положить равной $\varepsilon=5$.

$$C_{pcb} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \quad (3)$$

Для изготовленной тестовой печатной платы с площадью металлизации 6000 мм^2 в результате расчётов было получено значение ёмкости 177 пФ, а в результате измерений 190 пФ. Таким образом, можно использовать приближённую формулу для расчёта эквивалентной ёмкости системы печатных проводников. Достоинством данной методики расчёта ёмкости является то, что исходные данные известны уже на этапе разработки КД и не требуется проводить измерений.

Мы получили выражение для приближённого расчёта порога отказа МОП-транзистора при CDM ЭСР. Данное выражение не учитывает колебательный характер переходных процессов при ЭСР. С использованием данного выражения можно рассчитывать и порог отказа МОП-транзистора при НВМ ЭСР, подставив вместо ёмкости печатной платы эквивалентную ёмкость модели тела человека (около 150 пФ, например по данным [2]). Расчёт по данному выражению целесообразно использовать, если Spice-модель для МОП-транзистора не доступна. Для выполнения расчёта необходимо знать следующие параметры МОП-транзистора: ёмкость C_{gs} затвор-исток исследуемого транзистора (измеряется измерителем RCL-параметров любого типа) и напряжение пробоя подзатворного диэлектрика (предоставляется предприятием-изготовителем).

В результате экспериментальной проверки данного метода расчёта, найдено, что точность приближённого расчёта имеет порядок 5%. Такое расхождение будет иметь результат расчёта и тестирования. Так, например для транзистора IRF510 напряжение отказа при CDM ЭСР с печатной платой, рассчитанной по упрощённой методике составило 236 В, а найденное в результате моделирования составило 250 В. Напряжение отказа, определённое экспериментальным путём составило 250 В.

Такое расхождение является приемлемым для практических расчётов, с учётом того, что разброс пробивного напряжения подзатворного диэлектрика сам по себе достигает 5–10 по данным [3].

Для автоматизации расчётов порога отказа МОП-транзисторов по приближённой методике целесообразна разработка специализированного ПО. С данной целью была разработана программа ESD-MOSFET-calc.

Программа является кроссплатформенной и работает под управлением операционных систем Linux и Windows. Внешний вид окна программы показан на рис.

Для создания данной программы использована комплект библиотек для разработки кроссплатформенных приложений Qt4 и среда разработки QtCreator. Данное средство разработки относится к классу программного обеспечения с открытым исходным кодом и предназначена для разработки кроссплатформенных приложений любого уровня сложности на языке C++. Преимуществом Qt по сравнению с популярным в настоящее время языком C# является, то что приложение компилируется в машинные коды, а не интерпретируется в ходе исполнения, чем достигается повышение быстродействия.

Список литературы

1. Кузнецов В. В., Кечиев Л. Н. Исследование стойкости печатных узлов к воздействию электростатического разряда // Технологии ЭМС. — 2012. — № 1. — С. 29–38.
2. Кечиев Л. Н., Пожидаев Е. Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. — М.: ИД «Технологии», 2005. — 352 с.
3. International Rectifier. — ESD Testing of MOS Gated Power Transistors. Application Note AN-986.

Кузнецов В.В. — ассистент каф. ЭИУ1-КФ КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ra3xdh@gmail.com.

Кечиев Л.Н. — профессор МИЭМ НИУ ВШЭ, д.т.н. E-mail: kln1940@gmail.com.

V.V. Kusnetsov, L.N. Kechiev

THE MOSFETS ESD-FAILURE THRESHOLD CALCULATION METHOD

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 24800, Russia

The simplified ESD-failure threshold MOSFETs calculation method was developed. This method can be applied if SPICE-model of MOS-transistor is unavailable. Using this method program ESD-MOSFET-calc for IBM PC was developed.

Key words: *MOS-transistor, electrostatic discharge, charged device model*

Kusnetsov V.V., assistant of the Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: ra3xdh@gmail.com.

Kechiev L.N., professor, doctor. E-mail: kln1940@gmail.com.

И.В. Соловьев, А.А. Столяров

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ДОЗИМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МДП-СЕНСОРОВ РАДИАЦИИ

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

Транзисторы со структурой металл-диэлектрик-полупроводник обладают достаточно сильной чувствительностью к облучению и могут использоваться в качестве накопительных дозиметров ионизирующего излучения. Подобные сенсоры обладают небольшими массогабаритными показателями, низким энергопотреблением [1].

Под действием радиации в объёме диэлектрика и на границе раздела диэлектрик-полупроводник происходят процессы ионизации. Радиоактивная частица генерирует электронно-дырочные пары в объеме диэлектрика. Электроны из-за большей подвижности, чем дырки покидают диэлектрик через контакты. Дырки малоподвижны. Под действием внешнего электрического поля происходит процесс дрейфа дырок к затвору или подложке в зависимости от полярности приложенного напряжения. На границе с полупроводником локализованы ловушки, которые способны захватывать дырки. Данные ловушки образуются из-за внутренних структурных нарушений диэлектрика и границы раздела с полупроводником. При этом изменяется зарядовое состояние диэлектрика, приводящее к сдвигу порогового напряжения транзистора. При положительной полярности затвора в процессе облучения вблизи границы раздела полупроводник-диэлектрик накапливается положительный заряд, что связано с захватом положительно заряженных дырок на ловушках в диэлектрике. Данные изменения влияют на пороговое напряжение. Многие виды радиационного излучения вызывает процессы ионизации в диэлектрике с односторонней реакцией на облучение. Сдвиг порогового напряжения является информативным показателем, характеризующим поглощенную дозу ионизирующего излучения [2-6].

В разработанной установке используется точечный метод определения порогового напряжения. В нём при измерениях используется ток стока небольшой амплитуды, близкий к оси абсцисс на передаточной характеристике полевого транзистора. В общем идеальном случае ток стока может быть представлен следующими уравнениями [7]:

$$I_D = \begin{cases} 0 & \text{при } U_{GS} < U_{TH} \\ KU_{DS} \left(U_{GS} - U_{TH} - \frac{U_{DS}}{2} \right) & \text{при } U_{GS} \geq U_{TH}, 0 \leq U_{DS} < U_{GS} - U_{TH} \\ \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{TH})^2 & \text{при } U_{GS} \leq U_{TH}, U_{DS} \geq U_{GS} - U_{TH} \end{cases}$$

где I_D – ток стока; U_{GS} – напряжение исток-затвор; U_{TH} – пороговое напряжение; K – крутизна; U_{DS} – напряжение сток-исток.

К преимуществам точечного измерения порогового напряжения можно отнести относительную простоту схем измерения, обеспечивающих высокую скорость определения параметра.

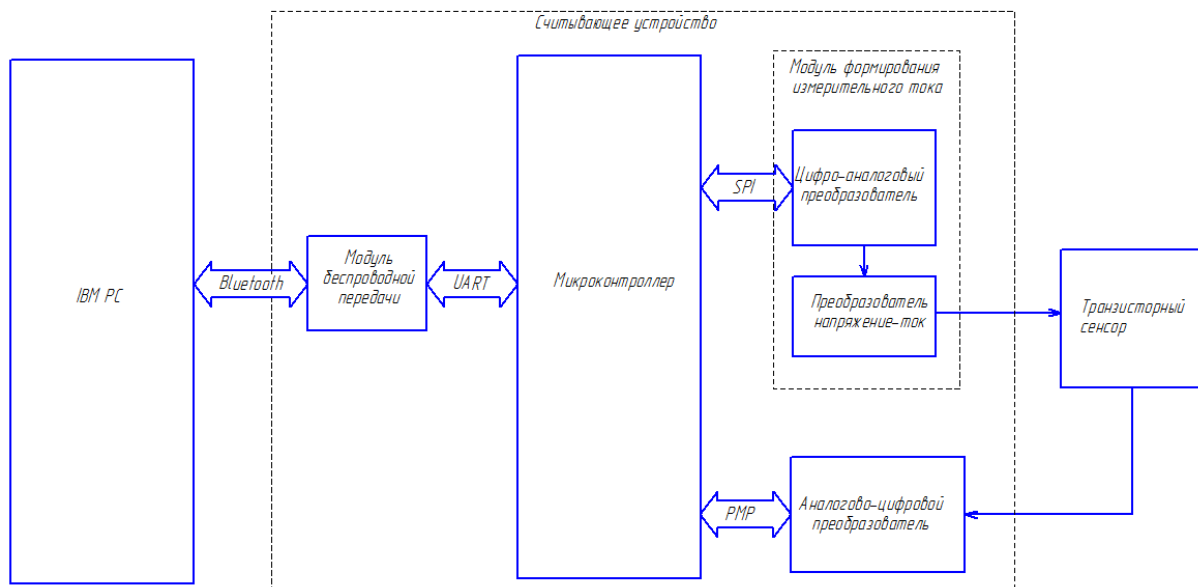


Рис. 1

Структурная схема установки приведена на рисунке 1. Транзистор, параметры которого необходимо измерить подключается к считывающему устройству. Считывающее устройство состоит из нескольких модулей. 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 источ-

нику 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.

Температурный коэффициент тока стока можно определить, используя зависимость [7]:

$$\frac{dI_D}{I_D \cdot dT} = \frac{dK}{K \cdot dT} - \frac{2}{U_{GS} - U_{TH}} \cdot \frac{dU_{TH}}{dT},$$

где I_D – ток стока; K – крутизна; U_{GS} – напряжение между истоком и затвором транзистора; U_{TH} – пороговое напряжение; T – температура.

Существует температурная компенсационная точка, в которой температурный коэффициент равен нулю. Разработанная установка позволяет получать переходные вольт-амперные характеристики конкретных МДП-транзисторов, с помощью которых возможно определить точку нулевого температурного коэффициента и настроить измерительную установку в соответствии с полученными результатами. Используя измерительный ток истока близкий к точке нулевого температурного коэффициента можно обеспечить температурную стабильность проводимых измерений. Созданный модуль формирования измерительного тока обеспечивает точность формируемого выходного параметра в $1 \pm 0,2$ мкА.

Связь измерительной установки с персональным компьютером осуществляется с помощью модуля беспроводной передачи. В нём используется Bluetooth приёмо-передатчик BCD110 с возможностью соединения в беспроводную сеть до 4 устройств.

Основные характеристики установки:

Управляющий микроконтроллер.....	PIC18F4550
Частота микроконтроллера, МГц.....	20
Интерфейс взаимодействия с ПК.....	RS232
Организация беспроводной сети.....	Bluetooth
Напряжение питания, В.....	9
Разрядность АЦП, бит.....	14

Разрядность ЦАП, бит.....	12
Диапазон выходных измерительных токов, мкА.....	0 – 250
Точность формирования измерительных токов, мкА.....	0,2
Точность определения порогового напряжения, мВ.....	1

На рисунке 2 приведена трёхмерная модель печатной платы установки.

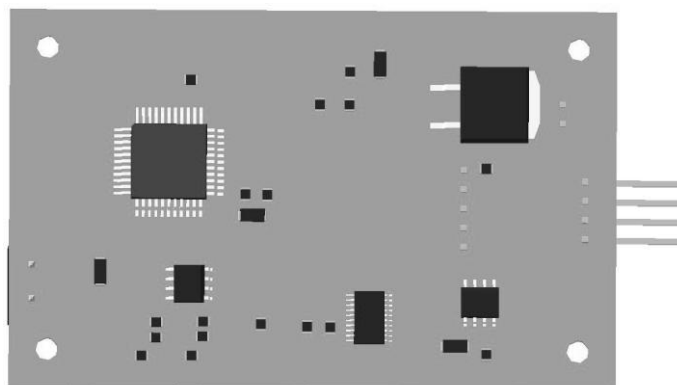


Рис. 2

Установка позволяет получать функциональные зависимости тока стока от напряжения, которые представляются в графическом виде. На рисунке 3 представлена передаточная вольт-амперная характеристика, полученная на установке для тестовых полевых транзисторов с каналом р-типа. Пунктиром показана ВАХ необлучённого сенсора, сплошной линией показана ВАХ сенсора, подвергнутого воздействию гамма-облучения. Поглощённая доза составила 1000 Рад.

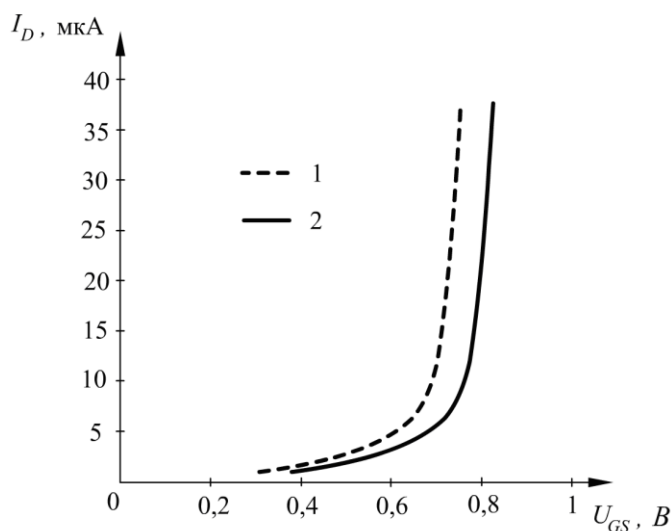


Рис. 3

Пересчёт сдвига порогового напряжения может осуществляться как с использованием калибровочных зависимостей, так и с использованием ма-

тематических моделей смещения порогового напряжения в зависимости от накопленной дозы, например модели Митчелла [8].

В результате проведённой работы создана установка измерения накопленной дозы радиационного излучения на основе транзисторных сенсоров со структурой металл-диэлектрик-полупроводник. Приведено описание метода определения измеряемого параметра. Изменение порогового напряжения подобных сенсоров с течением времени является параметром, косвенно отражающим поглощённую дозу радиационного облучения. Повышение точности измеряемого параметра достигается за счёт использования методов термостабилизации измерений, источников питания с высоким качеством выходного напряжения и разводкой печатной платы с соединением потребителей напрямую к питающему элементу и разделением аналоговой и цифровой заземляющих поверхностей. Установка может применяться в системах предъявляющих повышенные требования к массогабаритным параметрам приборов, таких как летательные аппараты.

Работа выполнена в рамках реализации проектов министерства образования и науки РФ, а также при финансовой поддержке РФФИ и администрации Калужской области (грант № 12-02-97533).

Список литературы

1. Перевертайло В. Л. Датчики интегральной поглощённой дозы ионизирующего излучения на основе МОП-транзисторов // Технология конструирования в электронной аппаратуре. — 2010. — №5. — С. 22–29.
2. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Лычагин А.А., Столяров А.А., Ульяненко С.Е. Радиационная ионизация в структурах металл-диэлектрик-полупроводник в режиме сильнополевой инжекции электронов// Физика и химия обработки материалов. — 2006. — № 6. — С. 19-23.
3. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Mihal'kov A.M., Stolyarov A.A., Solov'ev I.V. Improvement of Injection and Radiation Stability of Nanosize Dielectric Films of MOS Devices // Inorganic Materials: Applied Research. — 2011. — Vol. 2. — N. 5. — P. 425–427.
4. 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.
5. Holmes-Siedle A. The Space-Charge Dosimeter: general principles of a new method of radiation detection // Nucl. Inst. And Meth. — 1974. — Vol.121. P. 169–179.

6. Holmes-Siedle A., Adams L. Handbook of Radiation Effects. Oxford University Press. — 2002. — 644 p.

7. Тице У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М.: ДМК Пресс. — 2008. — 832с.

8. Mitchell J. P. Radiation-Induced Space-Charge Buildup in MOS Structures // IEEE Transactions on Electron Devices. — 1967. — No 11. — P. 764–774.

Соловьев Илья Викторович — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: solo1511@yandex.ru.

Столяров Александр Алексеевич — заместитель директора по научно-исследовательской работе, д. т. н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alalstol@mail.ru.

Г.В. Прасицкий, М.В. Инюхин

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО УРОВНЯ ПАРАМЕТРОВ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ТЕПЛООТВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ

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

Разработчики современной радиоэлектронной техники постоянно сталкиваются с проблемой отвода тепла от электронных компонентов и узлов [1]. Увеличение объемной плотности размещения полупроводниковых компонентов и повышение их степени интеграции приводит в итоге к увеличению выделения тепла на единицу площади. При этом максимальная рабочая температура полупроводниковых компонентов ограничена и составляет порядка 400К.

Для повышения эффективности отвода тепла разработчики выбирают материалы с высокой теплопроводностью. К числу таких материалов относятся: металлы (медь, алюминий, серебро), сплавы, керамика (алюмооксидная, алюмонитридная, оксид берилля), различные композиционные материалы (молибден-медь, вольфрам-медь, алюминий-карбид кремния) и теплорассеивающие полимерные композиты (ТРПК). Каждому из этих материалов свойственны свои преимущества и недостатки, которые разработчики учитывают при проектировании радиоэлектронной техники. Теплопроводность не является единственным решающим параметром при выборе теплоотводящего материала в радиоэлектронной технике, также разработчики обращают внимание на термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР) и удельный вес. ТКЛР особенно важно учитывать при разработке и производстве полупроводниковых приборов, т. к. в этом случае необходимо добиться согласования коэффициентов линейного расширения между теплоотводящей подложкой и полупроводниковым кристаллом. Для сравнения, ТКЛР наиболее применяемых полупроводниковых материалов: кремний — 3,0, карбид кремния — 3,0, фосфид индия — 4,5 и арсенид галлия — 5,9. Разработчики бортовой радиоэлектроники для летательных аппаратов вынуждены принимать во внимание удельный вес теплоотводящих материалов: чем меньше, тем лучше, т. к. от этого параметра напрямую зависит масса летательных аппаратов в целом.

Для выяснения достигнутого уровня параметров псевдосплавных материалов МД-40 и МД-50 определим их теоретические значения, что

позволит лучше понять направления совершенствования их свойств. Для этого рассчитаем: теплопроводность, ТКЛР и удельный вес.

Расчет теплопроводности.

1. Общий объем материалов в псевдосплаве:

$$V_{\Sigma} = \sum V_i, \quad (1)$$

где V_i – объем составляющего компонента, см^3 .

$$V_i = \frac{P_i}{\rho_i}, \quad (2)$$

где P_i – содержание составляющего компонента, %;

ρ_i – удельный вес составляющего компонента, г/см^3 .

2. Если материал геометрически представляет собой параллелепипед, то в каждом сечении, перпендикулярном одной из граней элементарный объем будет:

$$\Delta V = S_{\Sigma} \Delta l \frac{V_i}{V_{\Sigma}}, \quad (3)$$

где S_{Σ} – общая площадь поперечного сечения, см^2 ;

Δl – элементарная длина, см ;

V_i – объем составляющего компонента, см^3 ;

V_{Σ} – общий объем материалов в псевдосплаве, см^3 .

3. Теплопередача на элементарной длине Δl осуществляется за счет параллельно расположенных микрообъемов ΔV материалов, входящих в состав псевдосплавов. При равенстве Δl можно составить общее выражение для элементарной площади поперечного сечения:

$$S_i = S_{\Sigma} \frac{V_i}{V_{\Sigma}}, \quad (4)$$

где S_{Σ} – общая площадь поперечного сечения, см^2 ;

V_i – объем составляющего компонента, см^3 ;

V_{Σ} – общий объем материалов в псевдосплаве, см^3 .

и затем выражение для двухкомпонентного состава:

$$S_2 = S_{\Sigma} \frac{P_1}{P_1 + P_2} \frac{1}{\rho_1 \rho_2}, \quad (5)$$

где S_{Σ} – общая площадь поперечного сечения, см^2 ;

P_1 и P_2 – содержание первого и второго составляющих компонентов соответственно, %;

ρ_1 и ρ_2 – удельный вес первого и второго составляющих компонентов, соответственно, г/см³.

4. Тепловое сопротивление:

$$R_i = \frac{\Delta l}{\lambda_i S_i}, \quad (6)$$

где Δl – элементарная длина, см;

λ_i – теплопроводность компонента, Вт/м·К;

S_i – элементарная площадь поперечного сечения, см²;

поэтому приняв $S_\Sigma = 1$ и $\Delta l = 1$, получим площадь поперечного сечения для первого компонента:

$$S_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (7)$$

где P_1 и P_2 – содержание первого и второго составляющих компонентов соответственно, %;

ρ_1 и ρ_2 – удельный вес первого и второго составляющих компонентов, соответственно, г/см³;

для второго компонента площадь поперечного сечения:

$$S_2 = 1 - S_1, \quad (8)$$

где S_1 – площадь поперечного сечения первого компонента, см².

Далее тепловые сопротивления первого и второго составляющих компонентов:

$$R_1 = \frac{\Delta l}{\lambda_1 S_1}, R_2 = \frac{\Delta l}{\lambda_2 S_2} \quad (9), (10)$$

где Δl – элементарная длина, см;

λ_1 и λ_2 – теплопроводности первого и второго составляющих компонентов, соответственно, Вт/м·К;

S_1 и S_2 – площади поперечного сечения первого и второго составляющих компонентов, см².

5. Общее тепловое сопротивление:

$$R_\Sigma = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad (11)$$

где R_{T1} и R_{T2} – тепловые сопротивления первого и второго составляющих компонентов, соответственно, м·К/Вт.

6. Таким образом, общая теплопроводность материала:

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{1}{R_{T_{\Sigma}}}, \quad (12)$$

принимая $\rho_1 = 10,216 \text{ г/см}^3$ и $\lambda_1 = 145 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ для молибдена, а также $\rho_2 = 8,89 \text{ г/см}^3$ и $\lambda_2 = 384 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ для меди, определяем теплопроводности для псевдосплавов МД-40 и МД-50:

$$\lambda_{\text{МД-40}} = 248,6 \text{ Вт/м}\cdot\text{К} \text{ и } \lambda_{\text{МД-50}} = 271 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$$

Расчет ТКЛР.

1. В общем случае псевдосплав состава молибден-медь представляет собой тело, состоящее из равномерно распределенных микрообъемов молибдена и меди, суммарная величина которых определяется их процентным соотношением. Если взять 100г псевдосплав состава молибден-медь, то суммарный объем молибдена V_{Mo} составит $5,873 \text{ см}^3$, а меди $V_{\text{Cu}} - 4,499 \text{ см}^3$ для псевдосплав МД-40, а для псевдосплав МД-50 – суммарный объем молибдена

V_{Mo} составит $4,894 \text{ см}^3$ и меди $V_{\text{Cu}} - 5,624 \text{ см}^3$. Пусть из указанного количества материала изготовлен параллелепипед сечением $S = 1 \text{ см}^2$. Тогда суммарная длина микрообъемов молибдена и меди составит соответственно:

$$l_{\Sigma} = \frac{V_{\text{Mo}}}{S} + \frac{V_{\text{Cu}}}{S}, \quad (13), (14)$$

где V_{Mo} и V_{Cu} – суммарный объем молибдена и меди, соответственно, см^3 ;

S – площади поперечного сечения параллелепипеда, см^2 .

2. Термический коэффициент линейного расширения $\alpha_{\text{МД}}$ материала может быть найден из общего выражения для расчета ТКЛР:

$$\alpha = \frac{l - l_0}{l_0 \Delta T}, \quad (15)$$

где l_0 – начальная длина параллелепипеда, см;

l – конечная длина параллелепипеда, см;

ΔT – разность температур, при которых определяется ТКЛР, К.

откуда термический коэффициент линейного расширения $\alpha_{\text{МД}}$ материала:

$$\alpha_{\text{МД}} = \frac{l_{\text{МД}} - l_{0\text{МД}}}{l_{0\text{МД}} \Delta T}, \quad (16)$$

где $l_{0\text{МД}}$ – начальная длина молибдена в параллелепипеде, см;

l_{0Cu} – начальная длина меди в параллелепипеде, см;

α_{Mo} – ТКЛР молибдена, $\times 10^{-6}K^{-1}$;

α_{Cu} – ТКЛР меди, $\times 10^{-6}K^{-1}$;

ΔT – разность температур, при которых определяется ТКЛР, К.

3. Термический коэффициент линейного расширения α_{MD-40} материала МД-40 с учетом того, что при 373,15К — ТКЛР молибдена $\alpha_{Mo} = 4,3 \times 10^{-6}K^{-1}$ и ТКЛР меди $\alpha_{Cu} = 16,8 \times 10^{-6}K^{-1}$:

$$\alpha_{MD-40} = 9,722 \times 10^{-6}K^{-1}$$

4. Термический коэффициент линейного расширения α_{MD-50} материала МД-50 с учетом того, что при 373,15К — ТКЛР молибдена $\alpha_{Mo} = 4,3 \times 10^{-6}K^{-1}$ и ТКЛР меди $\alpha_{Cu} = 16,8 \times 10^{-6}K^{-1}$:

$$\alpha_{MD-50} = 10,374 \times 10^{-6}K^{-1}$$

Расчет удельного веса.

1. Объем составляющего компонента в псевдосплаве:

$$V_i = \frac{P_i}{\rho_i}, \quad (17)$$

где P_i – содержание составляющего компонента, г;

ρ_i – удельный вес составляющего компонента, г/см³.

2. Суммарный объем материала:

$$V_{\Sigma} = V_{Mo} + V_{Cu} \quad (18)$$

где V_{Mo} и V_{Cu} – суммарный объем молибдена и меди, соответственно, см³;

3. Удельный вес псевдосплавов МД-40 МД-50, соответственно:

$$\rho_{MD-40} = 9,641 \text{ г/см}^3 \text{ и } \rho_{MD-50} = 9,508 \text{ г/см}^3$$

Теоретически достижимые параметры каркасных псевдосплавов МД-40 и МД-50 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Теоретические параметры каркасных псевдосплавов МД-40 и МД-50

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	ТКЛР, $\times 10^{-6}K^{-1}$	Удельный вес, г/см ³
Псевдосплав МД-40	248,6	9,722	9,641

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	ТКЛР, $\times 10^{-6} \text{К}^{-1}$	Удельный вес, г/см ³
Псевдосплав МД-50	271	10,984	9,508

Основные параметры теплопроводящих материалов отечественного производства приведены в таблице 2 [2, 3].

Таблица 2

Основные параметры теплопроводящих материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	ТКЛР, $\times 10^{-6} \text{К}^{-1}$	Удельный вес, г/см ³	Примечания
Медь	384	16,7	8,89	Высокий ТКЛР
Алюминий	206	22,3	2,7	Высокий ТКЛР
Серебро	429	19,5	10,5	Высокий ТКЛР, высокая стоимость
Ковар 29НК	17	5,3	8,36	Низкая теплопроводность
Оксид берилля	180	7,6	2,9	Высокая стоимость, токсичность
Алюмооксидная керамика	17	6,7	3,6	Низкая теплопроводность
Алюмонитридная керамика	180	4,5	3,26	Сложность металлизации
Псевдосплав МД-40 (матричный)	167	10,5-11,5	9,4-9,5	Высокий ТКЛР
Псевдосплав МД-50 (матричный)	167	11-12	9,3-9,4	Высокий ТКЛР
Композит Al-SiC	150-200	6,2-15,6	2,78-3,01	Сложность обработки
ТРПК	0,6-20	4-36	-	Низкая теплопроводность, высокий ТКЛР

Из представленных в таблице 2 материалов, ни один не обладает совокупностью лучших параметров. При этом значения параметров наиболее часто используемых псевдосплавных материалов типа МД40 и МД50 существенно отстают от теоретически достижимых.

Достижению теоретических значений параметров в серийно используемых матричных псевдосплавах МД-40 и МД-50 мешает ряд факторов, характерных для принятого в настоящее время способа их производства: неполное смачивание жидкой медью тугоплавкой фазы, остаточная пористость, неравномерное распределение в объеме материала молибдена и меди, анизотропия свойств материала.

Проведенные авторами исследования позволили разработать технологический процесс серийного производства каркасных псевдосплавных материалов состава молибден-медь типа МД40 и МД50 с параметрами, приведенными в таблице 3.

Таблица 3

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	ТКЛР, $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	Удельный вес, г/см ³	Примечания
Псевдосплав МД-40 (каркасный)	210-250	10,3	7,1	
Псевдосплав МД-50 (каркасный)	230-270	11,5	9,0	

Возможность получения материалов с указанными в таблице параметрами базируется на разделении процессов спекания молибденовых каркасов, что позволяет равномерно распределить частицы молибдена в объеме материала, и пропитки их медью при температурах, обеспечивающих нулевой угол смачивания жидкой медью молибденового каркаса.

Список литературы

1. Ланин В.Л., Ануфриев Л.П. Монтаж кристаллов IGBT-транзисторов // Силовая электроника. – 2009. – №2. – С. 94-99.
2. Македонский Б.К., Морозова И.Г., Сказкин В.Е. Псевдосплавы системы медь-молибден // Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education-2012.
3. Полосы из псевдосплава на основе молибдена и меди // Технические условия ТУ 6365-021-07604787-2004.

Прасицкий Г.В. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru.

Инюхин М.В. — инженер-технолог КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru.

А.Н. Щербаков, В.В. Андреев

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МДП-СТРУКТУР ПОСЛЕ ИНЖЕКЦИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ

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

Увеличение степени интеграции изделий микроэлектроники обуславливает необходимость повышения их надежности, что связано с совершенствованием методов производственного контроля интегральных схем [1].

Одним из методов контроля и определения параметров МДП-структур является метод измерения C - V характеристик [3]. Вольт-фарадные методы измерения параметров полупроводников основаны на определении зависимости емкости структуры, обусловленной наличием объемного заряда в приповерхностной области полупроводника, от приложенного к ней напряжения. Метод сильнополевой инжекции заряда в диэлектрик постоянным током, реализованный в данном устройстве, является одним из эффективных методов исследования деградиационных процессов в МДП-структурах [2,4]. Метод инжекции заряда постоянным током является одним из наиболее применяемых среди методов сильнополевой инжекции заряда в диэлектрик МДП-структур. Зависимость тока от напряжения в МДП-структуре носит экспоненциальный характер и, следовательно, использование импульсов тока позволяет расширить диапазон прикладываемых электрических полей, уменьшая вероятность пробоя диэлектрика. При приложении прямоугольного импульса тока упрощается определение количества носителей заряда, инжектированных в диэлектрик, а зарядовая деградация диэлектрика контролируется по изменению напряжения на МДП-структуре.

Разработанное устройство создания инжекционных нагрузок и контроля параметров приборов со структурой МДП позволяет оперативно с высокой точностью определять электрофизические параметры диэлектрических пленок МДП-приборов.

Разрабатываемое в данном проекте устройство создания инжекционных нагрузок и контроля параметров приборов со структурой МДП предназначено для исследования параметров диэлектрических слоев структур МДП на полупроводниковой пластине [5]. Оно позволяет осуществлять измерения с высокой точностью и представлять их в форме, удобной для дальнейшей математической обработки на персональном компьютере (ПК) с помощью различных пакетов прикладных программ. Полученные таким образом данные могут быть использованы при проектировании новых кри-

сталлов, для улучшения параметров существующих интегральных схем, в которых используются структуры МДП, а также для контроля дефектности кристаллов на полупроводниковой пластине.

Установка для исследования параметров диэлектрических слоев представляет собой систему, состоящую из: ПК, контактирующего устройства и прибора для создания инжекционных нагрузок и контроля параметров МДП-структур. Управление работой устройства осуществляется с помощью ПК, что позволяет значительно упростить процесс сбора и обработки экспериментальных данных. При разработке устройства была предусмотрена функция отслеживания результатов измерений в реальном масштабе времени. Это дает возможность оператору контролировать процесс измерений на любом его этапе и при необходимости остановить процесс измерений.

Основные технические характеристики:

1. Частота тестового ВЧ сигнала: 1 МГц.
2. Диапазон изменения линейно-изменяющегося напряжения: $-8 \div 8$ В.
3. Максимальная амплитуда измерительного ВЧ сигнала: 20 мВ.
4. Погрешность измерения емкости в диапазоне измерений: 5%.
5. Диапазон измерения емкости: 3 – 1800 пФ.
6. Потребляемая мощность: 16 Вт.
7. Дискретность установки напряжения смещения 4 мВ.
8. Дискретность измерения напряжения, пропорционального емкости МДП-структуры: 0,3 мВ.
9. Напряжение питания: ~ 220 В.
10. Частота питающего напряжения: 50 Гц.
11. Нарботка на отказ: 36000 ч.
12. Температура окружающей среды: $+10 \div +25$ °С.

Для определения емкости МДП структуры в данной работе используется высокочастотный C-V метод. Для этого с помощью генератора высокой частоты с последующим аттенуатором формируется синусоидальный тестовый сигнал частотой 1 МГц и амплитудой 20 мВ. При этих условиях поверхностные состояния не будут успевать перезаряжаться вслед за изменением сигнала.

В качестве напряжения смещения на МДП-структуре используется линейно изменяющийся сигнал.

Для создания инжекционных нагрузок используется высоковольтный источник тока с блоком из двух реле для коммутации токозадающих резисторов [6].

В состав устройства создания инжекционных нагрузок и контроля параметров приборов со структурой МДП входит аппаратная и программная части.

Устройство создания инжекционных нагрузок и измерения C-V характеристик содержит: генератор, необходимый для получения ВЧ сигнала стабильной частоты величиной 1 МГц; узкополосный фильтр с полосой пропускания около 10 кГц и центральной частотой, равной 1 МГц; усилитель измерительного сигнала; детектор; дифференциальный усилитель; высоковольтный источник тока; коммутирующие реле для переключения диапазонов измерения емкостей и токозадающих резисторов; блок питания с напряжениями ± 8 В, ± 5 В, 142 В, 5 В для питания цифровой части, 5 В в качестве опорного источника напряжения для АЦП и ЦАП; цифровую часть, состоящую из микроконтроллера, преобразователя интерфейсов, АЦП, ЦАП.

Данное устройство подключается к контактирующему устройству и ПК. При работе с помощью ПК осуществляется выбор необходимого режима измерения емкости и коммутация сигналов. Структурная схема устройства приведена на рис. 1, где 1 – зонд для подключения МДП-структур; 2 – устройство коммутации; 3 – источник тока; 4 – генератор высокой частоты; 5 – дифференциальный усилитель; 6 – дифференциатор; 7 – детектор; 8 – цифро-аналоговый преобразователь; 9 – полосовой фильтр; 10 – фильтр низких частот; 11 – микроконтроллер; 12 – преобразователь интерфейсов; 14 – усилитель переменного тока; 15 – дифференциальный усилитель; 16 – аналого-цифровой преобразователь.

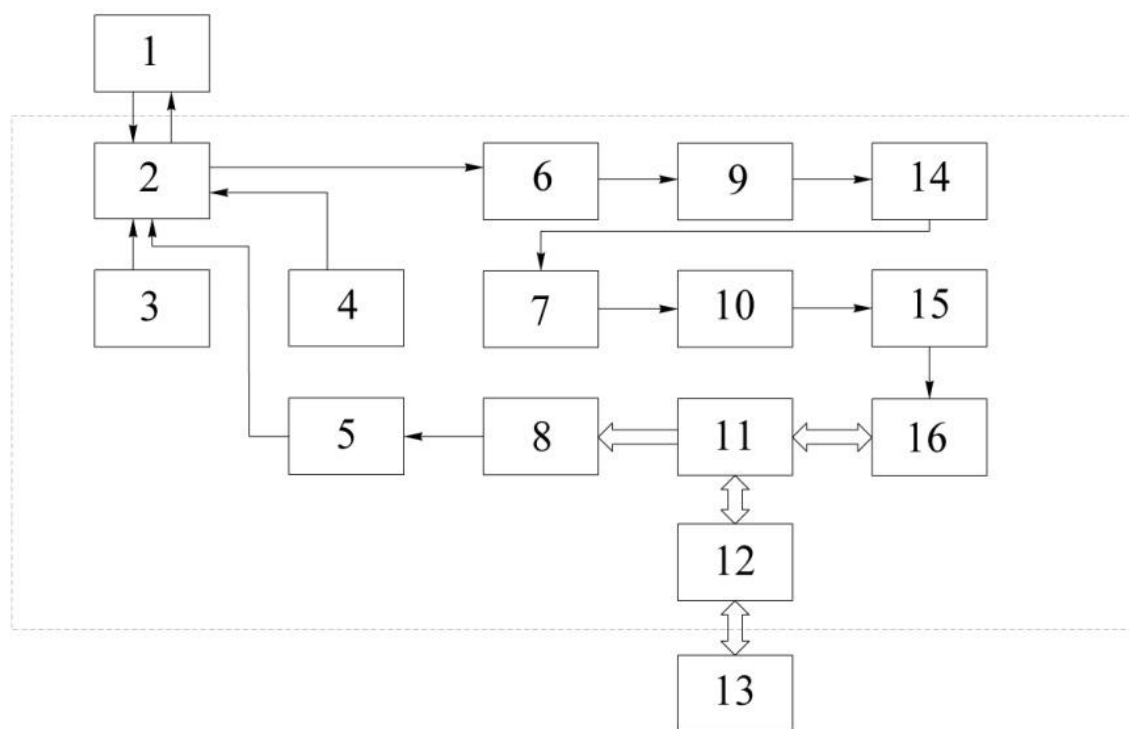


Рис. 1

С помощью разработанной установки исследовалась модификация электрофизических характеристик МДП-структур путём туннельной инжекции электронов в диэлектрик в сильных электрических полях.

В качестве экспериментальных образцов использовались тестовые МДП-конденсаторы на основе термической двуокиси кремния, пассивированной пленкой фосфорно-силикатного стекла (ФСС), изготовленные на пластинах КЭФ-4,5 кристаллографической ориентацией $\langle 100 \rangle$. Двуокись кремния толщиной 100 нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре 1000°C с добавлением 3% HCl. Пленку ФСС формировали диффузией фосфора из газовой фазы путем пиролиза смеси $\text{POCl}_3\text{-O}_2$ при температуре 900°C. Затем пластины отжигались в атмосфере азота при температуре 1000°C. Алюминиевые электроды площадью $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ напыляли магнетронным методом. После формирования Al-электродов проводили отжиг в среде азота при температуре 475 °C.

Изменение зарядового состояния МДП-структур контролировалось с использованием C-V метода и метода управляемой токовой нагрузки [1,2,5,6], заключавшегося в приложении к образцу импульса тока специальной формы, обеспечивающего заряд ёмкости МДП-структуры и последующую сильнополевую туннельную инжекцию электронов в диэлектрик, обычно осуществляемую в режиме протекания постоянного тока. В течение сильнополевой инжекции измерялось приращение напряжения на МДП-структуре ΔV_b , характеризовавшее изменение зарядового состояния МДП-структуры [1].

Высокочастотные C-V характеристики, измеренные на МДП-структурах III группы при сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик из кремниевого (1,2,3) и алюминиевого (1',2',3') электродов приведены на рисунке 7. Как видно из рисунка, при инжекции электронов из кремния (положительная полярность Al-электрода) наряду с накоплением отрицательного заряда в пленке ФСС, приводящего к сдвигу C-V кривых в сторону положительных напряжений, происходит увеличение плотности поверхностных состояний и, следовательно, деградации границы раздела Si-SiO₂, что может ухудшить параметры модифицируемых приборов. На начальном этапе инжекции электронов из Al-электрода (рисунок 7, кривая 1') изменение зарядового состояния МДП-структур характеризуется накоплением отрицательного заряда в пленке ФСС без увеличения плотности поверхностных состояний. Накопление отрицательного заряда в структуре Si-SiO₂-ФСС-Al связано с захватом части инжектированных электронов на ловушки в слое ФСС [1,4].

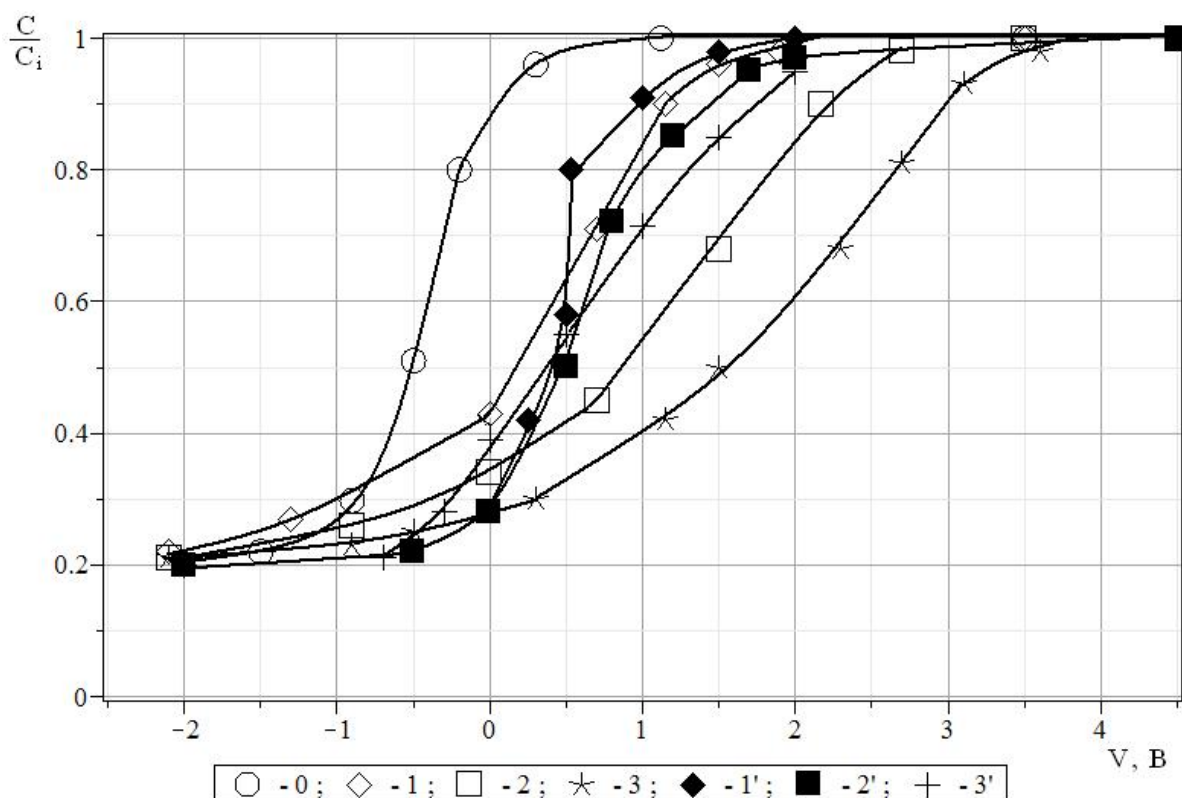


Рис. 2

Высокочастотные C - V характеристики (рис. 2), измеренные на МДП-структурах III группы при сильнополевой инжекции электронов импульсами постоянного тока $0,667 \text{ мкА/см}^2$ при положительной (1, 2, 3) и отрицательной (1', 2', 3') полярности Al-электрода:

0 – измерена до проведения инжекции;

1,2,3,1',2',3' – после инжекции заряда различной величины: (1,1') – $0,0667 \text{ мКл/см}^2$, (2,2') – $0,133 \text{ мКл/см}^2$, (3,3') – $0,2 \text{ мКл/см}^2$.

Проведенные исследования показали, что при инжекции электронов из Al-электрода накопление отрицательного заряда может происходить лишь до определенной величины, при превышении которой за счет увеличения локального электрического поля в диэлектрической пленке [1,5] происходит пробой диэлектрика. Таким образом, при отрицательной полярности Al-электрода на исследуемых образцах инжекция электронов позволяла увеличивать пороговое напряжение МДП-транзистора на величину до 1 В. При инжекции электронов из кремния для обеспечения приемлемых значений плотности поверхностных состояний величина инжектированного заряда при корректировке порогового напряжения не должна превышать $0,1 \text{ мКл/см}^2$. Диапазон токового воздействия при изменении зарядового состояния МДП-приборов целесообразно ограничить $10^{-8} \div 10^{-5} \text{ А/см}^2$. Уменьшение амплитуды токового воздействия сопровождается

трудностями технической реализации и нецелесообразно в связи со значительным возрастанием времени инжекции требуемой величины заряда. Увеличение амплитуды токового воздействия приводит к значительному возрастанию вероятности пробоя образца, а при инжекции электронов из Si - к повышению плотности поверхностных состояний и генерации положительного заряда в SiO₂ [1,4].

Список литературы

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., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А.* Инжекционный метод исследования зарядовых характеристик систем металл-диэлектрик-полупроводник // Перспективные материалы – 1998. - №4.
3. *Павлов Л.П.* Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. – М.: Высшая школа, 1987.
4. *Зи С.М.* Физика полупроводниковых приборов. В 2-х кн. Кн. 1: Пер. с англ. / Под ред. Р.А. Суриса. – М.: Мир, 1984.
5. *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.
6. *Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A.* Multi-level current stress technique for investigation thin oxide layers of MOS structures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2012. – V. 41. – №012017.

Щербаков А.Н. — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: scherbakovalexey@mail.ru.

Андреев В.В. — профессор, д.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev-eic@yandex.ru.

А.П. Коржавый, Д.В. Капустин, В.И.Капустин

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ИОННОГО ТОКА ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОНИЗАЦИИ ПАРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ТРОТИЛА

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

Развитие методов селективного анализа органических веществ представляет большой научный интерес и практически значим для создания эффективных методов детектирования наркотических, отравляющих и взрывчатых веществ, например, с использованием дрейф-спектрометрических газоанализаторов [1-4]. В литературе была показана эффективность применения метода масс-спектрометрии для исследования продуктов ионизации в различных типах источников ионов [5-7], в том числе в поверхностно-ионизационных источниках ионов, в которых в качестве активного элемента для ионизации аминов был использован материал на основе микролегированного сплава молибдена [8]. Ранее в литературе была сформулирована научная гипотеза о физико-химической природе активных центров ионизации нитросоединений на поверхности оксидной бронзы и физико-химическом механизме поверхностной ионизации нитросоединений [5]. Однако экспериментальное подтверждение указанной гипотезы в литературе отсутствовало. Целью данной работы было экспериментальное исследование продуктов поверхностной ионизации тротила с использованием метода масс-спектрометрии высокого разрешения.

Нами были проведены масс-спектрометрические исследования состава фонового тока с поверхности термоэммиттера, изготовленного на основе активного элемента из бронзы состава $\text{Na}_{0,33}\text{V}_2\text{O}_5$. Методика экспериментальных исследований была аналогична методике работы [8]. В качестве масс-спектрометра был использован прибор высокого разрешения фирмы Thermo Finnigan LCQ Deca XP. Температура термоэммиттера при исследовании состава фонового тока и исследовании продуктов ионизации паров технического тротила составляла 450 °С. На рис. 1 приведен масс-спектр фонового тока термоэммиттера, а в таблице 1 - его расшифровка.

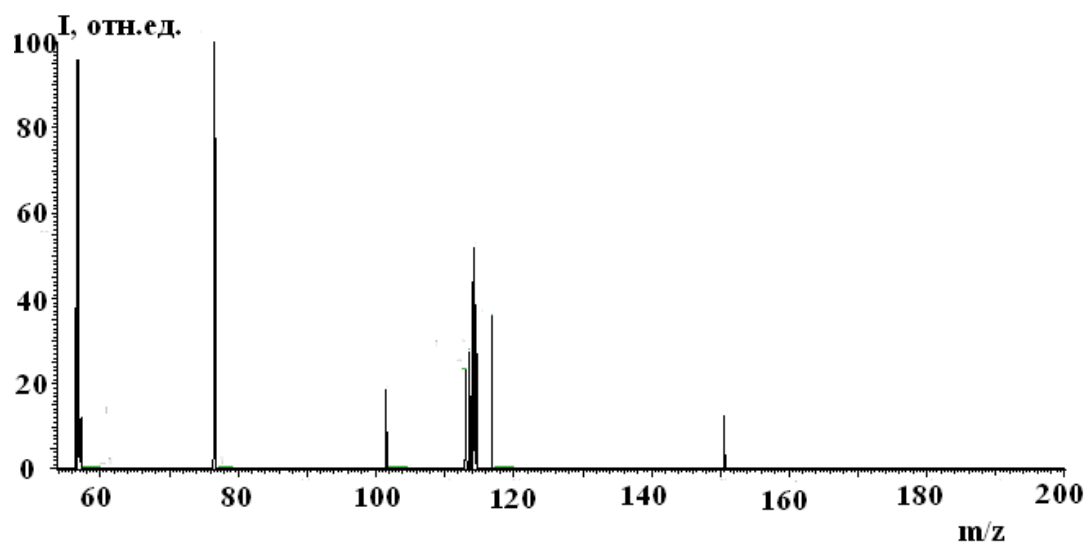


Рис. 1.

Таблица 1

Расшифровка масс-спектра рис. 1

Масса иона	Интенсивность, отн. ед.	Тип иона	Масса иона	Интенсивность, отн. ед.	Тип иона
57	95	$K^+ \cdot H_2O$	115	50	$Ni^{60}O \cdot K^+$ $Ni^{58}O \cdot K^+$ $Ni^{60}O_2 \cdot Na^+$
77	100	$Na^+ \cdot 3H_2O$	117	35	$Ni^{60}O \cdot Na^+ \cdot H_2O$
101	20	$K^+ \cdot 4H_2O$	151	13	$V_2O_3 \cdot Na^+ \cdot 5H_2O$
113	25	$Na^+ \cdot 5H_2O$ $Ni^{58}O \cdot K^+$ $Ni^{58}O_2 \cdot Na^+$			

Основным типом ионов в составе фонового тока термоэмиттера являются ионы натрия, захватившие молекулы воды, и кластеры на основе оксидов никеля, ионов натрия и молекул воды. Ионы калия содержатся в оксидной бронзе в качестве примеси и, вследствие низкого потенциала ионизации калия, дают определенный вклад в состав ионного тока.

Таким образом, впервые экспериментально подтверждено, что центрами ионизации органических нитросоединений на поверхности оксидной бронзы являются поверхностные ионы натрия из состава натрий – ванадиевой оксидной бронзы и, частично, ионы калия, входящие в состав оксидной бронзы в качестве примеси.

Основой потенциальной областью практического применения натрий - ванадиевой оксидной бронзы является использование ее в качестве материала для селективных источников ионов взрывчатых веществ, применяемых в различных типах газоанализаторов. Поэтому для дальнейших исследований в качестве тестового органического вещества из класса нитросоединений нами был выбран технический тротил. Результаты качественных исследований методом ИК-спектрометрии показали, что технический тротил содержит изомеры тринитротолуола, динитротолуола, мононитротолуола и органическую связку. Количественные исследования нами не проводились ввиду отсутствия соответствующих эталонов компонентов технического тротила.

Был исследован масс-спектр технического тротила при подаче на вход прибора паров указанного вещества при температуре термоэмиттера 450 °С. На рис. 2 показан спектр масс тротила в диапазоне масс 200 – 500 а.е.м.

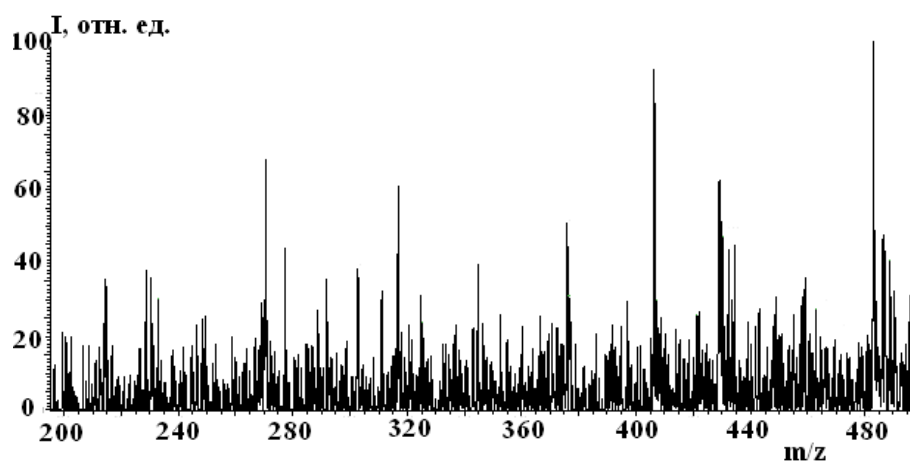


Рис. 2.

В таблице 2 приведен состав ионов, образующихся при поверхностной ионизации тринитротолуола. В таблице 2 применены следующие обозначения:

- МНТ – мононитротолуол;
- ДНТ – динитротолуол;
- ТНТ – тринитротолуол;
- (МНТ-CH₂) – мононитротолуол, потерявший в результате частичной диссоциации группу CH₂;
- (ТНТ-CH₂) – тринитротолуол, потерявший в результате частичной диссоциации группу CH₂.

Таблица 2

Расшифровка масс-спектра технического тротила

Масса иона	Интенсивность, отн. ед.	Тип иона	Масса иона	Интенсивность, отн. ед.	Тип иона
200	24	$(\text{МНТ-CH}_2) \cdot \text{Na}^+ \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	277	50	$\text{ДНТ} \cdot \text{Na}^+ \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
214	40	$\text{МНТ} \cdot \text{Na}^+ \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	302	43	$\text{ТНТ} \cdot \text{K}^+ \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
232	40	$\text{МНТ} \cdot \text{Na}^+ \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	344	42	$(\text{ТНТ-CH}_2) \cdot \text{Na}^+ \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
250	33	$\text{ТНТ} \cdot \text{Na}^+$	376	57	$\text{ТНТ} \cdot \text{Na}^+ \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
268	40	$\text{ТНТ} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$	430	60	$\text{ТНТ} \cdot \text{Na}^+ \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
270	78	$(\text{ТНТ-CH}_2) \cdot \text{K}^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$	483	100	$\text{ТНТ} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{V}_3\text{O}_5$

Следует отметить, что моонитротолуол и динитротолуол содержатся в техническом тротиле и обладают по сравнению с последним более высокой летучестью. Кроме того, они могут образовываться в результате частичной диссоциации тринитротолуола на нагретой поверхности термоэмиттера с потерей одной или двух нитрогрупп. Таким образом, поверхностная ионизация нитросоединений на поверхности оксидной бронзы щелочного металла протекает с захватом ионов натрия и возможным захватом некоторого количества молекул воды из воздуха при движении первичных ионов в трубке дрейфа. На основании полученных результатов можно заключить:

1. Основными типами ионов в составе фонового тока термоэмиттера на основе оксидной натрий - ванадиевой бронзы являются ионы натрия из состава бронзы, захватившие молекулы воды, и ионы калия из состава примесей бронзы, захватившие молекулы воды.

2. Ионизация нитросоединений на поверхности оксидной бронзы щелочного металла протекает с захватом ионов натрия и, частично, ионов калия на поверхности оксидной бронзы с возможным захватом некоторого количества молекул воды из воздуха при движении первичных ионов в трубке дрейфа газоанализатора. При этом для молекул тринитротолуола возможна частичная диссоциация молекул на нагретой поверхности термоэмиттера с отщеплением групп $-\text{CH}_2$ и, возможно, $-\text{NO}_2$.

Список литературы

1. IMS spectrometers with radioactive, X-ray, UV and laser ionization / V. Matsaev, M. Gumerov, L. Krasnobaev et al. // Int. Jour. For Ion Mobility Spectr. – 2002. – V. 5. – № 3. – P. 112-114.

2. Buryakov I.A. Ion mobility increment spectrometer with radial symmetry // Int. Journ. For Ion Mobility Spectr. – 2003. – V.6. – P. 121-126.

3. *Буряков И.А.* Явления переноса ионов в газе в электрическом поле. Спектрометрия приращения ионной подвижности: Автореферат дисс. ... докт. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2005. – 32 с.

4. *Капустин В.И., Нагорнов К.О., Чекулаев А.Л.* Новые физические методы идентификации органических соединений с использованием поверхностно-ионизационного дрейф-спектрометра // ЖТФ. – 2009. – Т. 79. – Вып. 5. – С. 109-116.

5. Поверхностно-ионизационные свойства оксидной бронзы щелочного металла / *Д.В. Капустин, А.А. Буш, К.О. Нагорнов* и др. // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – Вып. 4. – С. 83-88.

6. *Блашенков Н.М., Лаврентьев Г.Я.* Исследование неравновесной поверхностной ионизации методом полевой поверхностно-ионизационной масс-спектроскопии // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177. – №1. – С. 59-85.

7. *Филиппенко В.А., Малкин Е.К.* Исследование влияния условий ионизации на масс-селективное распределение подвижности ионов тротила и гексогена методом спектрометрии ионной подвижности/тандемной масс-спектрометрии // Масс-спектрометрия. – 2010. – №7(3). – С. 205-212.

8. Масс-спектрометрические исследования механизма ионизации органических соединений азота на поверхности микролегированных сплавов молибдена / *В.И. Капустин, К.О. Нагорнов, О.Н. Харыбин* и др. // Химическая физика. – 2011. – Т. 30. – № 7. – С. 1-14.

Коржавый А.П. — зав. кафедрой, д.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru.

Капустин Д.В. — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru.

Капустин В.И. — профессор, д.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru.

Д.В. Андреев

МОДИФИКАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК МДП-ПРИБОРОВ ПРИ СИЛЬНОПОЛЕВЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

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

Воздействие сильных электрических полей и радиационных облучений на кремниевые МДП-приборы интенсивно исследуется с середины шестидесятых годов 20-го века. При этом основные направления исследований были связаны с повышением зарядовой стабильности и радиационной стойкости МДП-приборов и интегральных схем. Использование же сильнополевых и радиационных воздействий для управления параметрами МДП-приборов практически не применялось ввиду значительных деградиационных процессов, сопутствующих этим воздействиям. Однако в последнее время благодаря разработке новых диэлектрических пленок и методов управляемого воздействия на них стало возможным проводить радиационную и сильнополевую обработку МДП-структур с целью улучшения и модификации их характеристик [1-7]. Создание полупроводниковых приборов, параметрами которых можно управлять после их изготовления, позволит в перспективе уменьшить номенклатуру выпускаемых полупроводниковых приборов и интегральных схем, используя универсальные приборы, параметры которых можно изменять после их изготовления, как у изготовителя, так и у потребителя.

Целью данной работы являлось рассмотрение возможности модификации электрофизических характеристик МДП-структур путём сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик и плазменной обработки кристаллов.

В качестве экспериментальных образцов использовались тестовые МДП-конденсаторы на основе термической двуокиси кремния и термической двуокиси кремния, пассивированной пленкой фосфорно-силикатного стекла (ФСС), изготовленные на кремнии p-типа. Двуокись кремния толщиной $30 \div 100$ нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре 1000°C с добавлением 3% HCl. Пленку ФСС формировали диффузией фосфора из газовой фазы путем пиролиза смеси $\text{POCl}_3\text{-O}_2$ при температуре 900°C . С целью получения экспериментальных образцов с различной толщиной ФСС варьировалось время загона фосфора в пределах от 3 до 6 минут. В качестве затвора использовались

плёнки поликремния (Si^*) толщиной 0,6 мкм, легированные фосфором до 20 Ом/□ и пленки алюминия толщиной 1,2 мкм площадью $10^{-4} \div 10^{-2} \text{ см}^2$.

Для инжекционной модификации электрофизических характеристик МДП-структур использовалась сильнополевая туннельная инжекция электронов из кремниевой подложки [1] в режиме протекания постоянного инжекционного тока плотностью от 0,1 до 10 мкА/см² 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 электрического заряда после инжекционных воздействий, МДП-структуры подвергались отжигу при температуре 200 °С в течение времени от 200 с до 30 мин.

В ранее проведенных исследованиях [1,2] было показано, что отрицательный заряд, накапливающийся в плёнке ФСС в структурах Si-SiO₂-ФСС-A1 в процессе туннельной инжекции электронов в сильных электрических полях, может использоваться для коррекции порогового напряжения МДП-приборов с такой структурой. На основе измерения токов термостимулированной деполяризации и исследования изотермической релаксации C-V характеристик при нескольких фиксированных температурах установлено, что при сильнополевой туннельной инжекции электронов в МДП-структурах Si-SiO₂-ФСС-A1 накапливаемый отрицательный заряд состоит из двух компонент. Первая компонента обладает низкой термополевой стабильностью и практически полностью стекает при отжиге 200 °С. Вторая - термостабильная компонента заряда - начинает релаксировать лишь при температурах более 230 °С. Показано, что для получения приборов с высокой термополевой стабильностью после модификации зарядового состояния инжекцией электронов их необходимо отжигать при температурах около 200 °С.

На рис. 1 показаны зависимости приращения напряжения на МДП-структуре в процессе модификации (1,2,3) и после отжига при 200 °С (1',2',3') от плотности инжектированного заряда для различных температур образца при модификации (1 – 20 °С; 2 – 50 °С; 3 – 100 °С). Как видно из рисунка 1, повышение температуры приводит к возрастанию плотности захваченного в диэлектрике отрицательного заряда (кривые 1, 2, 3); эта тенденция сохраняется и после отжига структур при температуре 200 °С в течение 20 мин. (кривые 1', 2', 3'). Однако с повышением температуры образца, при которой проводится инжекция заряда, существенно возрастает вероятность пробоя диэлектрической пленки, а для получения термостабильной компоненты отрицательного заряда все равно необходимо про-

водить послеинжекционный отжиг. Следовательно, для практических применений сильнополевую инжекционную модификацию МДП-приборов целесообразней проводить при комнатной температуре.

Установлено, что как высокочастотная (ВЧ), так и плазмоструйная (ПСО) плазменные обработки приводят к образованию в объеме пленки SiO_2 электронных ловушек [1]. Однако плотность электронных ловушек, образующихся при ПСО, более чем на порядок превышает плотность ловушек, возникающих при ВЧ плазменной обработке. Наличие этих ловушек может значительно снизить вероятность пробоя диэлектрика и повысить его напряжение пробоя, слабо влияя на параметры МДП-прибора, поскольку отрицательный заряд, накапливающийся на этих ловушках при инжекции электронов в диэлектрик в сильных электрических полях, быстро релаксирует после снятия электрического поля.

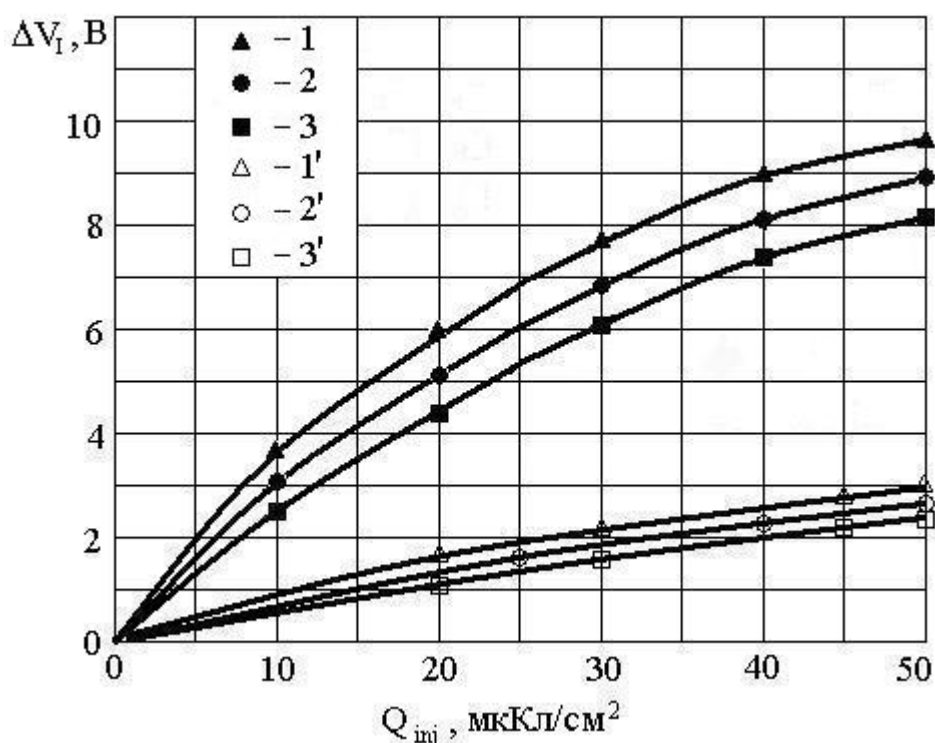


Рис. 1.

Найдено, что при определенных режимах плазменные обработки могут значительно снижать плотность и скорость генерации новых электронных ловушек в двуокиси кремния, возникающих при сильнополевой инжекции заряда электронов. Это позволяет значительно повысить зарядовую стабильность структуры и увеличить такой важный параметр, как величина заряда, инжектированного в диэлектрик до пробоя образца [1-3]. На рис. 2 представлены гистограммы зарядовой стабильности, характеризующие распределение по пластине МДП-структур в зависимости от вели-

чины заряда, инжектированного в диэлектрик до их пробоя для необработанных (1) и обработанных (2) в плазме пластин с МДП-конденсаторами. Как видно из рис. 2, после плазменной обработки максимальная величина заряда, инжектируемая до пробоя образца, может увеличиваться более чем на порядок.

Таким образом, показано, что отрицательный заряд, накапливающийся в плёнке ФСС в структурах с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO_2 -ФСС в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов, может использоваться для модификации электрофизических характеристик МДП-приборов с такой структурой. Для повышения надёжности и выявления образцов, содержащих зарядовые дефекты, предложено проводить инжекционно-термическую обработку МДП-структур. Плазменные воздействия также могут улучшать характеристики МДП-приборов.

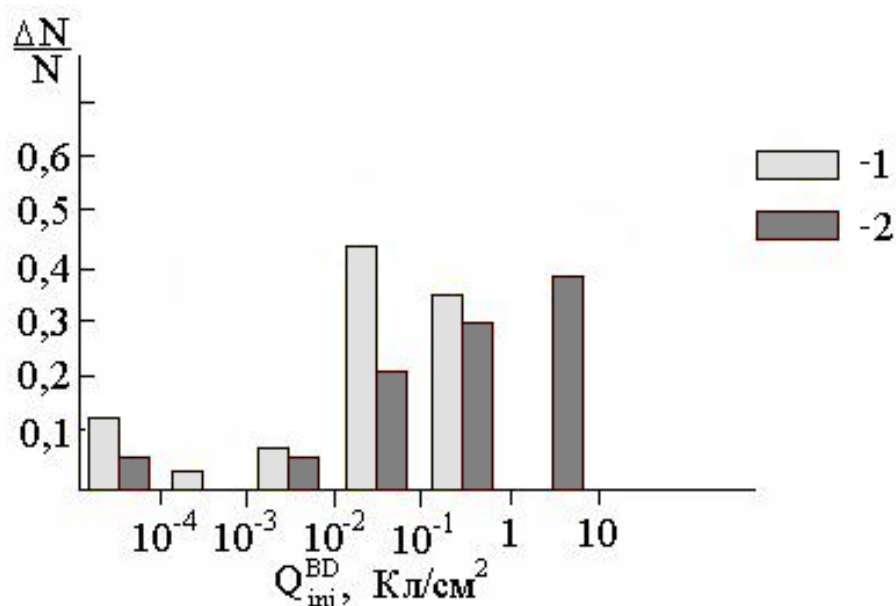


Рис. 2.

Работа выполнена в рамках реализации проекта министерства образования и науки РФ, а также при финансовой поддержке РФФИ и администрации Калужской области (грант № 12-02-97533).

Список литературы

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. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Stolyarov A.A., Vasyutin D.S., Mikhail'kov A.M. Influence of High_Field Electron Injection Regimes on Modification of Dielectric Films of MOS Devices// Inorganic Materials: Applied Research. 2010, v.1, n.2, p.105–109.

4. 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.

5. Андреев В.В., Столяров А.А., Дмитриев В.Г., Романов А.В. Инжекционные методы контроля подзатворного диэлектрика МДП-ИМС // Научные технологии. 2012. Т.13. № 10. С.20-28.

6. 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. 41 (2012) 012017.

7. 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.

Андреев Д.В. — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: DAndreev-EIC@yandex.ru.

В.Г. Дмитриев, В.В. Андреев

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЁНОК

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

Применение методов атомно-силовой микроскопии (АСМ) позволяет получать рельеф поверхности образца с разрешением вплоть до атомарного, электрические, магнитные характеристики поверхности образца и многие другие параметры. АСМ позволяет исследовать как малые, так и достаточно значительные участки поверхности образцов.

Уменьшение проектных норм элементов в микроэлектронике приводит к затруднениям в применении традиционных методов исследования параметров полупроводниковых приборов[1,2]. Поэтому методы АСМ с их возможностями по определению параметров небольших участков поверхности могут применяться для исследования параметров приборов в микро- и нанoeлектронике.

Следующие методы АСМ могут быть применены для определения параметров тонких плёнок в микроэлектронике: метод зонда Кельвина, электростатическая силовая микроскопия, сканирующая ёмкостная микроскопия.

Все методы являются двухпроходными, т.е. сначала определяется рельеф поверхности с использованием полуконтактного метода[3], а затем зонд проводится над поверхностью на постоянной высоте для определения соответствующих параметров. Применение полуконтактного метода позволяет уменьшить давление зонда на поверхность образца, что позволяет работать с более мягкими и легко разрушающимися материалами и уменьшает износ острия зонда. Также данный метод более чувствителен к различным взаимодействиям с поверхностью. Сущность метода заключается в механическом возбуждении колебаний зонда и последующем его проходе вблизи поверхности образца на расстоянии меньшем, чем амплитуда колебаний зонда. При этом при увеличении расстояния амплитуда колебаний увеличивается, а при уменьшении – уменьшается. Эти изменения отслеживает система обратной связи и приближает либо удаляет зонд от поверхности образца. Сигнал на выходе петли обратной связи будет характеризовать рельеф поверхности образца.

Метод зонда Кельвина применяется для измерения контактной разности потенциалов между зондом и образцом. Он основывается на двухпро-

ходной методике. В первом проходе определяется рельеф поверхности образца с использованием полуконтактного метода. На втором зонд проводится над поверхностью образца на некотором расстоянии для определения поверхностного электрического потенциала $\Phi(x)$. Во время второго прохода колебания зонда возбуждаются электрически путем приложения к зонду напряжения смещения V_{tip} , содержащего статическую V_{dc} и динамическую $V_{ac} \sin(\omega t)$ составляющие:

$$V_{tip} = V_{dc} + V_{ac} \sin(\omega t).$$

Результирующая емкостная сила F_{cap} между зондом и поверхностью равна:

$$F_{cap} = \frac{(V_{tip} - \Phi(x))^2}{2} \cdot \frac{dC(z)}{dz},$$

где $C(z)$ емкость зонд-образец.

Сила F_{cap} действующая на первой гармонике и приводящая к соответствующим колебаниям кантилевера равна:

$$F_{cap\omega} = (V_{dc} - \Phi(x)V_{ac}) \sin(\omega t) \cdot \frac{dC(z)}{dz}.$$

Система обратной связи изменяет переменную составляющую потенциала зонда V_{dc} пока ω компонента колебаний кантилевера не исчезнет, т.е. пока $V_{dc}(x)$ не станет равной $\Phi(x)$. В результате распределение $V_{dc}(x)$ будет отражать распределение поверхностного потенциала по поверхности образца.

Существуют несколько вариантов электростатической силовой микроскопии. Наиболее распространена бесконтактная электростатическая силовая микроскопия, основанная на двухпроходной методике. На втором проходе зонд приводится в колебательное движение на резонансной частоте, при этом он заземлен или находится при постоянном смещении V .

Емкостная сила взаимодействия зонд – образец приводит к сдвигу резонансной частоты. Соответственно, амплитуда колебаний зонда уменьшается, и фаза его колебаний сдвигается. При этом амплитуда и фаза колебаний могут быть измерены и использованы для отображения распределения электрического потенциала по поверхности образца.

Данный метод обладает определенными преимуществами по сравнению с методом зонда Кельвина. Отклонения амплитуды или фазы определяются второй производной емкости зонд – образец, что приводит к более высокому разрешению, т.к. отношение паразитной емкости конуса зонда и его держателя к полезной емкости кончик зонда – образец минимизируется.

Сканирующая емкостная микроскопия является разновидностью электростатической силовой микроскопии. В общем случае во время второго прохода колебания зонда возбуждаются электрически путем приложения к нему напряжения смещения V_{tip} , содержащего статическую V_{dc} и динамическую $V_{ac} \sin(\omega t)$ составляющие:

$$V_{tip} = V_{dc} + V_{ac} \sin(\omega t).$$

Провод проводится на некоторой высоте над поверхностью образца, которая поддерживается с использованием данных о рельефе, полученных на первом проходе. Емкостная сила взаимодействия между зондом и поверхностью образца, находящейся при потенциале V_s , $F_{cap}(z)$ равна:

$$F_{cap}(z) = \frac{(V_{tip} - V_s)^2}{2} \cdot \frac{dC(z)}{dz},$$

где $C(z)$ – емкость зонд-образец, зависящая от геометрии зонда, рельефа поверхности и величины зазора зонд-образец z .

Вторая гармоника емкостной силы зависит только от $\frac{dC(z)}{dz}$ и V_{ac} :

$$F_{cap2\omega}(z) = \frac{V_{ac}^2 \sin 2\omega t}{2} \cdot \frac{dC(z)}{dz}.$$

Она может быть использована для получения дополнительной информации, например, распределение поверхностной емкости по образцу. Для увеличения амплитуды колебаний на второй гармонике частота ω выбирается равной половине резонансной частоты зонда.

Для демонстрации возможности применения методов АСМ для контроля параметров диэлектрических плёнок, применяемых при производстве полупроводниковых приборов на рис. 1 приведён рельеф поверхности плёнки SiO_2 , размером 10 на 10 мкм. Он получен при помощи АСМ Solver Next с использованием полуконтактного метода.

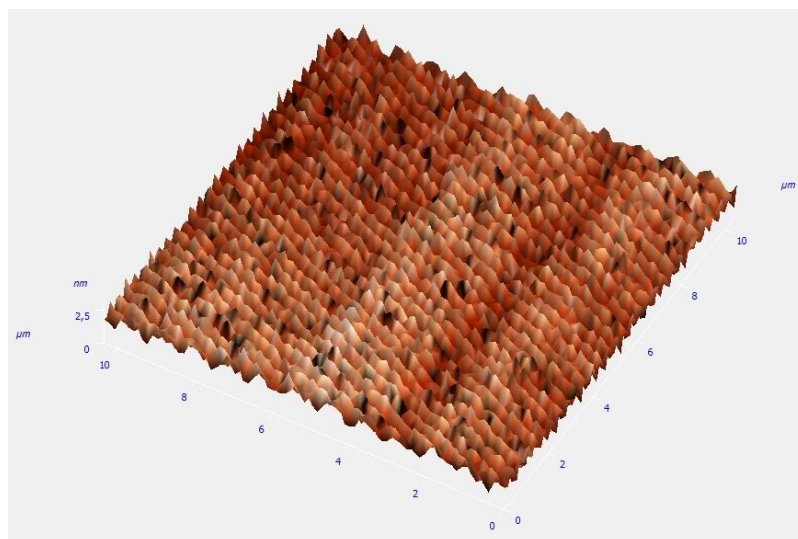


Рис. 1

Исследуемая плёнка формировалась на пластинах КЭФ-4,5 кристаллографической ориентацией $\langle 100 \rangle$ в производственных условиях. Двоукись кремния толщиной $50 \div 100$ нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре 1000°C с добавлением 3% HCl.

Список литературы

1. *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.
2. *Андреев В.В., Столяров А.А., Дмитриев В.Г., Романов А.В.* Инжекционные методы контроля подзатворного диэлектрика МДП-ИМС // Научные технологии. 2012. Т.13. № 10. С.20-28.
3. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. Н. Новгород 2004. 110 с.

Дмитриев Виктор Геннадьевич — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: victor116@ya.ru.

Андреев Владимир Викторович — профессор, д.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: victor116@ya.ru.

Г.В. Прасицкий, М.В. Инюхин

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА КАРКАСНЫХ ПСЕВДОСПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МОЛИБДЕНА И МЕДИ

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

В связи со все возрастающими потребностями радиоэлектронной отрасли в эффективных теплоотводящих каркасных псевдосплавах на основе молибдена и меди, в частности МД-40 и МД-50, становится очевидным необходимость организации их серийного производства. При этом главными задачами будут являться: достижение параметров материалов максимально близких к теоретическим, обеспечение повторяемости параметров материалов, повышение выхода годной продукции, снижение числа технологических операций и уровня механической обработки.

На сегодняшний день в мире известны следующие основные методы производства псевдосплавов: высокотемпературное жидкофазное спекание, активированное жидкофазное спекание и медная инфильтрация (пропитка медью). Рассмотрим эти методы подробнее.

Высокотемпературное жидкофазное спекание – процесс, который заключается в том, что сначала готовят смесь из молибдена и меди в необходимой пропорции, затем навески из этой смеси прессуют в заготовки и спекают при температуре свыше 2000°C в защитной атмосфере водорода [1]. В процессе спекания происходит перераспределение частиц исходной смеси в объеме заготовки. Это, в свою очередь, не приводит к образованию твердого молибденового каркаса, т. к. медь мешает образованию соединений между частицами молибдена. Данный способ требует высоких температур, а следовательно, специального печного оборудования, что сопряжено, как со значительными расходами на его обслуживание, так и значительной стоимостью самого оборудования. Процесс высокотемпературного жидкофазного спекания неоднократно модифицировался, однако, удалось лишь снизить температуру спекания до $1050\text{--}1250^{\circ}\text{C}$, за счет введения в исходную смесь вместо чистых порошков молибдена и меди их оксидов: вместе или по отдельности [2]. В настоящее время способ высокотемпературного жидкофазного спекания в серийном промышленном производстве металло-матричных материалов практически не используется, т. к. материал, получаемый таким образом, не обладает необходимыми свойствами.

Активированное жидкофазное спекание - способ изготовления каркасных материалов, где в исходную смесь вводятся специальные вещества-активаторы, которые позволяют проводить процесс спекания, при температурах до 1600°C , сокращают время спекания, выступают в

качестве легирующих добавок и способствуют образованию более однородной структуры материала. Активаторами могут быть: никель, кобальт, железо, марганец, хром, ванадий, титан и другие металлы. Однако, введение активаторов снижает теплопроводность получаемых материалов до 50-170 Вт/м·К и создает большое количество пор в структуре материала, что негативно сказывается на вакуумной плотности [3]. Данный метод применяется довольно редко, но механизм активации используется в других способах производства каркасных материалов.

Медная инфильтрация является наиболее востребованным способом производства каркасных материалов состава молибден-медь. Данный метод заключается в том, что сначала готовится смесь порошка молибдена со связкой - полимерным веществом, способствующим образованию пор во время спекания. Затем полученную смесь прессуют в заготовки и помещают в печь с атмосферой водорода (с температурой до 1600°C) для спекания, при этом связка выгорает. В результате образуется пористая молибденовая структура - каркас будущего материала. После этого молибденовый каркас снова помещают в водородную печь вместе с медной навеской для пропитки [4]. При необходимости во время медной инфильтрации могут применяться активаторы. Получающийся в результате материал обладает свойствами, близкими к теоретически возможным.

Как показала практика производства, каркасные материалы состава молибден-медь, полученные медной инфильтрацией, могут содержать не пропитанные медью поры, локализованные вокруг геометрического центра в объеме полученной заготовки. Для теплоотводов мощных полупроводниковых приборов данный дефект является недопустимым, т. к. не заполненный медью объем заготовки хуже проводит тепло. В результате значительно снижается эффективность отвода тепла от полупроводниковых приборов, что может привести к выходу их из строя.

В процессе производства материалов методом медной инфильтрации было сделано важное наблюдение – скорость пропитки по поверхности заготовки превышает скорость пропитки в ее объеме. Это приводит к раннему закрытию пор в центре заготовки и вся расплавленная медь идет мимо данного участка. Таким образом, в пропитанной заготовке возникает не заполненная медью область.

Предположение о том, что снижение скорости пропитки по поверхности может привести к более однородному заполнению пор заготовки медью, было подтверждено экспериментом.

Эксперимент был поставлен следующим образом: на поверхности спеченной молибденовой заготовки был нанесен слой графита, затем заготовку помещали вместе с медной навеской в водородную печь для проведения инфильтрации. После завершения процесса пропитки, полученная заготовка была изучена на предмет равномерности заполнения

пор медью. Анализ изломов заготовки в продольном и поперечном направлениях показал, что не заполненные медью поры отсутствуют, а, следовательно, полученный материал является вакуумноплотным.

На базе результатов данного исследования был разработан технологический процесс серийного производства каркасных материалов состава молибден-медь. Схема этого технологического процесса и применяемое оборудование представлены на рис. 1.

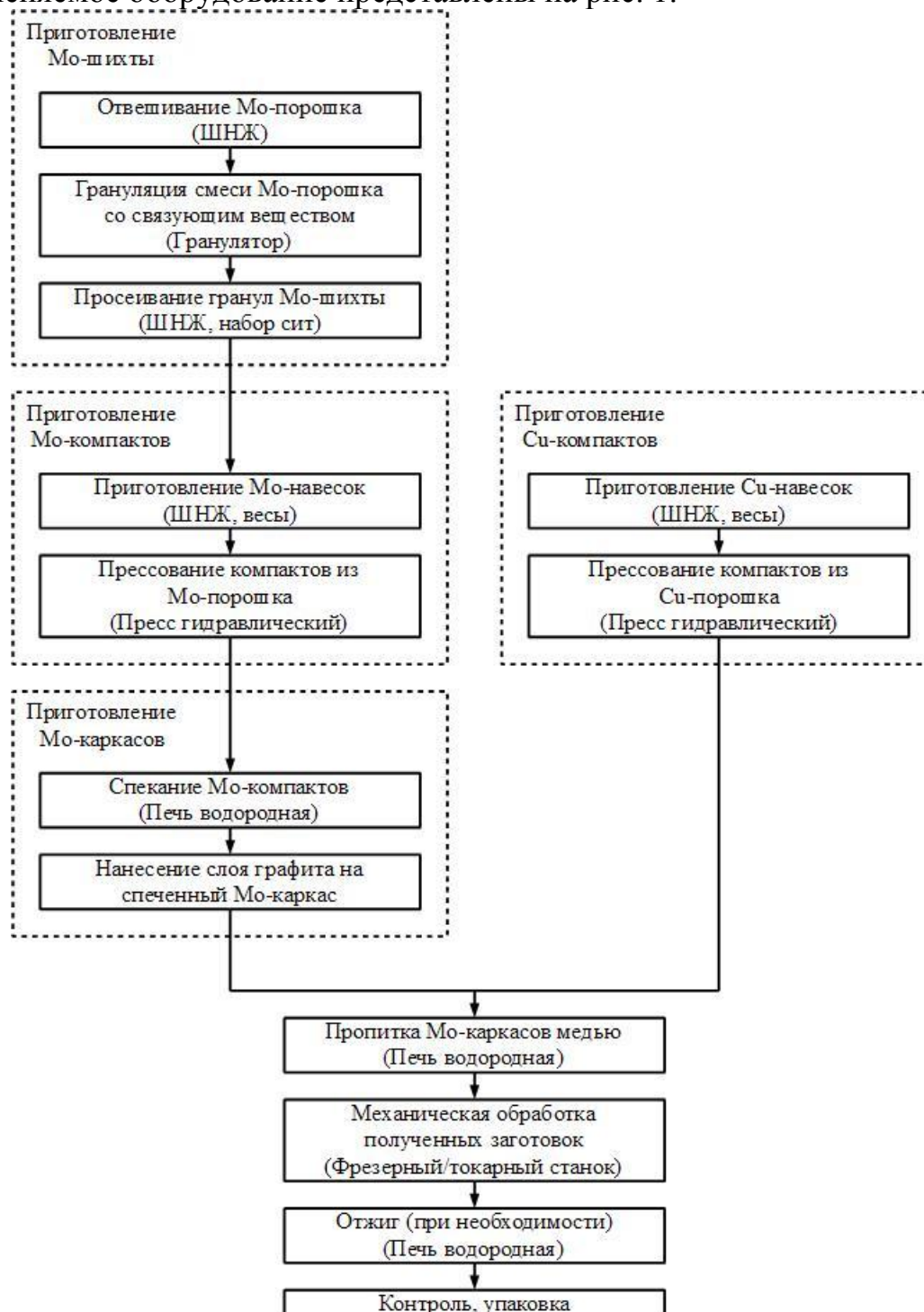


Рис. 1

Сначала готовится молибденовая шихта: для этого в вытяжном нержавеющем шкафу отвешивается необходимое количество молибденового порошка, затем этот порошок вместе со связующим веществом помещается в гранулятор для получения гранул молибденовой шихты, после этого гранулы просеиваются через набор сит для отбора гранул необходимого размера.

На следующем этапе приготавливаются молибденовые и медные компакты, для чего на весах в вытяжном нержавеющем шкафу отвешивается необходимое количество молибденовых и медных навесок, которые затем прессуют в компакты на гидравлическом прессе.

Последующий шаг – изготовление молибденовых каркасов: для этого молибденовые компакты помещают в печь, где в защитной атмосфере водорода их спекают до образования заданного количества пор, при этом связующее вещество выгорает. После извлечения спеченных молибденовых каркасов из водородной печи на них наносят слой графита.

Затем в водородной печи проводят пропитку молибденовых каркасов ранее приготовленными медными компактами.

Полученные в результате пропитки заготовки подвергаются механической обработке на токарно-фрезерном оборудовании в соответствии с требованиями заказчика, при необходимости проводится отжиг деталей в водородной печи.

На заключительном этапе осуществляется контроль и упаковка деталей для отправки заказчику.

Для производства каркасных псевдосплавов на основе молибдена и меди не требуется уникального оборудования и достаточно того, что производится серийно. Так, в разработанном технологическом процессе применяются: ШНЖ (шкаф нержавеющий), гранулятор, набор сит, весы, пресс гидравлический, печь водородная и токарно-фрезерное оборудование.

Исходные материалы: молибден, медь и связующие вещества, также производятся серийно и не требуют предварительной подготовки. Стоит отметить, что в разработанном технологическом процессе не используются специальные вещества-активаторы: никель, кобальт, железо, марганец, хром, ванадий, титан и другие металлы, что положительно сказывается на теплопроводности получаемых материалов, т. к. например, добавление 2 мас.% никеля приводит к двукратному снижению теплопроводности меди [5], а, в итоге, и к снижению теплопроводности всего материала.

Технологический процесс был опробован на практике на базе ООО «Эколюм-Восход» и показал, что достигнутые параметры каркасных псевдосплавов МД-40 и МД-50 близки к теоретическим, а процент выхода годных составил 95%. Теоретические параметры каркасных псевдосплавов МД-40 и МД-50 приведены в таблице 1, а полученные на практике – таблице 2.

Таблица 1

Теоретические параметры каркасных псевдосплавов МД-40 и МД-50

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	ТКЛР, $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Псевдосплав МД-40	248,6	9,722
Псевдосплав МД-50	271	10,984

Таблица 2

Параметры каркасных псевдосплавов МД-40 и МД-50, полученные на практике

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	ТКЛР, $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Псевдосплав МД-40	210-250	7,1
Псевдосплав МД-50	230-270	9,0

Таким образом, решены главные задачи организации серийного производства каркасных псевдосплавов на основе молибдена и меди. Регулярные измерения показали, что достигнутые параметры материалов максимально близки к теоретическим, а также обеспечена их повторяемость. Это положительно повлияло на уровень выхода годной продукции, который составил — 95%. Число технологических операций сведено к минимуму, а уровень механической обработки снижен.

Список литературы

1. Gebauer, Charles L., "Process of Producing Metal Bodies," U.S. Patent No. 1,233,322 (Apr. 17, 1917).
2. Brush Wellman Inc., "Process for Making Improved Copper/Tungsten Composites," U.S. Patent No. 5,686,676 (Nov. 11, 1997).
3. Torrey Hills Technologies, LLC, "Process for Making Copper Tungsten and Copper Molybdenum Composite Electronic Packaging Materials," U.S. Patent No. 2010/0092327, (Apr. 15, 2010).
4. Gillette, Robert T., "Welding Electrode," U.S. Patent No. 1,539,810 (May 26, 1925).
5. *Осинцев О.Е., Федоров В.Н.* Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник. – М.: Машиностроение, 2004. – 336с., ил.

Прасицкий Г.В. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru.

Инюхин М.В. — инженер-технолог КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru.

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

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МДП-ПРИБОРОВ ПУТЕМ ИНЖЕКЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

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

В настоящее время для выявления потенциально ненадежных интегральных схем и полупроводниковых приборов со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), как непосредственно на полупроводниковой пластине, так и в корпусах, применяются радиационно-термическая обработка (РТО). При облучении планарных изделий происходит накопление заряда на дефектах оксидной пленки, что приводит к отказу либо при облучении, либо через некоторое время после облучения [1]. РТО позволяет определить образцы ИМС с аномально низкой радиационной стойкостью, характеризующей аномально низкую надежность [1]. В работах [2-4] была показана идентичность большинства процессов деградации МДП-структур, протекающих при воздействии ионизирующей радиации и при сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик. Замена радиационных обработок сильнополевой инжекцией существенно упрощает процесс испытаний, а также позволяет получить большой объем дополнительной информации за счет контроля изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика в процессе сильнополевого воздействия.

Целью данной работы являлось исследование надежности МДП-приборов до и после инжекционно-термической обработки (ИТО).

Процесс инжекционной обработки заключается в сильнополевой инжекции в подзатворный диэлектрик заряда электронов заданной плотности. Инжекция заряда в диэлектрик обычно осуществляется в режиме поддержания постоянного тока или напряжения при одновременном контроле изменения зарядового состояния диэлектрической пленки. До настоящего времени инжекция заряда в диэлектрик применялась в основном для контроля качества технологических процессов и оценки влияния на МДП-структуры ионно-плазменных, радиационных и сильнополевых воздействий [4]. Вместе с тем, полученные в [5-7] результаты указывают на возможность применения сильнополевой туннельной инжекции для выявления потенциально ненадежных МДП-структур, а также в качестве обработки для выявления и устранения дефектов зарядовой стабильности окислов и, как следствие, повышения надежностных характеристик МДП-структур.

В качестве экспериментальных образцов использовались тестовые МДП-конденсаторы на основе термического диоксида кремния (SiO_2), изготовленные на кремнии n-типа. Двуокись кремния толщиной $30 \div 100$ нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре 1000°C с добавлением 3% HCl . В качестве затвора использовались плёнки поликремния (Si^*) толщиной 0,6 мкм, легированные фосфором до $20 \text{ Ом}/\square$ и пленки алюминия толщиной 1,2 мкм площадью $10^{-4} \div 10^{-2} \text{ см}^2$. Инжекционная обработка МДП-структур заключается в сильнополевой по Фаулеру-Нордгейму инжекции из кремния в подзатворный диэлектрик МДП-структур заряда электронов $0,5 \text{ мКл}/\text{см}^2$ импульсом постоянного тока $0,1 \text{ мА}/\text{см}^2$, при температуре образца от 20 до 100°C .

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем: на полупроводниковой пластине делалась представительная выборка МДП-структур, расположенных в непосредственной близости друг от друга. Данная выборка делилась на две равные группы. К образцам первой группы прикладывалась токовая нагрузка, и они выдерживались до пробоя образца. Вторая группа образцов сначала проходила инжекционную обработку, после чего подвергалась инжекционной нагрузке, подобно первой группе. На рис. 1(а) представлено изменение токовой нагрузки во время инжекционной обработки (сплошная линия) и во время инжекционных испытаний (пунктирная линия). На рис. 1(б) приведена временная зависимость изменения напряжения на МДП-структуре. Участок I на зависимости $V_1(t)$ соответствует заряду емкости МДП-структуры постоянным током I_1 . На этом участке весь ток, протекающий через диэлектрик, является емкостным. Инжекция заряда в диэлектрик начинается при переходе в высоковольтный диапазон (рис. 1, участок II). После окончания процесса заряда емкости МДП-структуры (рис. 1, участок III) весь ток, протекающий через образец, становится инжекционным.

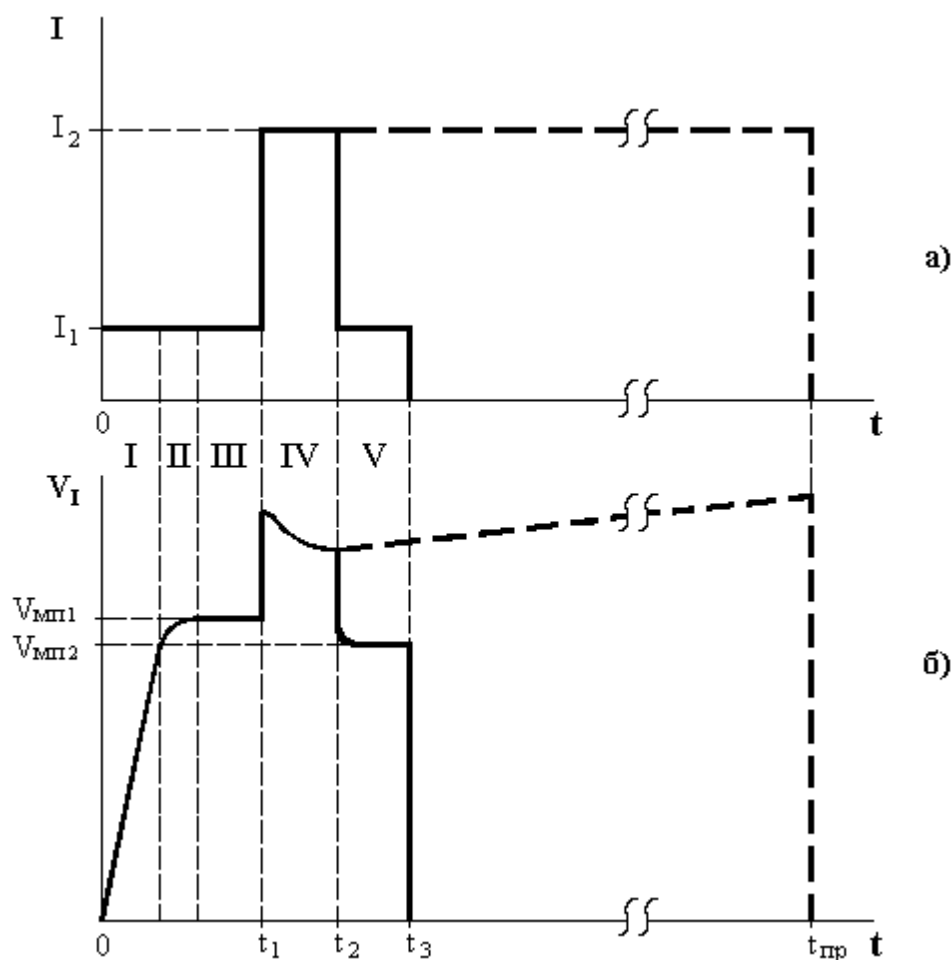


Рис.1

На участке IV (рис. 1), при амплитуде токового воздействия I_2 , осуществляется основная инжекция заряда в диэлектрик, продолжающаяся до его пробоя. Этот участок используется для оценки процессов зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях. При проведении измерений плотности тока инжекции на участках III и IV (рис. 1, б) составляли $j_1=0,1$ мкА/см² и $j_2=0,1$ мА/см² соответственно, а полярность токовой нагрузки обеспечивала сильнополевую туннельную по Фаулеру-Нордгейму инжекцию электронов из кремниевой подложки.

На рисунке 2 показаны относительные гистограммы распределения МДП-структур по величине плотности заряда, инжектированного до пробоя образца, характеризующие проведение инжекционно-термической обработки. Гистограмма 2 на рисунке 2 соответствует группе МДП-структур, прошедших инжекционно-термическую обработку, гистограмма 1 – группе структур, не подвергавшихся обработке.

Из гистограммы (рис. 2) видно, что инжекционно-термическая обработка позволяет выявить и исключить структуры с грубыми дефектами изоляции. В результате, после обработки практически отсутствуют структуры с малым зарядом, инжектированным до пробоя, и при этом не снижа-

ется инжекционный ресурс образцов, что является положительным фактом при проведении ИТО. Благодаря применению инжекционно-термической обработки, происходит достаточно заметное повышение инжекционной и радиационной стойкости МДП-структур (рис. 2), что может быть объяснено образованием более совершенной структуры приборов, поскольку сильнополевая инжекция электронов разрывает напряженные связи в пленке SiO_2 и на границе раздела Si-SiO_2 , а последующий отжиг восстанавливает валентные связи, но уже без их деформации [4].

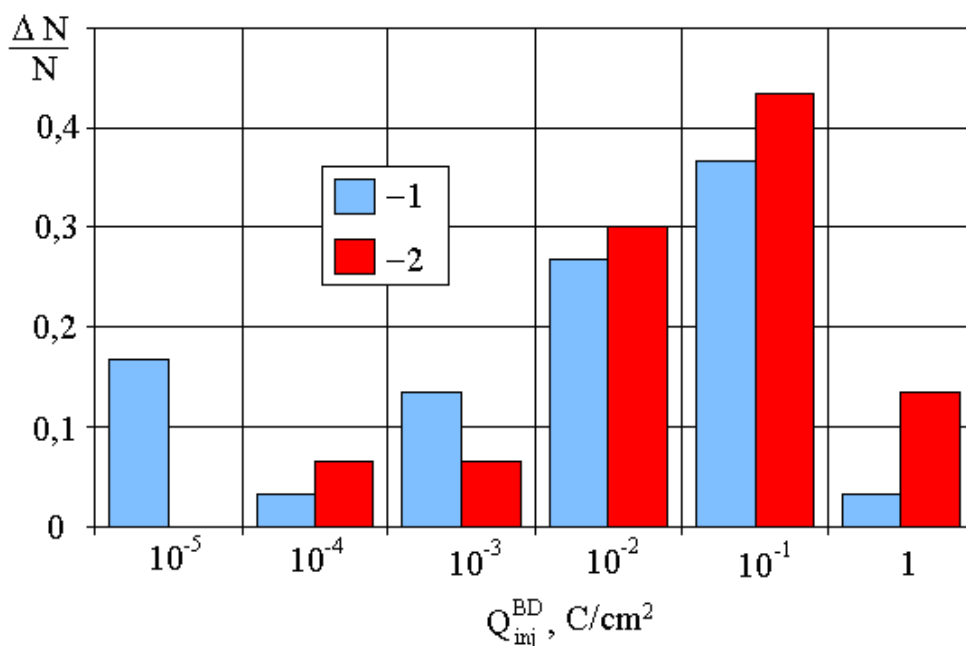


Рис.2

Сравнение гистограмм распределения структур по заряду, инжектированному до пробоя, показывает, что в результате инжекционной обработки, выполненной при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, инжекционная стойкость МДП-структур возрастает по сравнению с исходными образцами. С повышением температуры, при которой проводится инжекционная обработка, данный эффект уменьшается и при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается обратный эффект, приводящий к уменьшению средней величины заряда, инжектированного до пробоя образца. Данное явление, по-видимому, связано с затруднением активации электронных и дырочных ловушек при повышенных температурах. Следовательно, для повышения эффективности инжекционно-термической обработки, инжекцию заряда не следует проводить при повышенных температурах. Таким образом, показано, что инжекционно-термическая обработка позволяет выявить и исключить структуры с грубыми дефектами изоляции и зарядовыми дефектами. В результате, после обработки практически отсутствуют структуры с малым зарядом, инжектированным до пробоя, и при этом практически не снижается ресурс работы приборов на основе МДП-структур. Следовательно, проведение инжек-

ционно-термической обработки позволяет повысить инжекционную и радиационную стойкость наноразмерных диэлектрических пленок МДП-приборов.

Работа выполнена в рамках реализации проекта министерства образования и науки РФ, а также при финансовой поддержке РФФИ и администрации Калужской области (грант № 12-02-97533).

Список литературы

1. Катеринич И.И., Курин Ф.М., Попов В.Д. Метод радиационно-термической обработки и повышения надёжности МОП интегральных схем // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 1996. Вып.3-4. С.127-132.
2. Knoll M., Brauning D., Fahrner W.R. Comparative studies of tunnel injection and irradiation on metal oxide semiconductor structures // J. Appl. Phys. 1982. Vol.53. No.10. P.6946-6952.
3. Андреев В.В., Бедняков А.А., Новиков Л.С., Соловьев Г.Г., Столяров А.А., Лоскутов С.А. Сравнительное исследование зарядового состояния МДП-структур при облучении протонами и инжекции заряда в сильных электрических полях// ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2002. Вып.1-2. С.61-66.
4. 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.
5. 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.
6. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Васютин Д.С., Михальков А.М. Исследование влияния режимов инжекционной модификации на зарядовое состояние подзатворного диэлектрика МДП-приборов // Перспективные материалы. 2009. № 2. С.45-51.
7. Андреев В.В., Столяров А.А., Васютин Д.С., Михальков А.М. Контроль качества диэлектрических слоев интегральных микросхем и изделий микросистемной техники // Научные технологии. 2010. Т.11. № 7. С.44-52.

Андреев Владимир Викторович — профессор, д.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Andreev-EIC@yandex.ru.

Столяров Александр Алексеевич — зам. директора, профессор, д.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: alalstol@mail.ru.

Ахмелкин Дмитрий Михайлович — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Andreev-EIC@yandex.ru.

Аунг Пьо, В.В. Сорочан

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ CDS/CDTE ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

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

В последнее время все более возрастает интерес к альтернативным источникам энергии. Одним из направлений исследований является преобразование солнечной энергии. Солнечные преобразователи в таких технических системах как космические летательные аппараты являются единственным источником энергии, однако и в земных условиях они могут удовлетворить часть потребности в энергии. Исследования в этой области ведутся давно и испытанно большое количество комбинаций материалов для создания фотоэлементов. 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 обзорной работе [2], посвященной солнечным преобразователям, приводятся данные по солнечным элементам на основе CdTe изготовленным различными фирмами. КПД по этим данным достигает 15,8%, коэффициент заполнения 0,746. При этом плотность тока короткого замыкания равна $I_{кз}=26,18 \text{ мА/см}^2$, а напряжение холостого хода $U_{хх} = 0,843 \text{ В}$.

Применение различного рода обработки после получения структуры позволяет повысить эффективность фотопреобразования. Так в работе [1] солнечные элементы ITO/CdS/CdTe/Cu/Au подвергались „хлоридной“ обработке, что приводило к трансформации метастабильной гексагональной модификации теллурида кадмия в стабильную кубическую фазу. При этом КПД возрастал до 10,3%, а коэффициент заполнения (FF) до 0,670. В работе [3] наблюдали увеличение квантового выхода в структурах nCdS/pCdTe при облучении ультразвуком. Это объясняется ростом ширины переходной области $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ при ультразвуковой обработке, которая увеличивает эффективность сбора носителей.

Существует также возможность изготовления солнечных батарей на гибкой основе [4], что расширяет возможности их применения. КПД таких модулей достигает 4,6%, напряжение холостого хода 3,07 В, ток короткого замыкания 0,401 А, фактор заполнения световой ВАХ — 0,53. Полупроводниковые слои таких фотоприемников являются поликристаллическими с мелкими кристаллитами. Время жизни неосновных носителей (электронов) в поглощающем слое CdTe составляет $10^{-10} - 10^{-9}$ с при этом его толщина для эффективного разделения носителей может быть 3–4 мкм[5]. При повышении кристаллического качества поглощающего слоя и увеличении время жизни электронов до величины меньше чем 10^{-8} с ток короткого замыкания возрастет при условии, что толщина слоя CdTe увеличится до 15 – 20 мкм, при массовом производстве солнечных модулей это не целесообразно с экономической точки зрения. Отсутствие необходимости кристаллического совершенства полупроводниковых слоев образующих гетеропереход позволяет применять дешевые технологии получения, удешевляя фотопреобразователи. Одной из таких технологий является химическое поверхностное осаждение на не подогреваемые подложки [6]. Эта технология позволяет получать слои CdS толщиной до 100 нм с приемлемой поверхностной плотностью дефектов $\sim 10^7 \text{ см}^{-2}$ [6].

Исходя из выше изложенного можно сделать вывод, что CdTe солнечные элементы являются достаточно перспективными с широкими возможностями для усовершенствования и оптимизации технологии производства и, следовательно, для снижения себестоимости. А определение оптимальных технологических параметров можно считать актуальной задачей.

Список литературы

1. Хрипунов Г.С. Структурные механизмы оптимизации фотоэлектрических свойств пленочных гетеросистем CdS/CdTe // Физика и техника полупроводников, 2005, Т. 39, вып. 10, С. 1266-1270
2. Гременок В.Ф., Тиванов М.С., Залесский В.Б. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов, Минск, 2007, 223 с.
3. Музафарова С.А., Айтбаев Б.У., Мирсагатов Ш.А и др. Исследование промежуточного слоя на гетерогранице $n^+ \text{-CdS/p-CdTe}$ // Физика и техника полупроводников, 2008, Т.42, №.12, С.1409-1414.
4. Хрипунов Г.С., Черных Е.П., Ковтун Н.А и др. Гибкие солнечные модули на основе сульфида и теллурида кадмия // Физика и техника полупроводников, 2009, Т.43, №.8, С. 1084-1089.

5. *Косяченко Л.А., Савчук А.И., Грушко Е.В.* Влияние толщины поглощающего слоя на эффективность солнечного элемента CdS/CdTe // Физика и техника полупроводников, 2009, Т.43, №.8, С.1060-1064.

6. *Ильчук Г.А., Кусьнэж В.В., Рудь В.Ю. и др.* Фоточувствительность гетеропереходов n -CdS/ p -CdTe, полученных химическим поверхностным осаждением CdS // Физика и техника полупроводников. 2010. Т.44, №.3. С.335-337.

Аунг Пьо — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: arlay48@gmail.com.

Сорочан В.В. — доцент, к.ф.-м.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vsorochan@mail.ru.

Г.В. Прасицкий, М.В. Инюхин

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПСЕВДОСПЛАВНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МОЛИБДЕНА И МЕДИ

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

Большая часть псевдосплавных материалов, применяемых в конструкциях полупроводниковых приборов, производится по единой технологии, разработанной несколько десятилетий назад. Технология предусматривает изготовление заготовок посредством проката порошковой смеси заданного состава, спекание заготовок в защитной или защитно-восстановительной среде и последующую прокатку спеченных заготовок на прокатных станах до получения псевдосплавных полос требуемой толщины.

Параметры полученного материала на момент его освоения вполне соответствовали требованиям разработчиков и производителей полупроводниковых компонентов. Однако существенно возросшие к настоящему времени удельные мощности, соответственно увеличившие выделение тепла, диктуют необходимость достижения предельно возможных параметров псевдосплавных материалов. При этом нередко выявляется невозможность достижения таких параметров без существенного изменения технологии изготовления псевдосплавов.

В общем виде молибдено-медный псевдосплав можно представить в виде последовательно-параллельно соединенных цепочек, содержащих микрообъемы меди, чередующиеся с микрообъемами молибдена. Фотография псевдосплава МД50, приведенная на рис.1, наглядно подтверждает сказанное: видны светлые участки меди, чередующиеся с более темными участками молибдена. На рис.2 предполагаемая структура изображена схематически.



Рис.1.

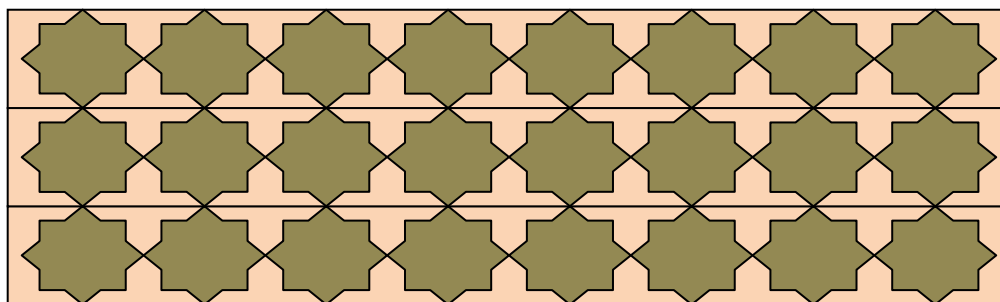


Рис.2.

Важнейшие параметры материала псевдосплава – теплопроводность и электропроводность. Они имеют общую физическую природу и осуществляются на 90-98% валентными электронами, а незначительная оставшаяся часть - фононами. Рассматривая структурную схему, изображенную на рис.2, можно однозначно утверждать, что максимальные значения тепло и электропроводности будут достигаться лишь в том случае, когда цепочки микрообъемов составляющих материалов не будут иметь дефектов, например, отсутствие микрообъемов меди или неполное заполнение медью промежутков между молибденовыми микрообъемами, как изображено на рис.3.

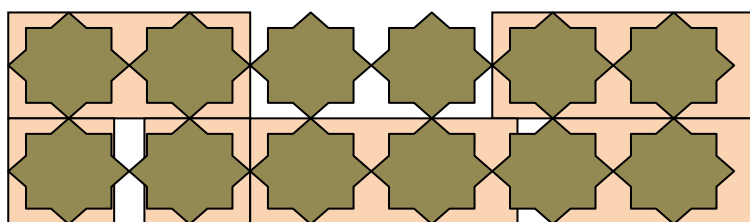


Рис.3.

В противном случае области тепло и электропроводности между микрообъемами молибдена будут иметь пренебрежимо малые размеры, что практически эквивалентно разрыву цепочек проводимости.

Используемая в настоящее время технология производства псевдосплавных материалов типа МД40 и МД50 включает четыре основные операции: смешивание порошков меди и молибдена в заданных пропорциях, прокатка полученной смеси на валковом стане, спекание полученных порошковых заготовок в восстановительной среде (водород) и уплотняющая прокатка спеченных заготовок. В соответствии с режимами, приведенными в [1], спекание производится при температуре 1420К. При этой температуре угол смачивания расплавленной медью молибдена превышает 35° [2], т.е., наблюдается явление ограниченного смачивания. На практике это означает, что отдельные частицы молибдена и их агломераты могут оказаться не контактирующими с медной матрицей, реализуя структуру, приведенную на рис. 3.

Считается, что процессом, устраняющим указанный недостаток, является уплотняющая прокатка спеченных заготовок на валковых станах, позволяющая повысить плотность псевдосплава до 95-97% от теоретиче-

ской. Однако устранить последствия ограниченного смачивания таким методом не удастся: электро- и теплопроводность остаются меньше потенциально возможных. Причина этого факта – множественные хаотично расположенные микрообъемы псевдосплава, заполненные молибденовыми частицами и полностью лишенными меди. Фотография поперечного излома пластины из псевдосплава МД40, прокатанной до толщины 1мм, приведенная на рис 4 подтверждает сказанное: красные области материала, содержащие медь и покрытый медью молибден, разделены отчетливо различными областями, состоящими из набора припеченных молибденовых зерен.

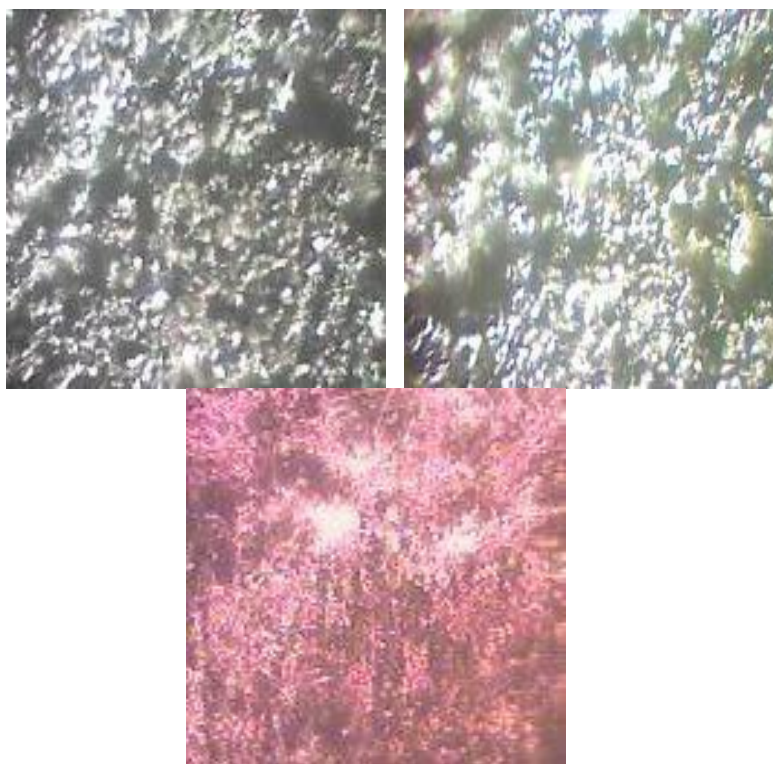


Рис.4.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что для повышения уровня теплопроводности и электропроводности необходимо изменить технологический процесс получения псевдосплавных материалов по крайней мере в той части, где будут созданы условия для полного смачивания расплавленной медью тугоплавкой фазы.

Как показали исследования, проведенные авторами, сохранение относительной простоты технологии и технологического оборудования при конкурентоспособном уровне затрат, реализовать условия полного смачивания в порошковом прокате не представляется возможным. Обоснование подобного утверждения будет изложено в следующих работах.

Наиболее рациональным способом, позволяющим достигнуть максимальных параметров псевдосплавных материалов при сохранении уровня затрат на их изготовление, оказался разработанный технологический процесс, включающий 4 основные операции: прессование тугоплавкой матрицы, спекание до получения жесткого каркаса, пропитка жидкой медью при температуре, обеспечивающей нулевой угол смачивания, прокатка на валковом стане. Фотографии материалов после каждого из перечисленных технологических переходов приведены на рис.5 а, б, в. На рис. 6 приведена фотография поперечного излома пластины из материала МД40, прокатанной до толщины 1мм, изготовленного по технологии пропитки. Как следует из рисунка, поверхность излома изотропна, обедненные медью области отсутствуют. Измеренный коэффициент теплопроводности составляет 240Вт/мК.



а

б

в

Рис.5.



Рис.6.

Список литературы

1. Производство порошкового проката / Под ред. *В.К. Сорокина*. М.: Металлургиздат, 2002. – 296с .
2. Справочник по пайке / Под ред. *С.Н. Лоцманова, И.Е. Петрунина, В.П. Фролова*. М.: Машиностроение, 1975. – 412 с.

Прасицкий Г.В. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru.

Инюхин М.В. — инженер-технолог КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: fn2kf@list.ru.

СЕКЦИЯ 4.

ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ

Д.В. Шевелев, С.А. Сомкин

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА КОГЕНЕРАЦИОННЫХ МИКРОГТУ

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

Проведено исследование термодинамического цикла газотурбинной установки простого и регенеративного цикла. Показано, что при проектировании энергетических установок на базе микроГТУ расчетную степень повышения давления целесообразно принимать в диапазоне от 3,5 до 5. Это обеспечивает высокое значение КПД элементов проточной части турбомашины, высокий отпуск тепла при работе микроГТУ в режиме когенерации. Регенеративная энергетическая установка созданная на базе данной микроГТУ будет оптимальной с точки зрения достижения максимального эффективного КПД и сравнимой по эффективности с газопоршневыми энергетическими установками.

Ключевые слова: микроГТУ, когенерация, простой цикл, регенеративный цикл

Введение

Рынок энергетических установок относится к разряду консервативных. Большинство потребителей электрической энергии традиционно пользуются услугами оптовых генерирующих компаний (ОГК). Тем не менее, существует и постоянно увеличивается доля потребителей, для которых продукция крупных производителей электроэнергии либо недоступна, либо неприемлема по тем или иным причинам. К ним, прежде всего, относятся поселения и предприятия расположенные в труднодоступных районах, спецтехника и оборудование использующие электрическую энергию нестандартных параметров, системы резервного тепло- и электро-снабжения. Для указанных категорий потребителей электрической энергии, наиболее востребованный диапазон мощностей энергетического оборудования – от десятков до нескольких сотен киловатт. К числу основных требований, предъявляемых к подобным установкам относятся, прежде всего, надежность и простота эксплуатации, малые габариты и масса, низкая цена и эксплуатационные расходы [1].

Основу рынка энергетического оборудования для распределенного производства энергии, до недавних пор, составляли газопоршневые установки и дизель-генераторы (ДВС). К числу основных достоинств данных установок следует отнести высокий электрический КПД – до 40%, большой ресурс, высокая ремонтпригодность. Недостатками ДВС являются значительные размер и масса, большой расход масла, недостаточно высокая надежность из-за большого числа трущихся деталей, ограничение времени работы на неполной мощности. Указанных недостатков лишены газотурбинные установки малой мощности (микроГТУ). Компактность, простота конструкции, возможность длительной автономной работы, низкий уровень выбросов, вибраций, шума, легкость и быстрота запуска делают микроГТУ основным конкурентом газопоршневым установкам и дизель-генераторам на рынке оборудования для распределенного производства энергии. Кроме того, микроГТУ позволяют параллельно с электрической производить в большом количестве тепловую энергию для работы систем горячего водоснабжения, отопления, осуществления разнообразных технологических процессов.

Основным недостатком ГТУ является низкая топливная экономичность по сравнению с ДВС. Однако, анализ областей применения микроГТУ [2] показывает, что высокий КПД не является главным требованием предъявляемым к этим энергоустановкам. Кроме того, высокая температура выхлопных газов позволяет параллельно с электрической производить тепловую энергию в виде горячей воды или пара – осуществлять когенерацию.

Постановка задачи

Базовая конструкция микроГТУ типична – это одноступенчатый центробежный компрессор 1, кольцевая или индивидуальная камера сгорания 2 и центростремительная турбина 3 [3]. Ротор турбины – одновальный, с безредукторным приводом высокооборотного электрогенератора 4, выдающего электрическую энергию в сеть через преобразователь частоты (Рис. 1). Турбина двигателя, как правило, неохлаждаемая, так как малые размеры проточной части не позволяют использовать сложные системы охлаждения. Цикл – простой или регенеративный.

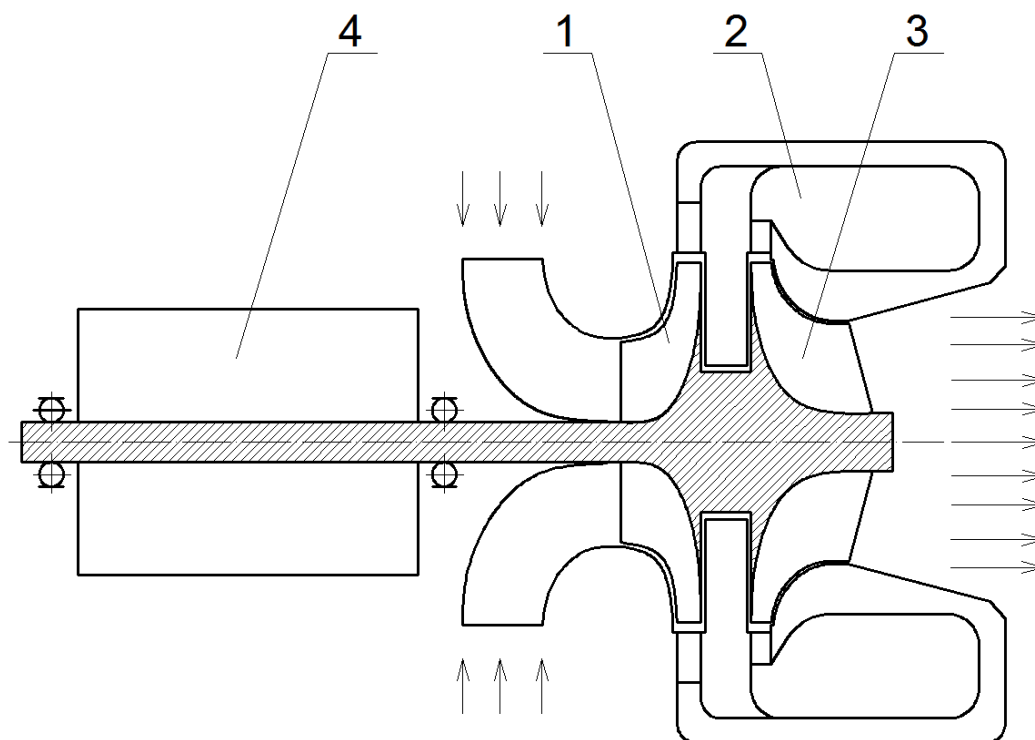


Рис. 1 – Конструктивная схема МикроГТУ:

1 – центробежный компрессор; 2 – кольцевая камера сгорания; 3 – центростремительная турбина; 4 – высокооборотный электрогенератор

Выбор оптимальных параметров микроГТУ на этапе термодинамического расчета базируется на анализе цикла Брайтона. Выбор степени повышения давления в компрессоре и соответствующей ей удельной работы двигателя определяет во многом эффективность всей энергетической установки, которая, основываясь на базовой проточной части, может реализовывать как простой так и регенеративный цикл, цикл с утилизацией тепла выхлопных газов.

Расчетная модель

В основу термодинамического расчета газотурбинного двигателя была принята математическая модель второго уровня [4] в основе которой лежат уравнения работы отдельных элементов двигателя, законы определяющие физическую взаимосвязь между элементами двигателя с учетом изменения теплоемкости и расхода рабочего тела и заданием коэффициентов характеризующих потери в элементах двигателя.

Рассматривались схемы ГТУ простого цикла, простого цикла с регенерацией тепла, регенеративного цикла и регенеративного цикла с утилизацией тепла (Рис. 2).

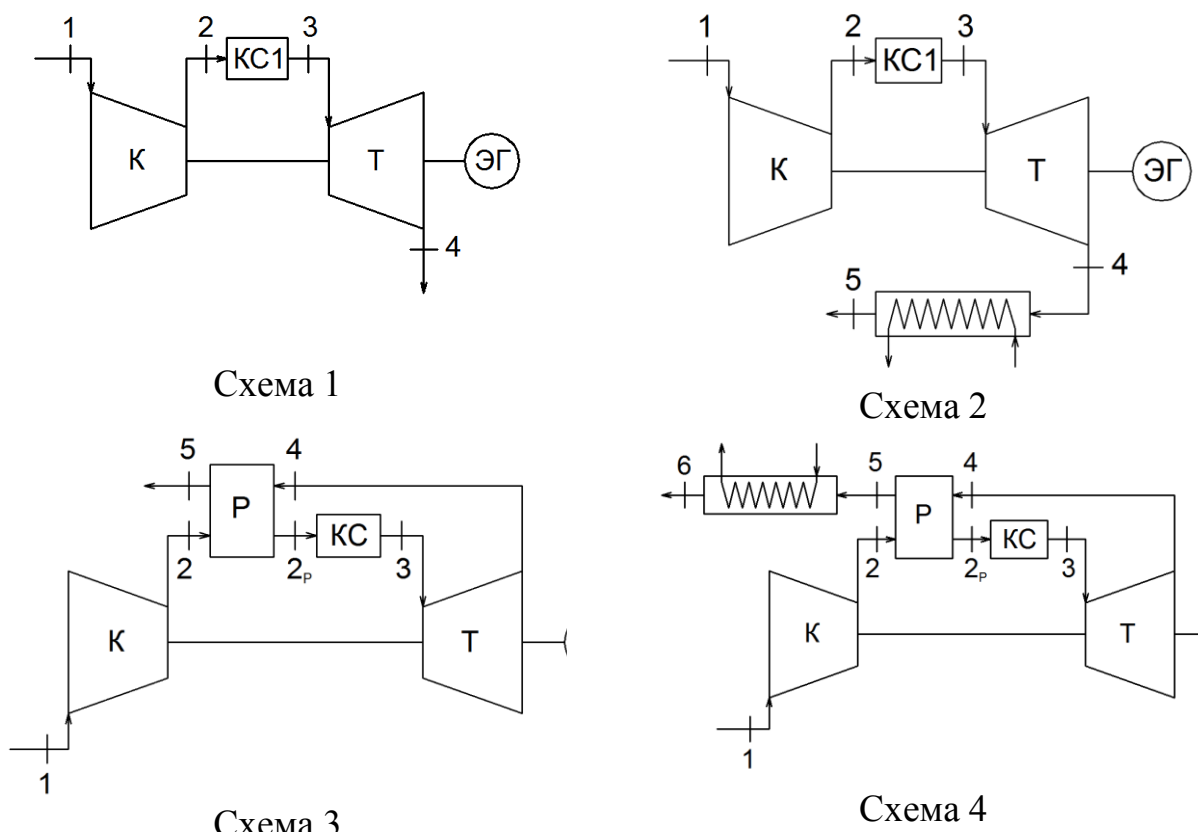


Рис. 2 – Термодинамические схемы микроГТУ

Исходные данные для термодинамического расчета – характерные для современных микроГТУ [3]: политропный КПД компрессора – $\eta_{кп}=0,8$; адиабатный КПД турбины $\eta_{та}=0,89$; коэффициенты восстановления полного давления: во входном устройстве $\sigma_{вх}=0,99$, в камере сгорания $\sigma_{кс}=0,96$, в системе газоудаления турбины $\sigma_{вых}=0,99$; механический КПД $\eta_{мех}=0,985$. коэффициенты восстановления полного давления по горячей и холодной стороне $\sigma_{гор}=\sigma_{хол}=0,97$; температура газа на выходе из котла-утилизатора $T_5=393\text{ K}$ ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$); топливо – метан.

Полученные результаты

На Рис. 3 приведены результаты расчета термодинамического цикла ГТУ простой схемы – зависимость удельных параметров простого цикла микроГТУ от степени повышения давления. С ростом начальной температуры газов T_3 , растет эффективный КПД цикла и удельная работа, оптимальная степень повышения давления смещается в сторону более высоких значений π_k .

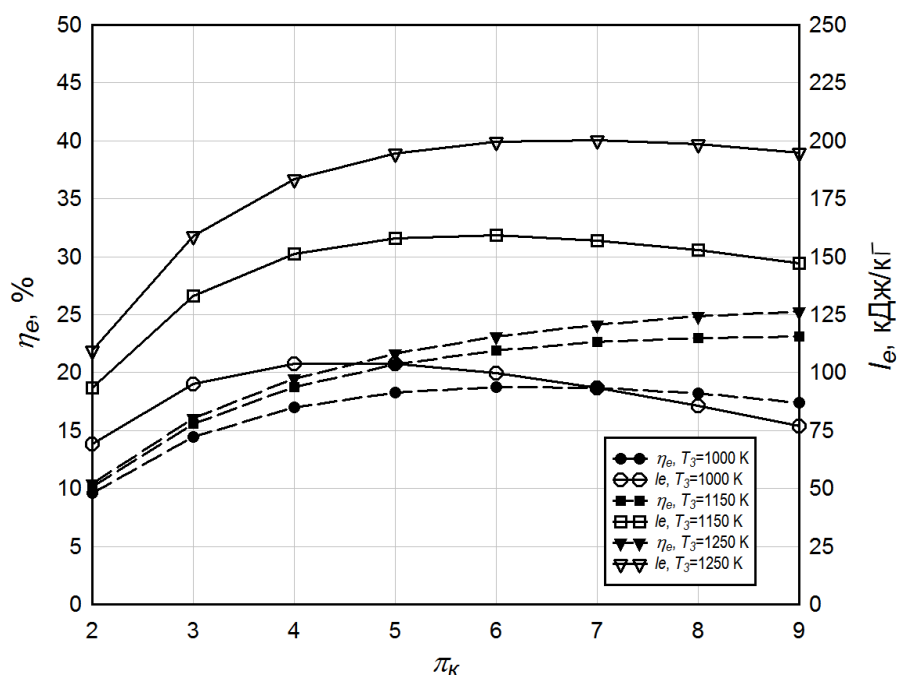


Рис. 3 Зависимость удельных параметров простого цикла микроГТУ от степени повышения давления

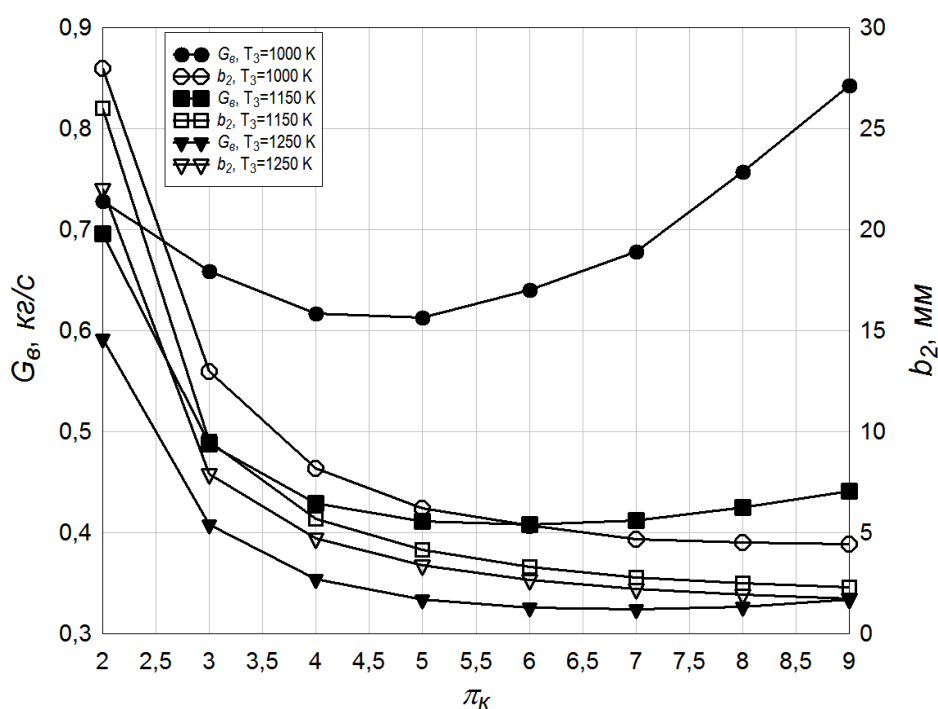


Рис. 4 Зависимость расхода воздуха и высоты лопатки на выходе из рабочего колеса ЦБК от степени повышения давления в цикле

Выбор максимальной температуры газов перед турбиной T_3 и π_κ , в отличие от ГТУ большой и средней мощности, здесь обусловлен конструктивными особенностями микроГТУ. Увеличение указанных параметров ведет к повышению удельной работы и снижению потребного расхода воз-

духа для обеспечения заданной мощности. Для микроГТУ это приводит к крайне малым высотам элементов проточной части двигателя. Так, на Рис. 4 представлен потребный расход воздуха G_6 и расчетная (по методике [5]) высота лопатки на выходе из рабочего колеса центробежного компрессора b_2 .

Уменьшение минимальной высоты проточной части ниже 4 мм ведет за собой резкое снижение КПД ключевых элементов двигателя – компрессора и турбины. Поэтому, целесообразным является уменьшение расчетного степени повышения давления с 8...9 до 4...5, и получение приемлемых высот проточной части.

Уменьшение π_k относительно оптимального значения по эффективному КПД термодинамического цикла, может быть также оправдано, если планируется создание когенерационной энергетической установки. При фиксированной начальной температуре газа, уменьшение π_k приводит к росту температуры выхлопных газов T_4 и, следовательно, позволяет получить больше тепловой энергии в котле утилизаторе.

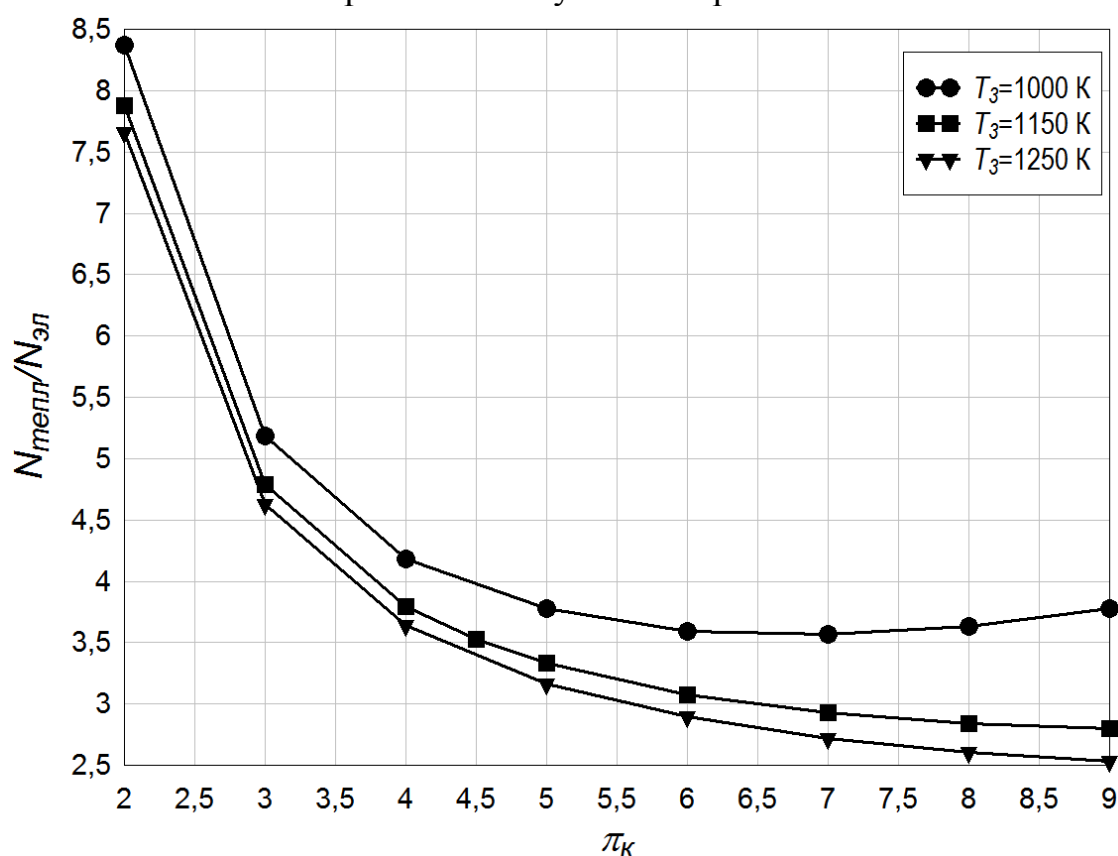


Рис. 5 Зависимость отношения мощности тепловой нагрузки к электрической для МикроГТУ простого цикла

Рис. 5 иллюстрирует зависимость отношения тепловой и энергетической нагрузок когенерационной микроГТУ от степени повышения давления в цикле.

На Рис.6 представлена зависимость коэффициента использования топлива от степени повышения давления в цикле.

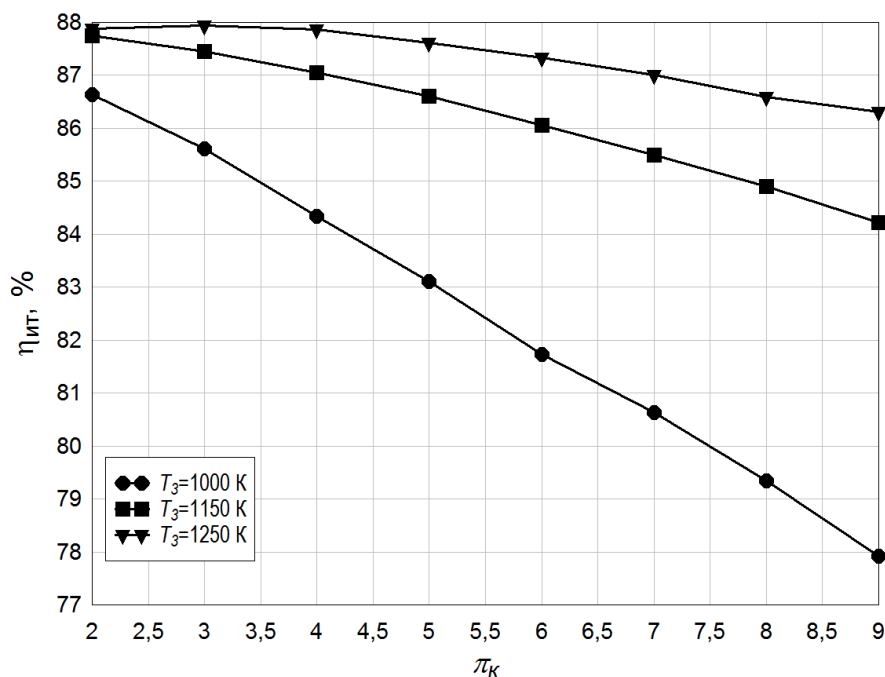


Рис. 6 Зависимость коэффициента использования тепла топлива от степени повышения давления

Низкая степень повышения давления микроГТУ позволяет создать более эффективную регенеративную энергетическую установку на базе проточной части ГТУ простого цикла, так как оптимальная степень повышения давления в регенеративном цикле смещается в сторону малых значений π_k (Рис. 7).

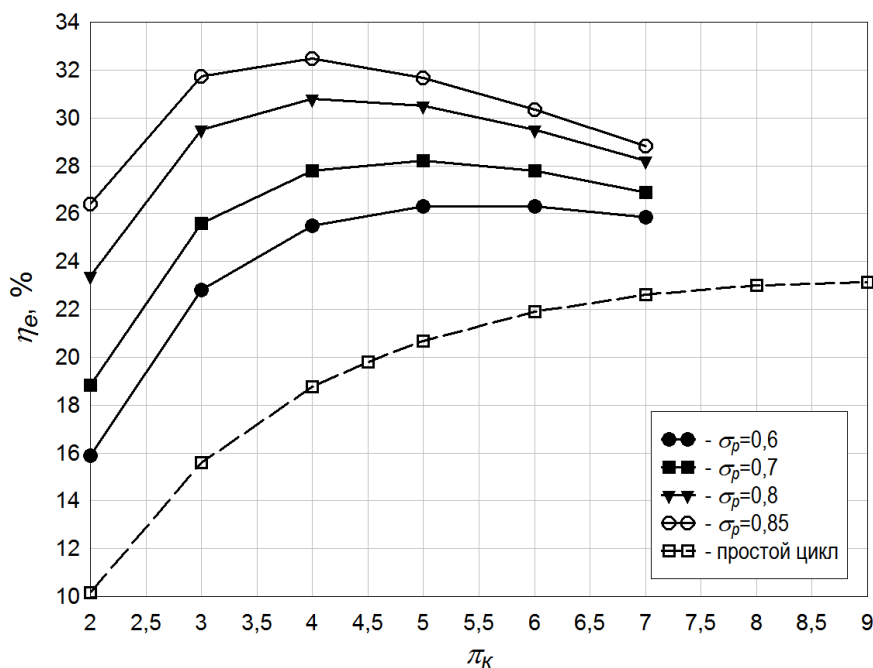


Рис. 7 Зависимость эффективного КПД простого и регенеративного цикла микроГТУ от степени повышения давления

Установка регенератора на микроГТУ простого цикла позволит увеличить эффективный КПД двигателя при некотором снижении мощности и коэффициенте использования топлива (Рис. 8).

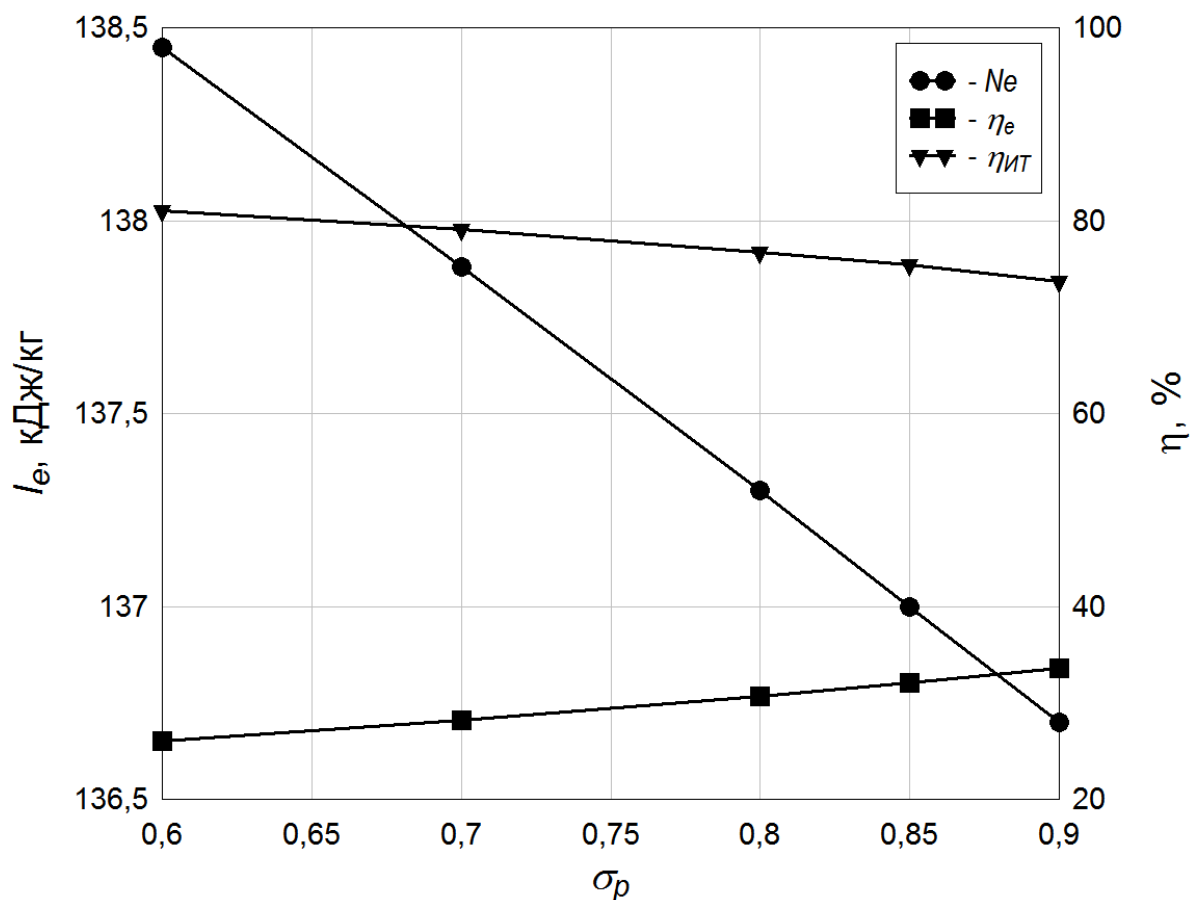


Рис. 8 Зависимость мощности, эффективного КПД, коэффициента использования тепла топлива микроГТУ регенеративного цикла от степени регенерации

Снижение удельной мощности двигателя при увеличении степени регенерации объясняется влиянием дополнительных гидравлических потерь вносимых регенератором, а уменьшение коэффициента использования топлива – уменьшением температуры выхлопных газов.

Для энергетической установки мощностью $N_e=72$ кВт с начальной температурой газа $T_3=1150$ К была выбрана расчетная степень повышения давления $\pi_k=4,5$. Расчетный расход воздуха $G_e=0,41$ кг/с. Эти параметры позволяют получить приемлемую минимальную высоту проточной части турбомшины – около 4 мм, что обеспечивает адекватность заданных в расчете КПД компрессора и турбины.

В таблице 1 приводится сравнение параметров рассчитанной микроГТУ с газопоршневой установкой Caterpillar G3306 механической мощностью $N_e=72$ кВт [6].

Заключения и выводы

При проектировании энергетических установок на базе микроГТУ расчетную степень повышения давления целесообразно принимать в диапазоне от 3,5 до 5. Это обеспечит высокое значение КПД элементов проточной части турбомашин (компрессора, турбины), повысить отпуск тепла при работе микроГТУ в режиме когенерации. Регенеративная энергетическая установка созданная на базе данной микроГТУ будет оптимальной с точки зрения достижения максимального эффективного КПД и сравнимой по эффективности с газопоршневыми энергетическими установками.

Таблица 1

Сравнение параметров микроГТУ и газопоршневой установки

Параметр	микро- ГТУ простого цикла	микроГТУ регенера- тивного цикла, $\sigma_p=0,8$	газопоршне- вая установка
Мощность, N_e , кВт	72	72	72
Топливо	биогаз		
Низшая удельная теплота сгорания топлива, Q_n^p , кДж/нм ³	23300		
η_e , %	19,8	30	30
Расход продуктов сгорания на выходе, G_T , кг/с	0,429	0,421	0,09
Температура газа на выходе, T_4 , К	856	587	828
Тепловая нагрузка, $N_{тепл}$, кВт (120°C)	231	95	52
$N_{тепл} / N_{эл}$	3,2	1,3	0,72
Длина x ширина x высота, м	$\sim 0,76 \times 2,0 \times 2,0$ ¹		3,2x1,3x1,7
Масса, кг	~ 1000 ¹		~ 2000

¹ – ориентировочно, с учетом [7].

Список литературы

1. Martin Pehnt, Martin Cames. Micro Cogeneration. Towards Decentralized Energy Systems. Springer. 2006.
2. Claire Soares. Microturbines. Elsevier, 2007
3. Moore M.J. Micro-turbine Generators. Bury St Edmunds and London, UK. 2002, 107 p.
4. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник/В.И. Бакулев, В.А. Голубев и др.; Под редакцией В.А. Сосунова, В.М. Чепкина – М.:Изд-во МАИ, 2003. – 688 с.
5. Бекнев В.С., Куфтов А.Ф., Тумашев Р.З. Расчет и проектирование центробежных компрессоров ГТД. – Москва: Издательство МГТУ, 1996 г.
6. <http://rossiya.cat.com/cda/layout?m=333535&x=97&f=416505>
7. <http://www.microturbine.com>

Шевелев Д.В. — доцент, к.т.н КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: denis.v.shevelev@gmail.com.

Сомкин С.А. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: somkin.sa@gmail.ru.

D.V. Shevelev, S.A. Somkin

OPTIMAL PARAMETERS OF THE THERMODYNAMIC CYCLE COGENERATION GAS MICROTURBINE

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 24800, Russia

Studies of the thermodynamic cycle of a gas turbine installation and a simple regenerative cycle carried out in this article. It is shown that for the design of power plants based on microturbine calculated pressure ratio appropriate to take in the range of 3.5 to 5. It provides high efficiency value of the turbine setting and large heat output of microturbine when operating in cogeneration mode. Renewable energy plant established on the basis of the microturbine will be optimal in terms of achieving maximum efficiency and comparable in efficiency with gas piston power plants.

Key words: microturbine; cogeneration; simple cycle; regenerative cycle

Shevelev D.V., docent, ph.D of the Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: denis.v.shevelev@gmail.com.

Somkin S.A., student of Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: somkin.sa@gmail.ru.

А.Н. Блябляс, М.А. Корепанов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ТРУБЕ

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

В статье описывается поведение паровоздушной смеси при глубоком ее охлаждении. С учетом конвективного теплообмена, моделируется пленочная конденсация смеси на стенках трубы. Рассмотрено влияние режима течения газовой смеси на теплообмен и конденсацию.

Ключевые слова: *Конденсация, тепломассообмен, движение пленки, гидрогазодинамика, паровоздушная смесь, режим течения, модель течения.*

Актуальность

Актуальность вытекает из потребностей практики. Пришло время, появились методы и средства, чтобы уровень развития науки достиг необходимой высоты.

Исследовательская работа направлена на увеличение коэффициента полезного действия уже существующих технологий конденсирования газовых смесей.

Существует настоятельная потребность оптимизации технологий конденсирования для нужд общества, практики, экономики.

Исследование массообмена в пленочных течениях конденсата позволит найти наиболее эффективные режимы течений, что повысит эффективность массообменных аппаратов.

Введение

Одним из основных направлений энергетической политики развитых стран является максимальное энергосбережение при производстве различных видов продукции, в том числе тепловой и электрической энергии.

Наиболее перспективными путями экономии ресурсов являются уменьшение массогабаритных характеристик теплообменников, в частности, конденсаторов, и экономия топливно-энергетических ресурсов при использовании теплоты конденсации уходящих газов при их глубоком охлаждении.

Процесс конденсации газообразного вещества нашел широкое применение в различных областях техники, особенно в нефтяной промышленности, ТЭЦ, АЭС и другой энергетике.

Существующие на сегодняшний день методики расчета поверхностей теплообмена охладителей (конденсаторов) не позволяют конструктору в полной мере изменять при расчете различные параметры, влияющие на теплообмен.

Цели исследовательской работы

Развитие методов группового анализа для построения и исследования новых подмоделей, описывающих теплообмен, конденсацию и движение сжимаемой жидкости и газа при больших давлениях, низкой и высокой температуре, что приведет к решению задачи по минимизации размеров охладителя.

Теоретическое исследование влияния волновых режимов, интенсивности охлаждения стенки, скоростных и температурных характеристик на массообмен в тонкой пленке вязкой жидкости, стекающей по вертикальной поверхности при двумерных волновых режимах.

Для достижения указанной цели решаются следующие задачи:

1. Моделирование процесса охлаждения паровоздушной смеси через тонкую стенку теплообменника.
2. Моделирование процесса пленочной конденсации на внутренней стенке трубы.
3. Выяснение основных механизмов массообмена.
4. Анализ зависимости массообмена от режимов течений, и поиск оптимальных скоростных, температурных и волновых режимов.

Формирование проблемы. Направления и методы решения

Обстоятельный обзор известных исследований говорит о том, что в большинстве случаев, конструктивная схема узла конденсирования газовой фазы выбирается произвольно. Длина, материал трубок теплообменника, а так же тип и температура охлаждения подбираются очень грубо и обобщенно, в основном, используя табличные данные прошлого века. Интенсивность охлаждения, скорость газовой фазы на процесс конденсации оказывает так же огромное влияние. Все эти «стандартизованные» допущения, несомненно, увеличивают массогабаритные параметры узла конденсирования газовой фазы.

Зачастую, случается и так, что параметры конденсатора не соответствуют свойствам охлаждаемого газа, что, как правило, влечет за собой не полную массоотдачу конденсата, то есть, не рациональное использование ресурса, снижение КПД узла конденсирования и установки в целом.

Моделирование процессов позволит значительно сократить затраты на проведение экспериментальных исследований по тепло-массообмену и в ряде случаев даже заменить их теоретическими предсказаниями.

Методология постановки и решения поставленных задач

Дискретная модель

Для моделирования процессов теплообмена, конденсации и массопереноса рассматривается массообменный аппарат, рабочий участок которого представляет собой вертикальную непроницаемую трубу. Паровоздушная смесь - однофазная двухкомпонентная среда, подается из распределяющего устройства в верхней части рабочего участка с определенной скоростью, давлением, температурой и расходом. Снаружи стенка трубы охлаждается интенсивно циркулирующей жидкостью. За счет передачи тепла от паровоздушной смеси в охлаждающую жидкость через тонкую стенку трубы, доля пара, достигая давления насыщения, выпадает в осадок на внутреннюю стенку трубы, образуя тем самым тонкую пленку воды на поверхности.

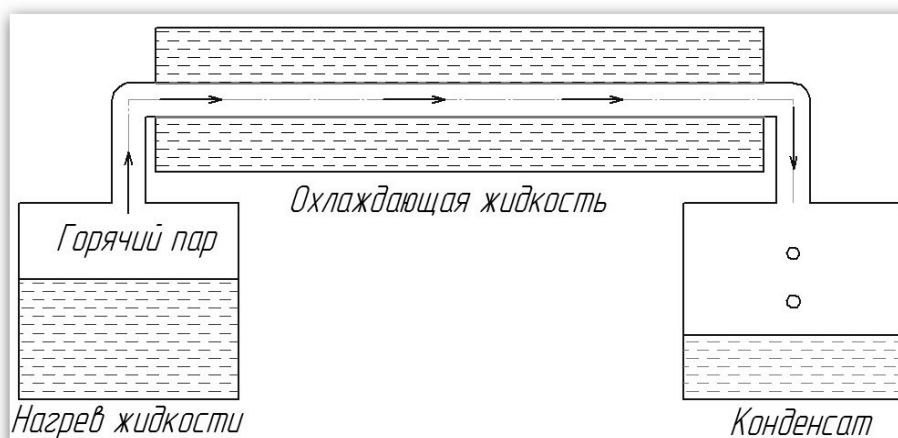


Рисунок 1 - Конденсация пара в жидкость

Поскольку в процессе конденсации не весь пар меняет агрегатное состояние, а лишь его часть, поэтому и рассматриваемая среда является двухфазной, многокомпонентной.

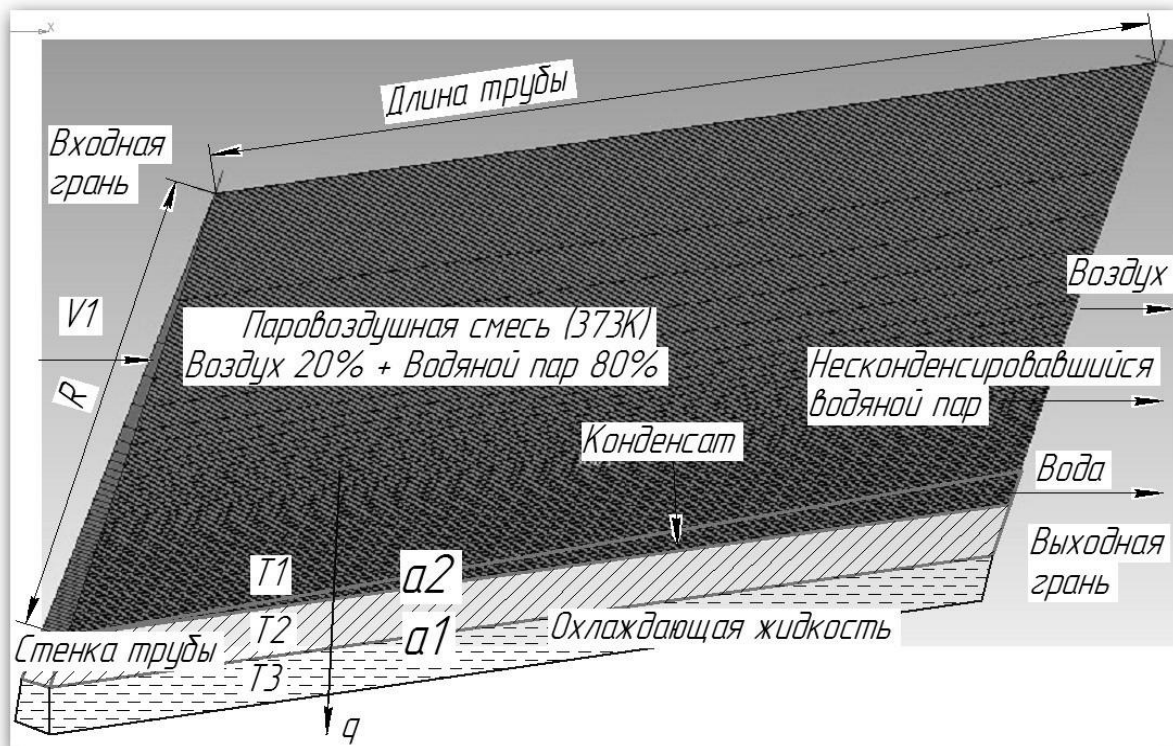


Рисунок 2 - Постановка двухмерной задачи

Начальные и граничные условия

- Расчетная область длины трубки 1000мм
- Внутренний диаметр трубки 8мм
- Толщина стенки трубки 1мм
- Материал трубки нержавеющая сталь (Коэффициент теплопроводности 17,5 Вт·К)
- Время моделирование процесса конвективного теплообмена и конденсации 10с
- Шаг по времени 0,005с
- Учет сил гравитации $-9,81\text{м/с}^2$ (Совпадает с движением газа в трубе)
- Учет поверхностного натяжения пленки в зависимости от температуры стенки ($T=373\text{K}$, $\sigma=58\text{ мН/м}$. $T=293\text{K}$, $\sigma=72\text{ мН/м}$)
- Скорость паровоздушной смеси в диапазоне 1...30м/с
- Температура газовой среды на входе в трубу 373K
- Состав смеси: Водяной пар 80%, Воздух 20% (Азот 75%, Кислород 23%)
- Температура охлаждающей жидкости в диапазоне 274...290K
- Начальная температура стенки равна температуре охлаждающей жидкости
- Давление в системе 1МПа

- Используемая модель турбулентности: k-ε (Данная модель наиболее универсальна для широкого диапазона чисел Рейнольдса)

Математическая модель

Теплообмен при пленочной конденсации пара

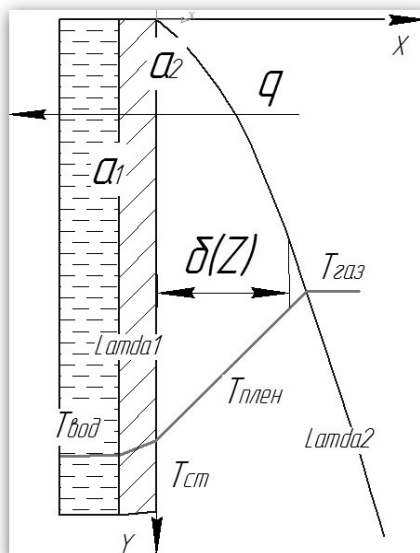


Рисунок 3 - Теплообмен при пленочной конденсации пара

Пленка конденсата является большим термическим сопротивлением передаче тепла фазового перехода от поверхности конденсации к стенке.

Из закона Ньютона-Рихмана $q = \frac{\lambda_2}{\delta(z)} (T_{\text{нас}} - T_{\text{cm}}) \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ Плотность теплового потока

$$q = \alpha (T_{\text{нас}} - T_{\text{cm}})$$

$$\alpha = \frac{\lambda_2}{\delta}$$

δ – толщина пленки

λ_2 – коэффициент теплопроводности

$T_{\text{с}} = 373 \text{ [K]}$ Температура газовой смеси

$T_{\text{cm}} = 274 \text{ [K]}$ Начальная температура стенки

$T_{\text{охл}} = 274...285 \text{ [K]}$ Температура охл. жидкости

$$\alpha_1 = 2500 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{K}} \right] \text{ Коэф. теплоотдачи к внешней среде}$$

$$\alpha_2 = 3000...15000 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{K}} \right] \text{ Расчетный коэф. теплоотдачи к внутренней среде (труба / газ)}$$

α_2 напрямую зависит от толщины пленки

$\delta(z) = 0...0,98 \text{ [мм]}$ Текущая толщина пленки

$$\lambda_1 = 17,5 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{K}} \right] \text{ Коэффициент теплопроводности для нержавеющей стали}$$

$$\lambda_2 = 0,66 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{K}} \right] \text{ Коэффициент теплопроводности для конденсата}$$

Моделирование условий теплообмена и конденсации

В данной постановке задачи, течение паровоздушной смеси выполняется в диапазоне скоростей 2...30 м/с, решаются уравнения конвективного теплообмена и скорости фазового перехода. Температура газовой смеси на входе в трубу равна 373 К. Рабочее давление в системе узла конденсирования 1 МПа. Начальная температура стенки равна температуре охлаждающей жидкости, которая в настоящей постановке задачи составила 274 К. Коэффициент теплоотдачи, определяемый интенсивностью циркуляции охлаждающей жидкости и наружной стенки трубы выбирался по статистическим данным и составил 2500 Вт/м²·К. Коэффициент теплопроводности для трубы из нержавеющей стали составляет 17,5 Вт/м·К. Поскольку жидкостная пленка является большим термическим сопротивлением, теплопроводностью воды пренебрегать не следует. Коэффициент теплопроводности воды 0,66 Вт/м·К.

Очевидно, что увеличение скорости потока горячей паровоздушной смеси на входе в трубу, приводит к более глубокому прогреву стенок по длине трубы. Учитывая, что увеличение интенсивности теплоотдачи через развитую волновую пленку интенсивнее на 21% по сравнению с ламинарным безволновым течением, наиболее оптимальными, с точки зрения теплообмена принимаются режимы со скоростью паровоздушной смеси от 4 до 14 м/с.

Разумеется, эти характеристики справедливы только для текущей постановки задачи. Увеличению массообмена может поспособствовать увеличение интенсивности циркуляции и снижения температуры охлаждающей жидкости.

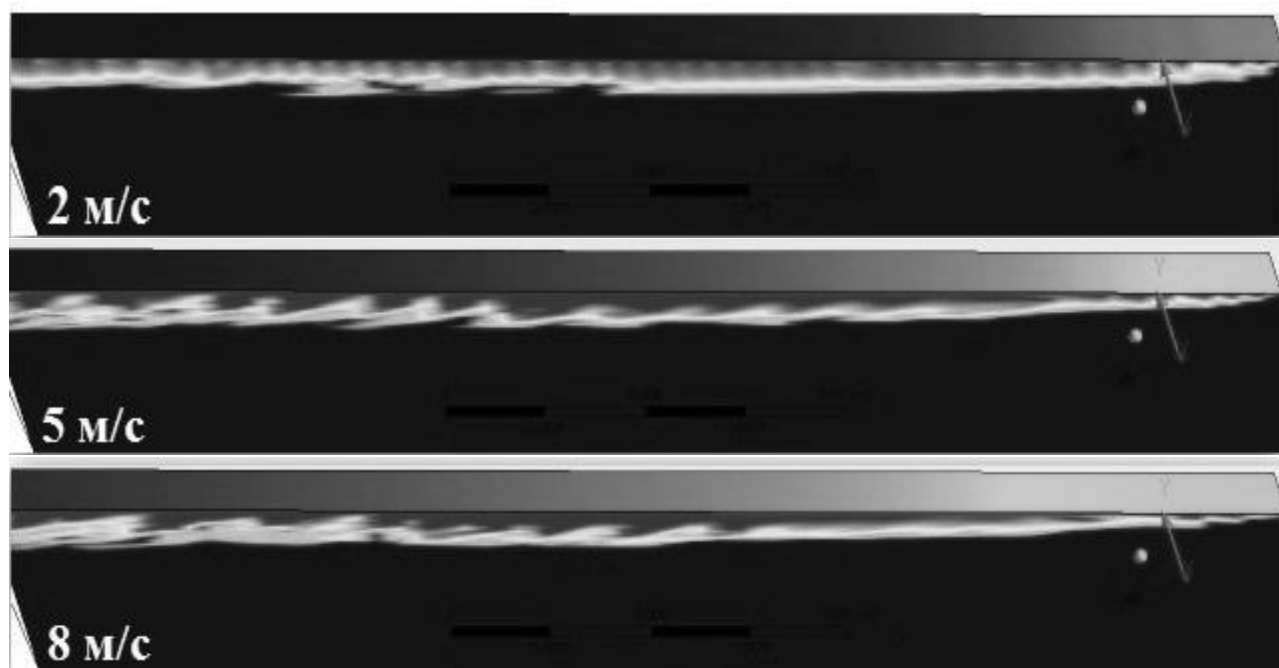




Рисунок 4 - Моделирование реального случая конденсации в диапазоне скоростей паровоздушной смеси 2...30[м/с]
(Направление движение газовой смеси - справа налево)

Динамика поверхностных волн

В динамике поверхностных волн можно выделить несколько характерных областей: на стенке образуется тонкая пленка жидкости, из случайного колебания возникают линейные волны с пространственным периодом, затем амплитуда волн растет.

Естественные волны возникают в результате развития случайного колебания вызванного воздушным потоком с постоянной скоростью, в силу неустойчивости плоского течения.

Регулярные волны возникают из за периодических колебаний расхода жидкости на входе. Ввожу допущение, что охлаждающая жидкость стенки трубы циркулирует интенсивно, теплообмен и конденсация происходит равномерно, поэтому в данной постановке задачи регулярные волны не рассматриваются.

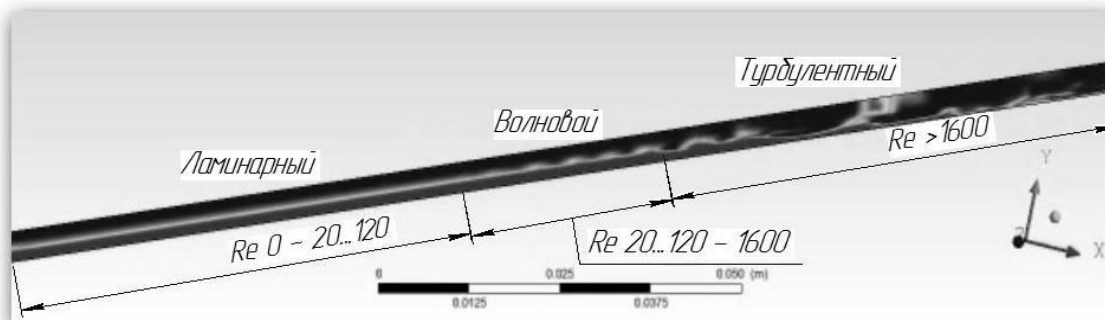


Рисунок 5 – Динамика поверхностных волн

Для жидких пленок возможны три основных режима течения: ламинарный, волновой и турбулентный [1]. Однако, эта классификация не совсем точна, и режимы скорее следует назвать ламинарным безволновым, неламинарным волновым и турбулентным. Области существования этих трех основных режимов течения определяются с помощью критических значений числа Рейнольдса.

Переход от ламинарного течения пленки к турбулентному определяется по величине числа Рейнольдса пленки.

1. Обычный режим вязкого течения жидкости с относительно постоянной толщиной пленки и числах Re не превышающих $20 \div 120$;
2. Волновой режим течения при $Re > 20 \div 120$, когда наряду с поступательным движением в жидкости возникает волновая компонента;
3. При Re примерно равном 1600 волновой режим течения переходит в турбулентный.

Влияние интенсивности охлаждения на распределение конденсатной пленки при постоянной скорости течения паровоздушной смеси

Интенсивность охлаждения наружной стенки трубы, несомненно, оказывает первоочередное влияние на теплообмен с окружающей средой и процесс конденсации в целом.

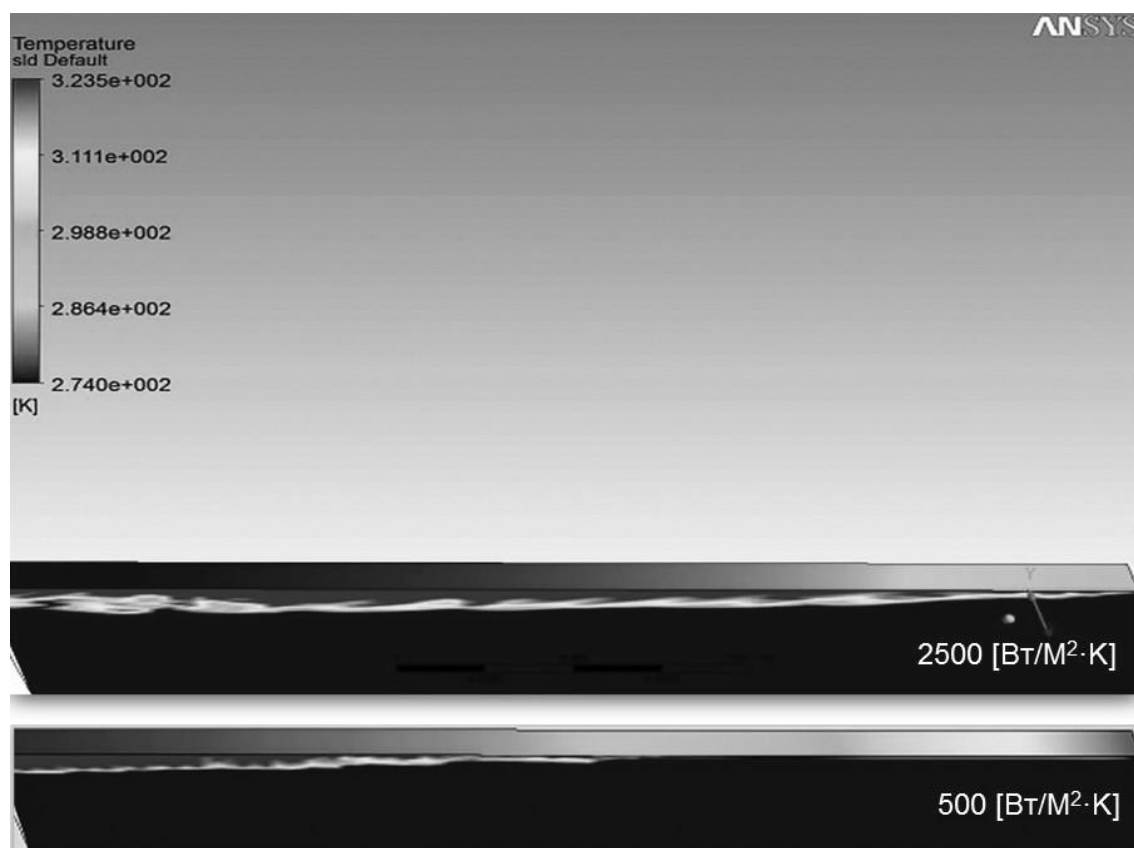


Рисунок 6 – Влияние интенсивности охлаждения на распределение конденсатной пленки при скорости течения паровоздушной смеси 10 [м/с]

Увеличение интенсивности циркуляции охлаждающей жидкости способствует стабилизации температурного состояния стенки трубы, оптимального для конденсирования паровоздушной смеси, на большей части расчетной области. В противном случае, прогрев стенки приведет к отсутствию условий для конденсации пара на данном участке трубы, что, несомненно, отразится на КПД узла конденсирования газовой фазы.

Распределение температуры по стенке трубы и парогазовой смеси

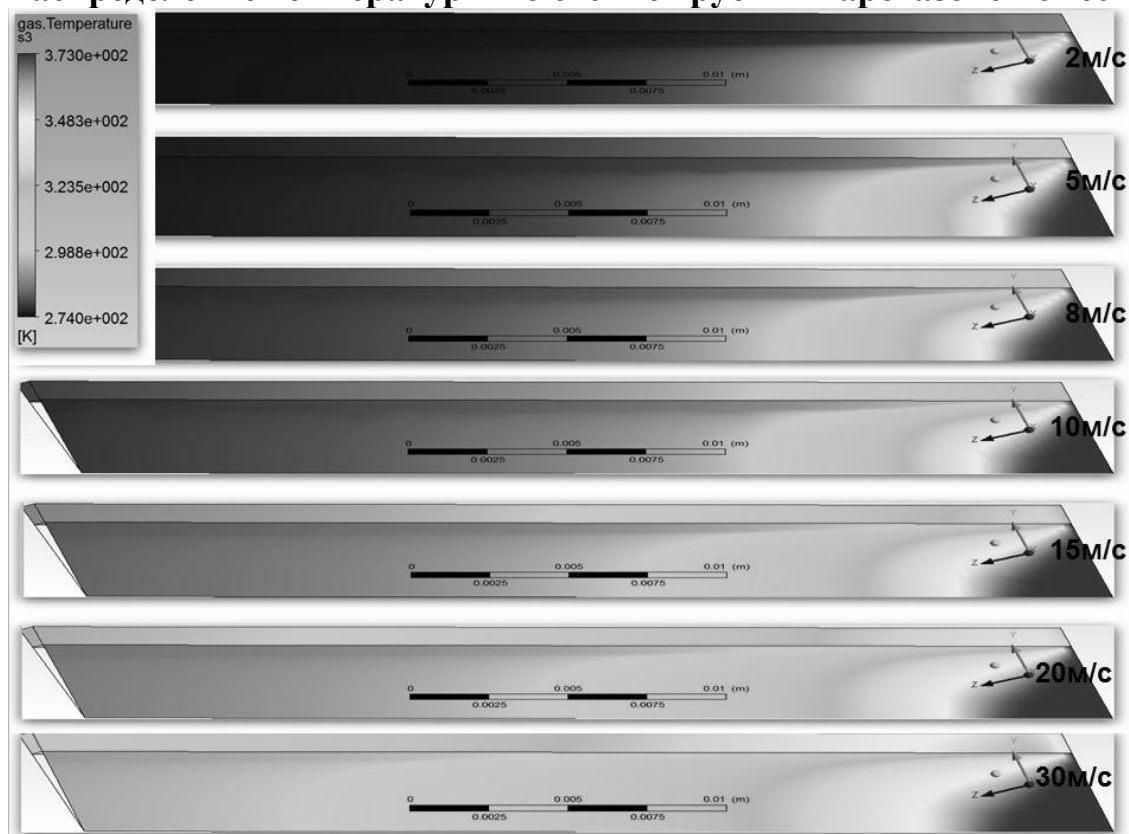


Рисунок 7 – Распределение температуры по стенке трубы и парогазовой смеси

Изучение распределения температуры по стенке трубы и парогазовой смеси является основополагающей задачей при проектировании и расчетах конденсаторов, охладителей и массообменных аппаратов.

Ни для кого не секрет, что увеличение скорости смеси на входе в трубу приводит к более глубокому прогреву трубы по ее длине. С увеличением скорости движения газа, необходимо увеличивать интенсивность охлаждения, либо понижать температуру охлаждающей жидкости, для наиболее эффективного использования длины трубки теплообменного аппарата.

Установлено, что при постоянной температуре паровоздушной смеси 373 К, постоянного теплоотода от стенки трубы 2500 Вт/м²К, Длины трубки узла конденсирования 1 м недостаточно, уже при скорости 15 м/с. Рабочая область трубы прогревается полностью, что не позволяет конденсировать пар в жидкость в полном объеме.

Заключение

В работе исследовано влияние волновых режимов, интенсивности охлаждения стенки, скоростных и температурных характеристик на массообмен в тонкой пленке вязкой жидкости, при двумерных волновых режимах, возникающих при конденсации паровоздушной смеси.

Выводы и результаты работы:

1. Построена полная картина теплообмена, конденсации и волновых режимов на поверхности слоя сконденсированной жидкости.
2. Определены границы существования каждого режима течения тонкой пленки конденсата, проведен анализ соответствующих волновых структур на различных режимах течения.
3. Смоделирован режим течения ламинарного, волнового и турбулентного характера. Установлены критические точки существования каждого режима течения.
4. Сравнение результатов эксперимента и расчетных исследований позволяет сказать, что для используемого диапазона скоростей газовой фазы на входе (1...30 м/с), волновой характер течения пленки конденсата является более устойчивым и оптимальным.
5. Определено влияние интенсивности охлаждения на процесс конденсации жидкости с учетом прогрева стенки трубы по ее длине от температуры газа на входе в трубу.
6. Решена задача определения зависимости толщины слоя вязкой жидкости на поверхности стенки трубы и скорости стекания жидкости от температуры, интенсивности охлаждения трубы, скорости паровоздушной смеси и сил гравитации.
7. Даны рекомендации по установке на внутреннюю стенку трубы резьбовых насечек, которые будут провоцировать возникновение развитого волнового режима.
8. Даны рекомендации по установке на внешнюю стенку трубы оребрения различных форм, для турбулизации потока охлаждающей жидкости, что, несомненно, увеличит интенсивность охлаждения стенки трубы.

Список используемых литературных источников.

1. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
2. Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Влияние волн на процессы переноса. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992. С. 191—207.
3. Капица П.Л. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости: в 3 ч.
4. Ч. 1 Свободное течение // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1948. Т. 18. Вып. 1. С. 1—28.
5. Нефть и углеводородные газы в современном мире: М. М. Судо, Р. М. Судо — Москва, ЛКИ, 2008 г.- 256 с.
6. Нефть. Вчера, сегодня, завтра: Р. Т. Чердабаев — Санкт-Петербург, Юнайтед Пресс, 2010 г.- 352 с.

7. Капица П.Л., Капица С.П. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости: в 3 ч. Ч. III. Опытное изучение волнового режима течения // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1949. Т. 19. Вып. 2. С. 105—120.

Блябляс Александр Николаевич — аспирант ИМ УрО РАН. E-mail: sas5939@yandex.ru.

Корепанов Михаил Александрович — доцент, д.т.н. ИМ УрО РАН. E-mail: kma@udman.ru.

A.N. Blyablyas

MODELING OF HYDROGASDYNAMIC PROCESSES AT CONDENSATION OF A STEAM-AIR MIX IN A PIPE.

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 24800, Russia

In this article models of condensation of a steam-air mix in various conditions are considered. Studying of heat exchange, condensation and mass exchange in condensate films – the classical problem of a hydraulic gas dynamics having not only the theoretical importance, but also possessing a big range of technological appendices. By the author it is established that today there are no theories yet, fully, steam-air mixes describing condensation as existing theories are based on the simplified equations. The competitor in the research uses universal program system of the final and element analysis of ANSYS. Means of SAPR (CAE) ANSYS inc. (CFX) is investigated for the first time a hydromechanics of a current of a liquid film and heat exchange at condensation of a steam-gas mix in a pipe. In article the behavior of a steam-air mix is described at its deep cooling. Taking into account convective heat exchange, it is modelled film mix condensation on pipe walls. This area of science is a little studied and demands further researches. The author described influence of a mode of a current of a gas mix on heat exchange and condensation. By the competitor it is proved that application of optimum temperature, high-speed and wave modes will allow to optimize parameters of existing mass-exchanged installations and to increase their efficiency to several times.

Key words: Condensation, heat exchange, film movement, wave mode, hydraulic gas dynamics, steam-air mix, current mode, mass exchange, current model.

Blyablyas A.N., assistant. E-mail: sas5939@yandex.ru.

А.А. Жинов, П.А. Милов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ СМЕСЕВОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТУРБИНЫ

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

В настоящей статье приводится сравнение различных аналитических методов вычисления вязкости смеси газов H_2O и CO_2 при различных их концентрациях и параметрах, характерных для проектируемой высокотемпературной турбины.

Ключевые слова: *высокотемпературная турбина, смесевое рабочее тело, вязкость*

Характеристики распространенных в турбоустановках рабочих тел, таких как водяной пар или смесь продуктов сгорания углеводородного топлива с воздухом, в традиционных для современных турбомашин диапазонах параметров достаточно хорошо изучены.

Совершенствование турбоустановок требует перехода на более высокие параметры рабочих тел, а зачастую и на нетрадиционные смесевые рабочие тела, например, на смесь водяного пара и углекислого газа. Их характеристики, особенно в области высоких температур и давлений, зачастую изучены слабо.

Например, вязкость рабочего тела во многом определяет эффективность турбоустановки и ее эксплуатационные характеристики. При течении рабочего тела в турбине, вязкость – это один из главных параметров, от которого зависят потери в лопаточном аппарате. При моделировании течения в проточной части высокотемпературной турбины, рабочим телом в которой является смесь водяного пара и углекислого газа, необходимо достоверно определить теплофизические параметры такой смеси в широком диапазоне температур и давлений. Существует множество аналитических и экспериментальных методов для такого определения. В подавляющем большинстве случаев экспериментальное измерение дорого или невозможно и необходимо использовать аналитические методики расчета.

В настоящей статье приводится сравнение различных аналитических методов [1...4] вычисления вязкости смеси газов H_2O и CO_2 при различных их концентрациях и параметрах, характерных для проектируемой высокотемпературной турбины.

Предварительно был определен процентный состав газовой смеси, работающей в турбине, молекулярные веса компонент и вязкости чистых веществ, входящих в смесь, при параметрах течения в турбине. Вязкость смесового рабочего тела определялась как величина обратная текучести.

1. Метод суммирования парциальных вязкостей. Модель Грэхма[1].

Уравнения такого рода представляют вязкость смеси газов как сумму парциальных вязкостей компонент входящих в смесь. Метод предполагает, что полный момент в смеси является суммой моментов переносимых каждой отдельной компонентой. На этом основании вводится понятие парциальной вязкости.

Уравнениям этой группы недостает описательной силы, когда речь заходит о взаимодействиях разных молекул в смеси. Взаимодействие учитывается подгонкой вязкостей чистых компонент. Сама подгонка обычно осуществляется добавлением дополнительных членов (b_i) в уравнение.

Данная модель наиболее проста, в ней вязкость смеси газов получается посредством суммирования произведения вязкостей (μ_i) каждой компоненты и их мольных долей (x_i).

$$\mu_{mix} = \sum_i (x_i \mu_i b_i) \quad (1)$$

Такая модель хорошо работает для смесей, в которых компоненты имеют схожую молекулярную массу. Если молекулярные массы сильно различаются, отклонение свойств смеси, рассчитанных по этой модели от реальных свойств, как правило, достаточно велико.

2. Методика Уилки [2]. Данный метод использует другой подход – применение уравнения, выведенного из кинетической теории, которое может быть расширено на многокомпонентные системы. Для вычисления необходим сложный коэффициент (ϕ_{ij}) для каждой пары компонент в смеси. Для вычисления этого коэффициента необходимы только вязкости и молекулярные веса отдельных компонент.

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2}{\frac{4}{\sqrt{2}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{1/2}} \quad (2)$$

Затем этот коэффициент используется в расчете вязкости смеси наряду с мольной долей:

$$\mu_{mix} = \frac{\mu_1}{1 + \left(\frac{x_2}{x_1}\right)\phi_{12} + \left(\frac{x_3}{x_1}\right)\phi_{13} + \dots} + \frac{\mu_2}{1 + \left(\frac{x_1}{x_2}\right)\phi_{21} + \left(\frac{x_3}{x_2}\right)\phi_{23} + \dots} + \dots \quad (3)$$

Уравнение 3 можно переписать в общем виде:

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{1 + \frac{1}{x_i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_j \phi_{ij}} \quad (4)$$

Каждое слагаемое представляет собой парциальную вязкость одной компоненты. Знаменатель каждого слагаемого берет в учет взаимодействия между разными молекулами, посредством прямого индивидуального регулирования парциальной вязкости для каждой компоненты.

3. Уравнение Хернинга и Зипрера[3]. Данный метод рассчитывает парциальные вязкости без вычисления коэффициента Уилки:

$$\mu_{mix} = \frac{\sum (\mu_i x_i \sqrt{M_i})}{\sum (x_i \sqrt{M_i})} \quad (5)$$

Это сумма парциальных вязкостей, умноженная на квадратный корень из молекулярной массы каждой компоненты.

4. Метод Дэвидсона[4]. В этом методе вязкость рассматривается как сопротивление жидкости при передаче момента. Чем больше вязкость, тем меньше будет возмущение среды на заданном расстоянии от точки приложения силы. Введение парциальных вязкостей в рассмотренных выше методах является приближением, основанным на опытных данных лишь для нескольких исследованных смесей. Физических оснований для предположения аддитивности парциальных вязкостей нет.

Уравнение Максвелла рассматривает вязкость газа как произведение средней длины свободного пробега молекул, плотности и средней скорости на некоторую константу С:

$$\mu = C \cdot l \cdot \rho \cdot V \quad (6)$$

Различные интерпретации кинетической теории показывают разные значения константы C в диапазоне от 0,31 до 0,5.

Средняя длина свободного пробега молекулы может быть определена как средняя скорость молекул, деленная на частоту столкновений с другими молекулами:

$$l = \frac{V}{z} \quad (7)$$

Средняя длина свободного пробега не является простой функцией состояния или состава среды. Полная частота столкновений является суммой частот столкновений z_{ij} между всеми возможными парами молекул:

$$z = \sum_{i,j} z_{ij} \quad (8)$$

Частота столкновений молекул z_{ij} пропорциональна их концентрации. Следовательно, z является суммой слагаемых второй степени, отражающих концентрации.

Так как текучесть является свойством обратным вязкости, то её можно рассматривать, как способность жидкости передавать момент. Этот параметр напрямую связан с полной частотой столкновения молекул.

Скомбинировав уравнения 6, 7 и 8 для выражения текучести, получим:

$$f = \frac{\sum_{i,j} z_{ij}}{C\rho V^2} \quad (9)$$

В смеси газов, при тепловом равновесии, средняя кинетическая энергия (K) каждой молекулы связана с постоянной Больцмана (k) и абсолютной температурой (T) следующим соотношением:

$$K = \frac{3kT}{2} \quad (10)$$

Кинетическая энергия молекулы газа определяется как:

$$K = \frac{mv^2}{2} \quad (11)$$

Если рассматривать V как молярный объем газа, плотность как $\frac{m}{V}$, тогда знаменатель в правой части уравнения 9 примет вид:

$$C_p v^2 = \frac{3CkT}{V} \quad (12)$$

Это выражение пропорционально температуре и не зависит от состава смеси.

Текучесть газовой смеси включает поправки, основанные на частоте столкновения молекул, которые учитываются заданием концентраций и свойств компонент. Ниже приводится уравнение для расчета текучности смеси, вязкость же берется как обратная ей величина.

Мольная доля часто используется для отражения концентрационных свойств смесей, одновременно текучесть и вязкость связаны лишь с передачей момента от одной точки среды к другой. Это позволяет предположить, что текучесть смеси газов должна зависеть от импульса отдельных его компонент, а не от их концентраций. В данной методике доля момента является главным параметром вместо мольных долей или концентраций.

Импульс связан с весом молекулы и температурой. Импульс p определяется как:

$$p = mv \quad (13)$$

Найдем связь импульса с температурой используя уравнения 10 и 11:

$$p = \sqrt{3mkT} \quad (14)$$

При температурном равновесии температуры всех компонент смеси одинаковы. Таким образом, средний импульс каждой компоненты пропорционален корню квадратному её молекулярного веса. Вышеприведенное уравнение Хернинга-Зиппера эквивалентно сумме зависящих от момента импульса парциальных вязкостей.

Доля момента y_i для компоненты определяется как часть полного момента импульса в смеси. Если мольную долю компоненты представить как x_i то количество момента, связанного с этой долей, будет равно $x_i \sqrt{3MkT}$, а доля момента связанная с компонентой, имеющей молекулярный вес M_i становится:

$$y_i = \frac{x_i \sqrt{M_i}}{\sum_i (x_i \sqrt{M_i})} \quad (15)$$

Частота столкновений между двумя типами молекул z_{ij} может быть представлена как произведение их долей импульса:

$$z_{ij} = y_i y_j \quad (16)$$

Таким образом, текучесть чистого газа зависит от квадрата среднего импульса молекул.

Нижеприведенное уравнение со скалярным коэффициентом смешивания B_{ij} используется для выражения текучести газовой смеси:

$$f = \sum_{i,j} (y_i \cdot y_j \cdot f_{ij} \cdot B_{ij}) \quad (17)$$

При $i \neq j$ f_{ij} представляет собой эффективную текучесть взаимодействия между i -той и j -той компонентой.

Когда $i = j$ f_{ij} отражает текучесть чистого газа i при тех же самых смесевых давлении и температуре. Текучесть взаимодействия может быть рассчитана как:

$$f_{ij} = \frac{1}{\sqrt{\mu_i} \sqrt{\mu_j}} \quad (18)$$

Скалярные коэффициенты B_{ij} связаны с эффективностью передачи импульса между молекулами при столкновении. В применении к чистому газу коэффициент $B_{ij} = 1$ в уравнении 17 при $i = j$. В случае, если $i \neq j$ B_{ij} будет зависеть от веса молекул участвующих в столкновении.

Уравнения сохранения импульса и энергии включают в себя массы, начальные и конечные скорости:

$$m_1 V_{1i} + m_2 V_{2i} = m_1 V_{1f} + m_2 V_{2f} \quad (19a)$$

$$\frac{m_1 V_{1i}^2}{2} + \frac{m_2 V_{2i}^2}{2} = \frac{m_1 V_{1f}^2}{2} + \frac{m_2 V_{2f}^2}{2} \quad (19b)$$

V_{1f} и V_{2f} могут быть найдены с помощью алгебраического решения вышеприведенных уравнений:

$$V_{1f} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} V_{1i} + \frac{2m_2}{m_1 + m_2} V_{2i} \quad (20a)$$

$$V_{2f} = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} V_{2i} + \frac{2m_1}{m_1 + m_2} V_{1i} \quad (20b)$$

Умножив уравнение 20а на m_1 получим выражение для импульса компоненты 1:

$$m_1 V_{1f} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} m_1 V_{1i} + \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} V_{2i} \quad (21)$$

Эффективность воздействия компоненты 2 на компоненту 1 может быть представлена с помощью деления второго слагаемого на первоначальный момент компоненты 2:

$$E_{21} = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \quad (22)$$

$$E_{12} = \frac{2m_2}{m_1 + m_2} \quad (23)$$

Средняя эффективность этого взаимодействия измеренного для момента смеси равна:

$$E_{1,2} = \frac{y_1 E_{12} + y_2 E_{21}}{y_1 + y_2} \quad (24)$$

Уравнение 23 можно упростить, применив выражение 15:

$$E_{1,2} = \frac{2\sqrt{m_1}\sqrt{m_2}}{m_1 + m_2} \quad (25)$$

Это выражение принимает максимальное значение при одинаковых массах. Кроме того, оно неотрицательно и симметрично относительно перемены индексов.

Коэффициент B_{ij} предполагается зависимым от $E_{i,j}$, зависимость выражается степенным законом:

$$B_{i,j} = E_{i,j}^A \quad (26)$$

Параметр А предполагается одинаковым для смесей и является единственной эмпирической константой в уравнении смешивания.

Принимая во внимание уравнение 26, учитывающее эффект влияния неодинаковости взаимодействующих масс на передачу момента импульса, из выражения 16 можно вывести следующее соотношение для газовой смеси:

$$f = \sum_{i,j} \left(\frac{y_i y_j}{\sqrt{\mu_i} \sqrt{\mu_j}} E_{i,j}^A \right) \quad (27)$$

Выражение 26 легко применимо к смесям с любым количеством компонент.

В случае двухкомпонентной смеси выражение 27 примет вид:

$$f_{1,2} = \frac{y_1^2}{\mu_1} + 2 \frac{y_1 y_2}{\sqrt{\mu_1} \sqrt{\mu_2}} E_{1,2}^A + \frac{y_2^2}{\mu_2} \quad (28)$$

По всем рассмотренным выше методикам проведен расчет вязкости рабочего тела на входе в ЦВД и в ЦСД высокотемпературной турбины при $T_{0цвд} = 850^\circ\text{C}$ и $P_{0цвд} = 13\text{МПа}$ и $T_{0цсд} = 850^\circ\text{C}$ и $P_{0цсд} = 3,2\text{МПа}$ для различных концентраций CO_2 в водяном паре. Вязкости чистых компонент: $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 4,325 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\mu_{\text{CO}_2} = 3,762 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$, молярные массы $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ г / моль}$, $M_{\text{CO}_2} = 44 \text{ г / моль}$.

Результаты расчетов представлены на рисунках 1 и 2. Полученные результаты показывают, что модели Грэхема, Уилки и Хернинга-Зиппера дают близкие результаты в диапазоне концентрации в смеси CO_2 от 0...20% – разница между ними менее 1,2%. Модель Девидсона дает меньшие значения вязкости смеси на 0...3,5% чем рассмотренные выше модели.

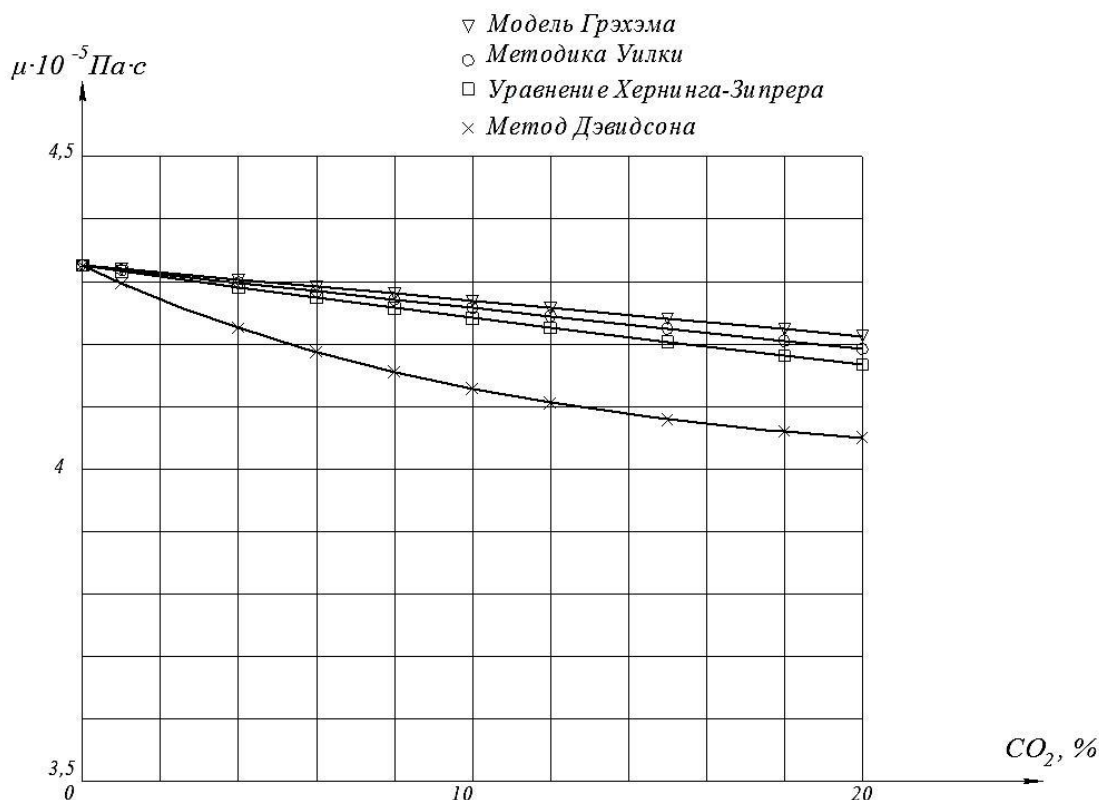


Рис. 1 Вязкость смеси при различной концентрации CO_2
при $P_{0цвд} = 13\text{МПа}$ и $T_{0цвд} = 850^\circ\text{C}$

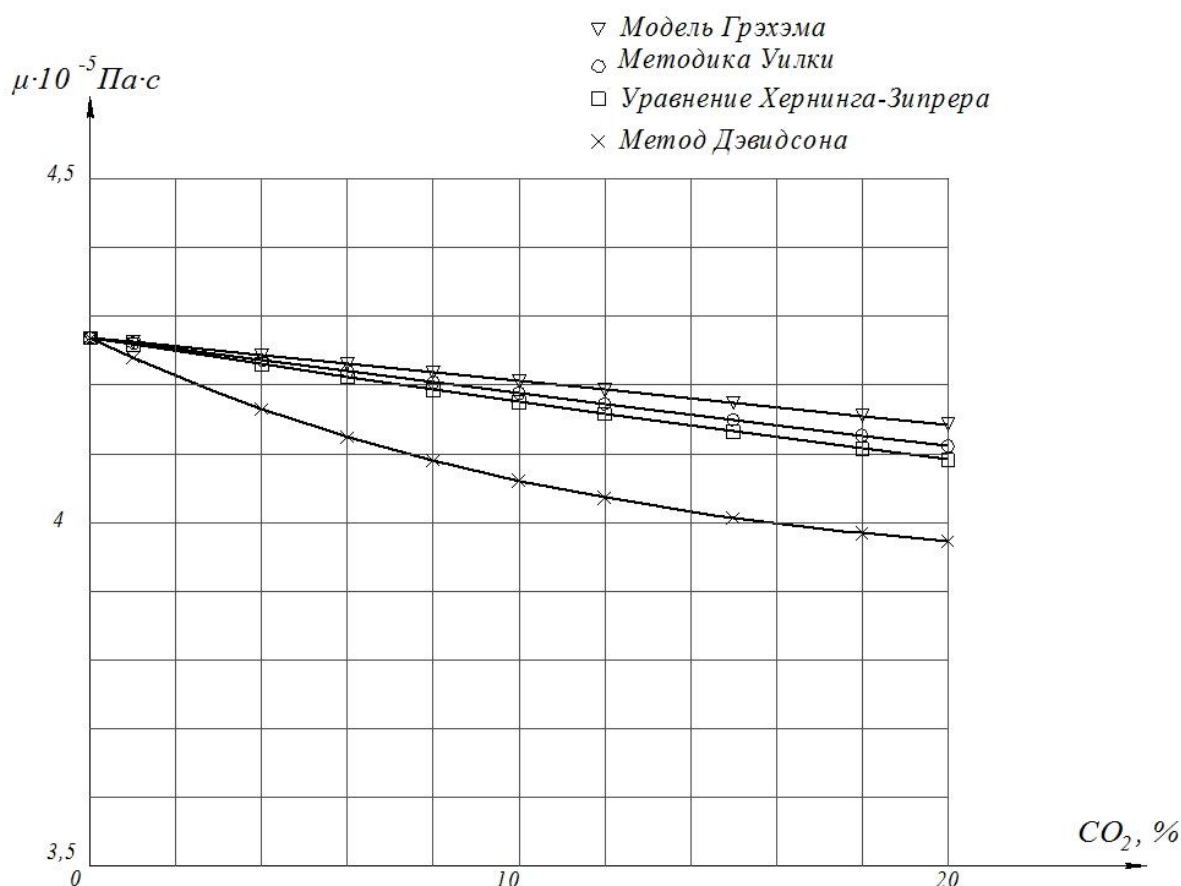


Рис. 2 Вязкость смеси при различной концентрации CO₂
при $P_{0\text{исд}} = 3,2 \text{ МПа}$ и $T_{0\text{исд}} = 850^\circ \text{C}$

Таким образом, при расчетах высокотемпературной турбины, работающей на смесевом рабочем теле (H₂O + CO₂) при расчетной концентрации CO₂ в рабочем теле 4...8% различия при определении вязкости, во всех рассмотренных методиках, не превышают 0,5...3%. Модель Девидсона дает наименьшие значения для вязкости смеси. Влияние температуры смеси на ее вязкость, при течении в турбине, значительно превышает влияние выбора расчетной методики на результат в рассмотренном диапазоне концентраций.

Список литературы

1. Graham, T. On the Motion of Gases. Phil. Trans., v. 136, 1846, pp. 573-631.
2. Wilke, C. R A Viscosity Equation for Gas Mixtures. J. Chem. Phys., v. 18, 1950, pp. 517-519.

3. Herning.E., and L. Zipperer. Calculation of the Viscosity of Technical Gas Mixtures From the Viscosity of the Individual Gases. Gas-und Wasserfach, v. 79, 1936, pp. 69-73.

4. Thomas A. Davidson. A simple and accurate method for calculating viscosity of gaseous mixtures. Report of investigations, 1993., Bureau of Mines.

Жинов Андрей Александрович — заведующий кафедрой К1-КФ, кандидат технических наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jinov@mail.ru.

Милов Павел Алексеевич — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: luridpale@gmail.com.

A.A. Jinov, P.A. Milov

VISCOSITY DETERMINATION OF THE MIXED WORKING SUBSTANCE FOR HIGH-TEMPERATURE TURBINE

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 24800, Russia

This paper presents a comparison of a different analytical methods used to calculate the viscosity of the gas mixture of H₂O and CO₂ at various concentrations and their parameters for the projected high-temperature turbine.

Key words: *high-temperature turbine, mixed working substance, viscosity*

Jinov A.A., Head of the department "Heat engines", Philosophy Doctor of the Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: jinov@mail.ru.

Milov P.A., student of Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: luridpale@gmail.com.

С.В. Киселёв, А.А. Сидоров

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ПЛОСКОЙ ОХЛАЖДАЕМОЙ ПЛАСТИНЫ ПОТОКОМ С РАЗНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

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

Построена 3D модель плоской охлаждаемой пластины. Произведён аэродинамический расчёт потока при разных температурах. Исследованы пограничный слой и аэродинамические следы при разных режимах. Произведён анализ течения потока при охлаждении пластины. Построены графики скоростей в ключевых точках. Сделаны выводы об особенностях течения потока при охлаждении пластины и без охлаждения.

Ключевые слова: Пластина, скорость потока, температура, аэродинамическое обтекание, пограничный слой, аэродинамический след, охладитель.

В современном мире постоянно растёт потребление энергии. Для того чтобы покрыть все необходимые потребности приходится вырабатывать всё больше тепловой и электрической энергии. Естественно растёт количество сжигаемого топлива, растут затраты на открытие и разработку новых месторождений, что приводит, в конечном счёте, к увеличению цены на топливо. Уже сейчас многие задумываются о том, что в ближайшем будущем нас ждёт острый дефицит топлива и возможна энергетическая катастрофа. Кроме того, экологическая обстановка в мире довольно плохая и увеличивать до бесконечности количество сжигаемого топлива не получится. Именно поэтому, на сегодняшний день очень важно внедрять высокоэффективные технологии производства тепловой и электрической энергии, что позволит снизить удельные затраты топлива.

Существует несколько способов увеличения эффективности турбоустановок. Можно улучшать отдельные узлы турбоустановок и/или усложнять тепловую схему путём добавления регенерации, промежуточного перегрева пара и т.д. Основным и, пожалуй, самым эффективным способом увеличения КПД турбоустановок является увеличение начальных параметров пара – температуры и давления. Температуру можно увеличить, например, сжиганием водородного топлива в среде перегретого пара. Наряду со всеми достоинствами такого способа увеличения КПД, появляется

и ряд недостатков. Теперь уже необходимо внедрять в производство новые жаропрочные стали и сплавы, добавлять всевозможные системы охлаждения самых нагретых элементов турбины с целью предотвращения расплавления материала этих элементов. Турбина является не только термодинамической системой. При создании турбины огромное внимание уделяется аэродинамике в проточной части. Необходимо рассмотреть сопряжённую задачу, оценить, как реагируют аэродинамические характеристики решёток на увеличении температуры основного потока рабочего тела. Если этого не сделать, то может получиться так, что увеличение начальной температуры повысит КПД, плохая аэродинамика снизит КПД до первоначального уровня, а вот надёжность сильно упадёт. Затраты же энергии на системы охлаждения снизят положительный эффект до минимума.

Таким образом, можно сказать: всестороннее изучение взаимосвязи термодинамических и аэродинамических характеристик – необходимое условие проектирования высокотемпературных паровых турбин.

В проточной части турбины основным элементом аэродинамической системы является, конечно, лопаточный аппарат. При увеличении температуры основного потока, проблема надёжности лопаток становится ещё более актуальной. Помимо непосредственного влияния высокой температуры основного потока на материал лопаток, добавляются нестационарные аэродинамические силы, величина которых в настоящее время неизвестна. Эти возбуждающие силы вызваны, прежде всего, неравномерностью потока, набегающего на рабочие лопатки. Неравномерность же возникает из-за аэродинамических следов за сопловыми лопатками. До сих пор вопрос влияния высокой температуры на пограничный слой и аэродинамические следы в охлаждаемых сопловых лопатках не был исследован.

Начало изучения данного вопроса необходимо начать с самой простейшей модели. Это необходимо для того, чтобы максимально исключить влияние формы обтекаемого тела на аэродинамическую картину, а также для того, чтобы исключить влияние нескольких обтекаемых тел друг на друга. Такой простейшей моделью может служить плоская пластина (Рис.1).

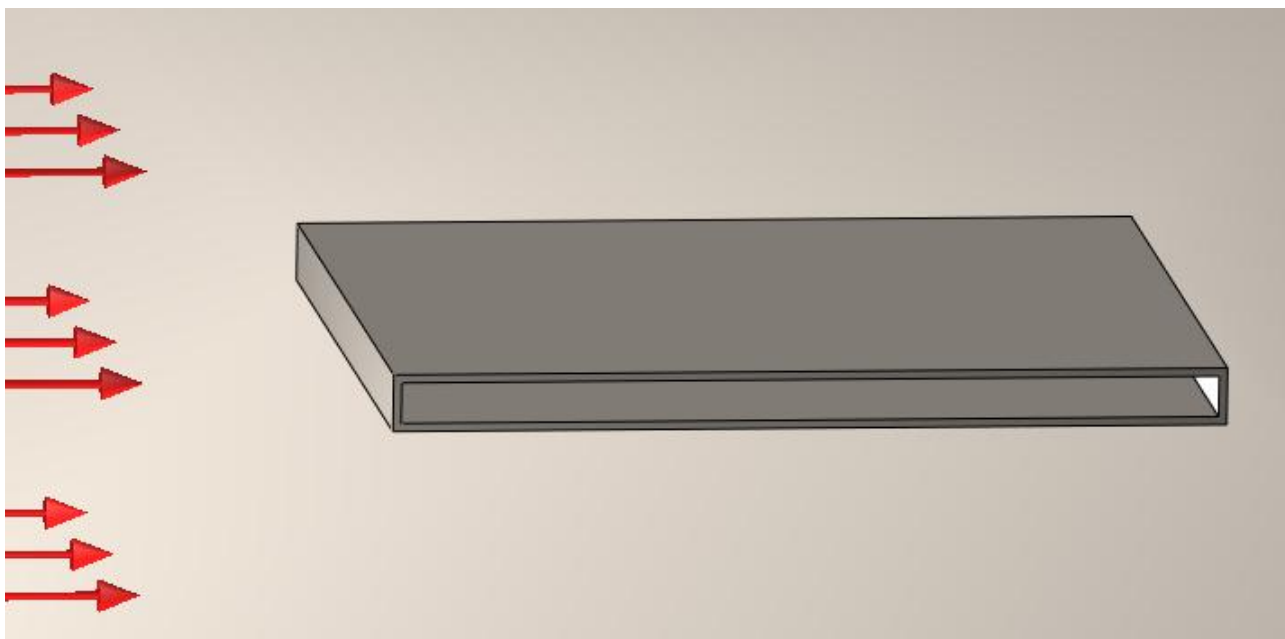


Рис.1

Размер пластины 100x100 мм, ширина пластины 7 мм. Пластина полая – для прокачки охладителя. Толщина стенок 1 мм. Материал – сталь.

Построение 3D модели и все расчёты были проведены в программном пакете Solid Works и его приложении Flow Works. В качестве рабочего тела был выбран воздух. Использовалась модель сжимаемого вязкого газа, модель течения – ламинарно-турбулентная. Через стенки пластины идёт теплообмен.

Первая серия расчетов - пластина не охлаждалась. Были приняты следующие граничные условия:

1. Скорость основного потока $V=100$ м/с. Поток набегаёт на пластину слева (Рис.1).
2. Давление газа на входе в расчетную область 3МПа.
3. Температура основного потока на входе в расчетную область менялась $t=800\div 1250$ °С.

Далее была подобрана расчётная сетка (Рис.2).

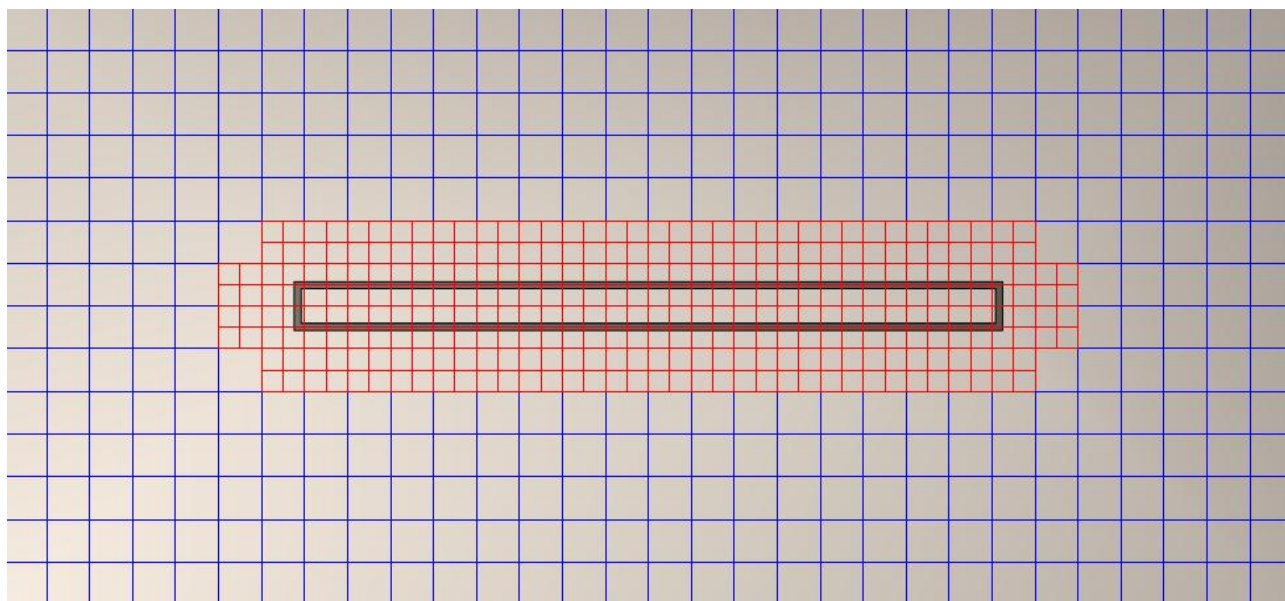


Рис.2

Для повышения точности расчётов сетка дополнительно измельчалась вокруг пластины – в зоне пограничного слоя и аэродинамического следа.

В результате расчётов были получены поля скоростей (Рис.3) и поля температур, которые интересуют нас в меньшей степени – значения температур во всех точках очень близки к начальной температуре рабочего тела.

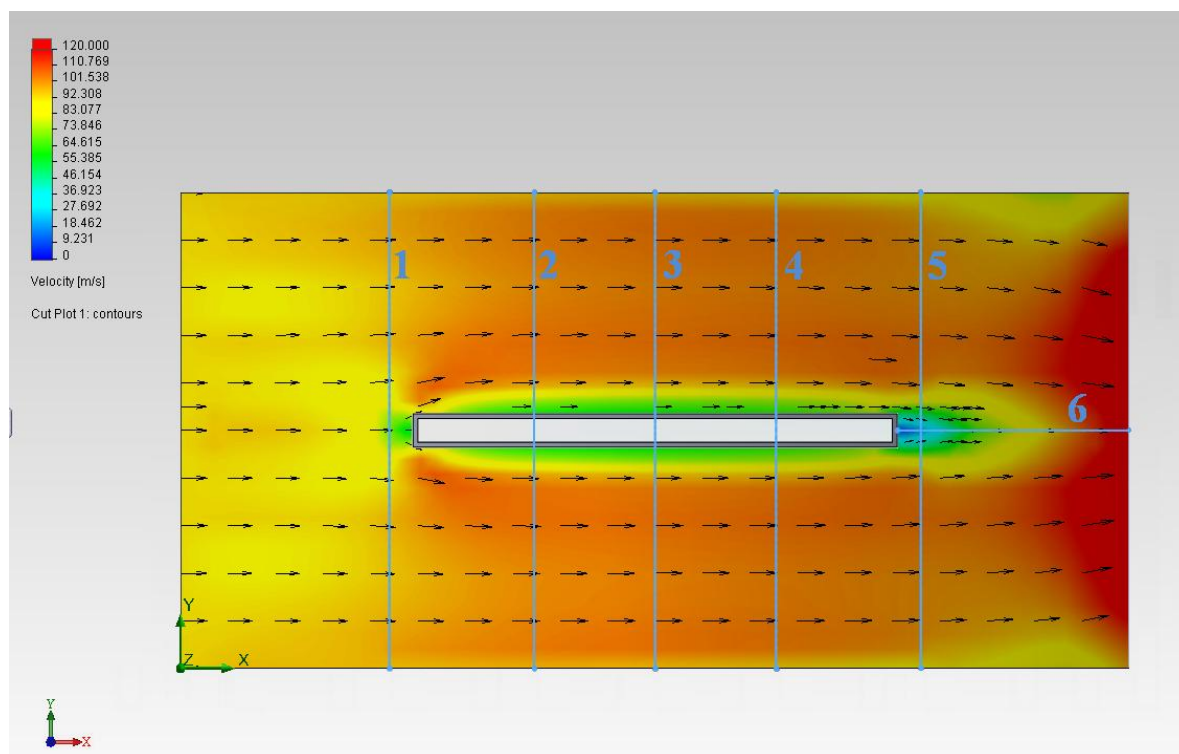


Рис.3

Скорости рассматривались по шести наиболее значимым линиям, расположенным на центральном сечении пластины (Рис.3). Каждая линия разбивалась на 100 точек, в которых и были получены значения скоростей. По линии 1 можно оценить, как меняется скорость потока перед пластиной в зависимости от температуры. Линии 2,3,4 делят пластину на четыре равные части. По значениям скоростей на данных линиях можно увидеть ширину пограничного слоя и проследить, как пограничный слой будет меняться с изменением температуры. Пожалуй, наиболее значимыми для дальнейших изысканий являются значения скоростей по линиям 5 и 6. Здесь мы можем оценить ширину и длину аэродинамического следа, возникающего за обтекаемым телом, понять, какое воздействие на след оказывают температурные изменения потока и наличие охлаждения.

После всех расчётов на запланированных режимах данные были занесены в сводные таблицы по каждой из шести линий.

Пример такой таблицы для линии 1 показан на рисунке (Рис.4). Здесь в ячейках таблицы можно увидеть значения скоростей потока. Каждый столбец таблицы представляет собой определённый температурный режим. В строках расположены значения скоростей потока для каждой из 100 точек, равномерно расположенных в данном случае на линии 1 (Рис.3).

БЕЗ ОХЛАЖДЕНИЯ										ЛИНИЯ 1
	800°C	850°C	900°C	950°C	1000°C	1050°C	1100°C	1150°C	1200°C	1250°C
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	95,2447	93,7517	96,5986	89,9135	97,2442	97,4253	95,0379	95,2307	102,488	93,3161
3	96,3655	94,828	97,6955	91,0775	98,4194	98,637	96,0833	96,5137	103,867	94,7615
4	97,3398	95,7604	98,6445	92,1039	99,4455	99,6999	96,9836	97,6509	105,09	96,0642
5	98,3142	96,6932	99,5942	93,1302	100,472	100,763	97,8842	98,7882	106,315	97,3671
6	98,4487	97,0213	99,9816	93,4167	100,761	101,036	97,736	99,0014	106,598	97,501
95	99,0975	97,4538	96,859	102,876	97,8118	96,0007	99,0382	98,406	92,552	102,155
96	99,4282	97,5106	97,1167	103,233	98,1425	96,2205	98,7897	98,1391	92,5684	102,212
97	98,6063	96,8125	96,326	102,228	97,1849	95,4276	97,7581	97,0372	91,2794	101,023
98	97,7845	96,1147	95,5355	101,225	96,2273	94,6348	96,7269	95,9356	89,9905	99,8333
99	96,499	94,9602	94,2918	99,7426	94,815	93,3931	95,2395	94,3821	88,28	98,1739
100	1,4E-17	6,9E-18	0	0	5,6E-17	0	2,9E-17	2,8E-17	2,8E-17	2,8E-17

Рис.4

Вторая серия расчётов - пластина охлаждалась. Аналогичные вычисления были проделаны и для охлаждаемой пластины. Внутри пластины прокачивался воздух со скоростью $V=100$ м/с и температурой $t=400$ °C. Давление в системе охлаждения 3МПа.

В результате по полученным данным были построены графики скоростей для каждой из шести линий, на каждом из десяти температурных режимов для охлаждаемой и неохлаждаемой пластины.

Значения скоростей, найденные по линии 1 (Рис.3), не выявили существенных расхождений в характере течения потока перед пластиной. На всех режимах и с добавлением охлаждения скорость перед левым торцом пластины, по линии 1 (5 мм от пластины), оставалась примерно одинаковой $V \approx 70$ м/с.

Картина течения сильно поменялась по длине пластины. На Рис.5 показаны графики скоростей для режима 1000°C .

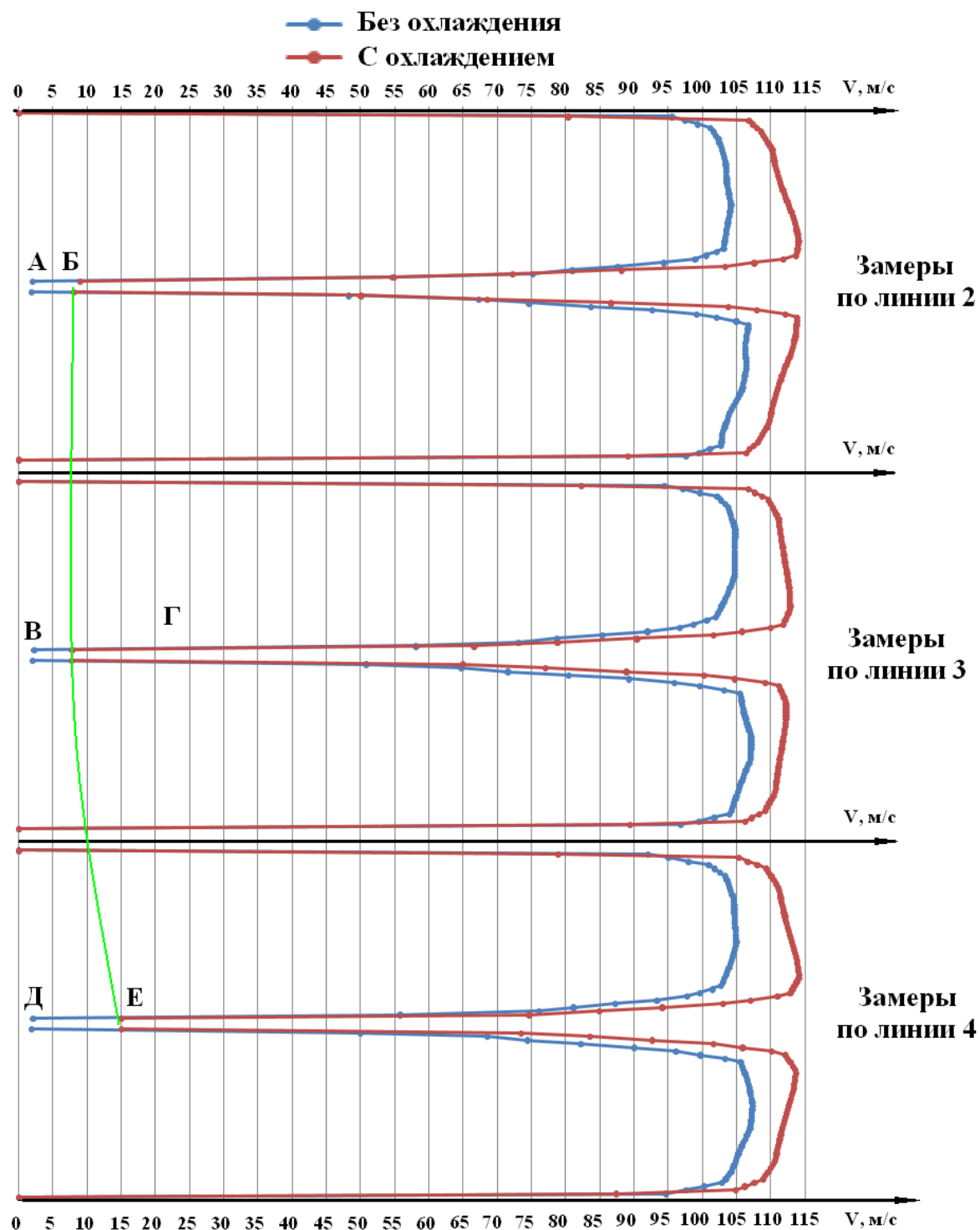


Рис.5

На других режимах картины получались аналогичными. Скорости по линиям 2,3,4 для охлаждаемой и неохлаждаемой пластин. Если проанализировать графики для всех режимов, то можно сказать, что ширина пограничного слоя остаётся примерно постоянной при разных температурах основного потока, в разных местах пластины, при добавлении охлаждения пластины.

Скорость потока в пограничном слое увеличивается с добавлением охлаждения пластины, т.к. при охлаждении увеличивается плотность потока и соответственно расход в пограничном слое при той же ширине пограничного слоя. Если сравнить скорости в точках, расположенных в непосредственной близости к пластине - А, В, Д (Рис.5), принадлежащих линиям 2, 3 и 4 соответственно (Рис.3) для неохлаждаемой пластины, то можно увидеть, что скорость потока в данных точках $V \approx 2$ м/с. Это означает, что скорость пограничного слоя по длине пластины не меняется. Для охлаждаемой же пластины (точки Б, Г, Е) скорость потока по длине пластины увеличивается $V \approx 8 \div 15$ м/с. Кроме того, сам уровень скоростей при охлаждении выше. Если сравнить точки А, Б или точки В, Г, то увидим, что скорость при охлаждении увеличилась в 4 раза. В точках Д и Е почти в 8 раз. Характер изменения скоростей на всех температурных режимах одинаков.

Рассмотрим теперь графики изменения скоростей в аэродинамическом следе по 5 линии (Рис.6) вблизи выходной кромки пластины. С увеличением температуры основного потока скорость в аэродинамическом следе за пластиной увеличивается.

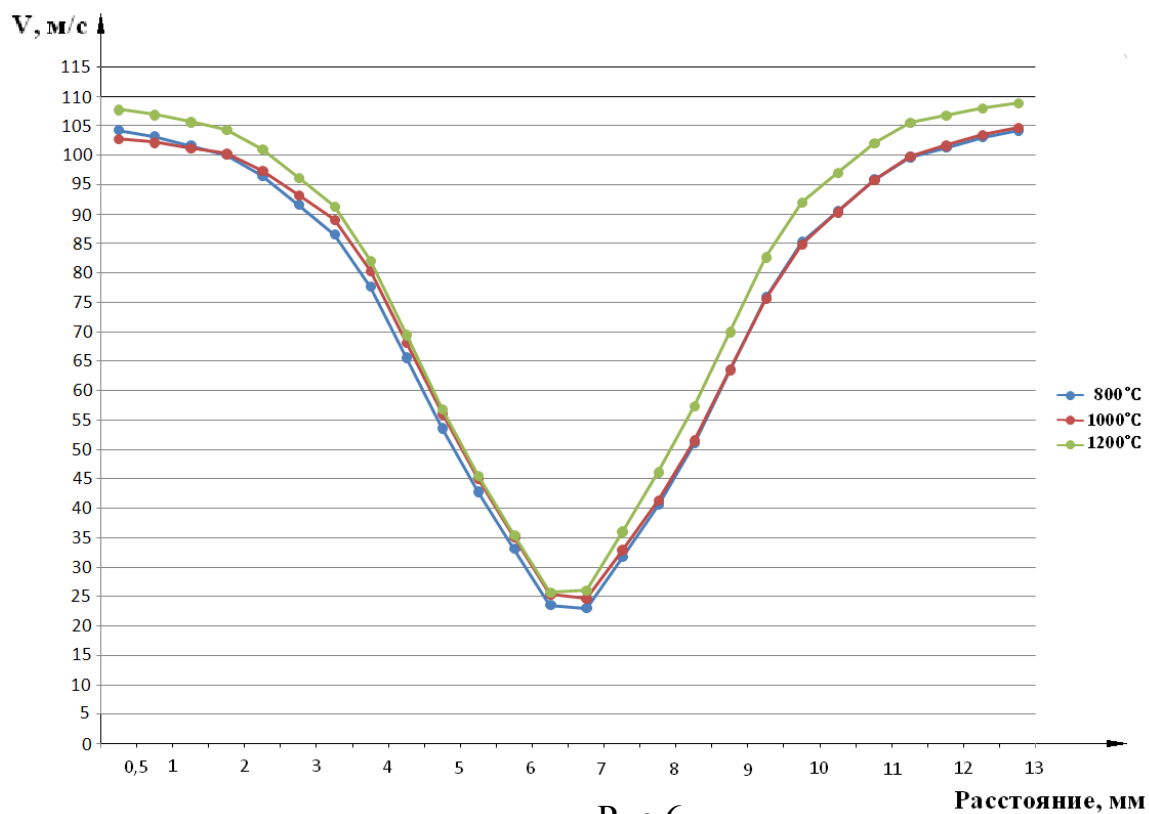


Рис.6

Это также можно увидеть, если посмотреть на скорости (Рис.7) по линии 6 (Рис.3) – по длине следа.

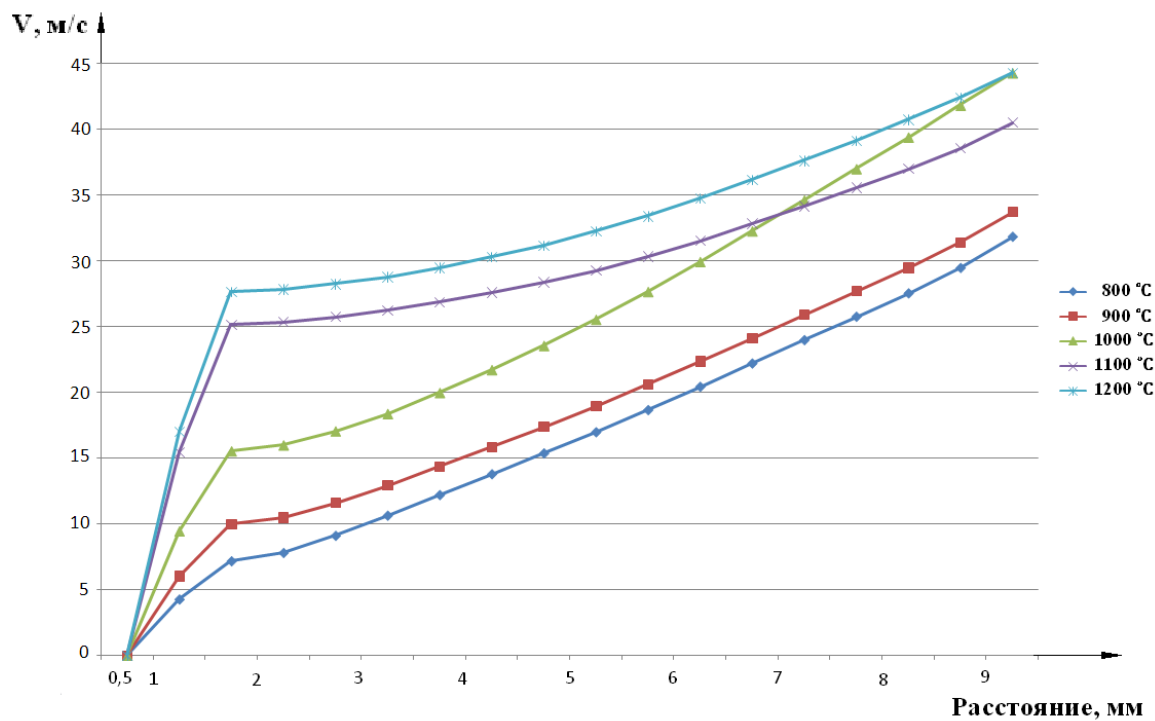


Рис.7

Чем выше температура основного потока, тем ближе к пластине начинает восстанавливаться скорость в аэродинамическом следе. След становится короче.

Пример. Пластина не охлаждается. Длина линии 6 (Рис.3) $L=50$ мм. Линия разбита на 100 равноудалённых точек. Т.е. расстояние между точками $l=0,5$ мм. Первая точка линии 6 лежит на пластине и здесь $V=0$ м/с. На Рис.7 выберем два температурных режима, которые будем сравнивать – это $t=800$ °С (синий график) и $t=900$ °С (красный график). Для $t=800$ °С определяем скорость в точке 6 (т.е. на расстоянии $5 \cdot 0,5=2,5$ мм от пластины) $V=11$ м/с. Теперь повысим температуру основного потока на 100 °С. На красном графике видим, что скорость $V=11$ м/с – это точка 4 (т.е. на расстоянии $3 \cdot 0,5=1,5$ мм от пластины), а на расстоянии $2,5$ мм от пластины уже скорость $V=13$ м/с. Т.о. видим, что с повышением температуры основного потока, скорость в следе начинает восстанавливаться быстрее и ближе к пластине, что означает более быстрое исчезновение неравномерности потока при высоких температурах по сравнению с более низкими температурами основного потока.

Одновременно с этим, при охлаждении след восстанавливается очень медленно (Рис.8). Уровень скоростей здесь меньше в 2 раза, чем без охлаждения пластины. Кроме того, появляется горизонтальная площадка. Чем больше разность температур между основным потоком и охладителем, тем более явной на графике становится данная площадка. Если пластину не охлаждать, то её температура равна температуре основного потока и разности температур нет.

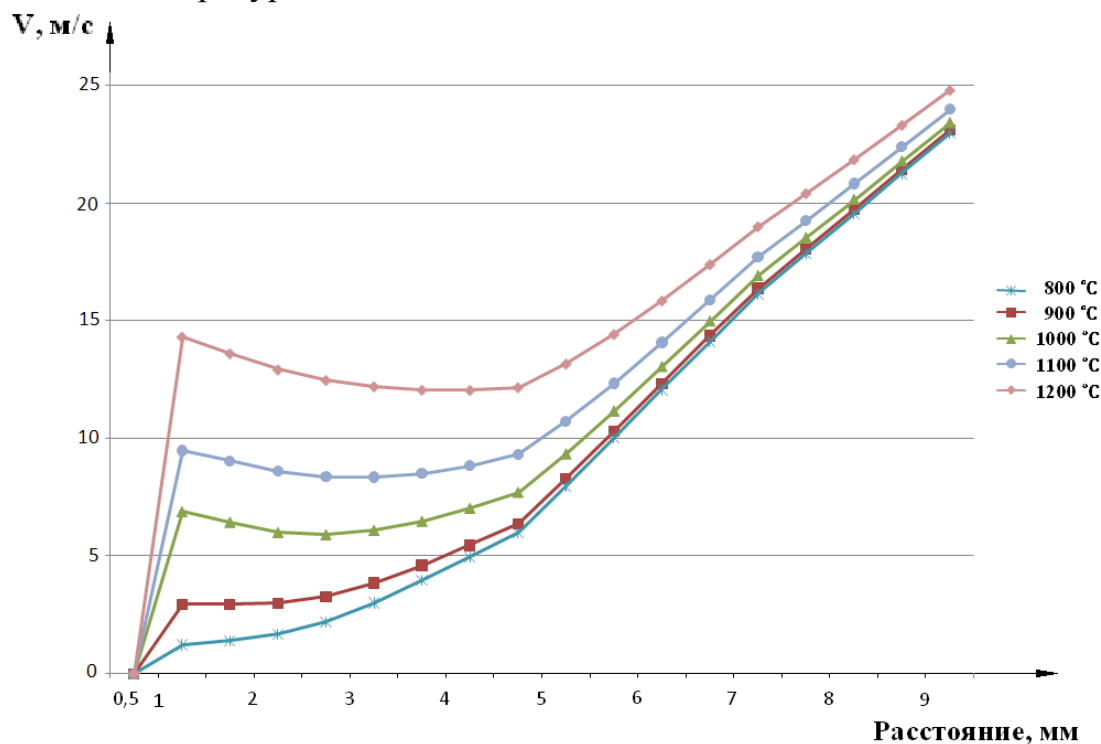


Рис.8

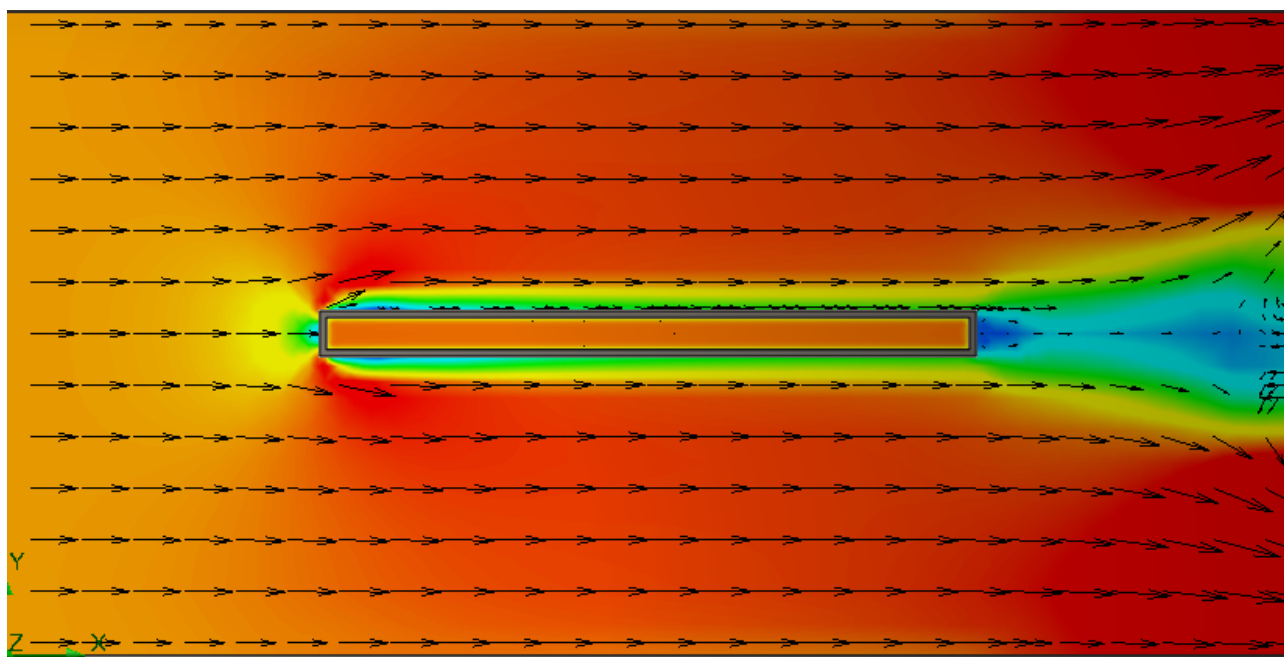


Рис.9

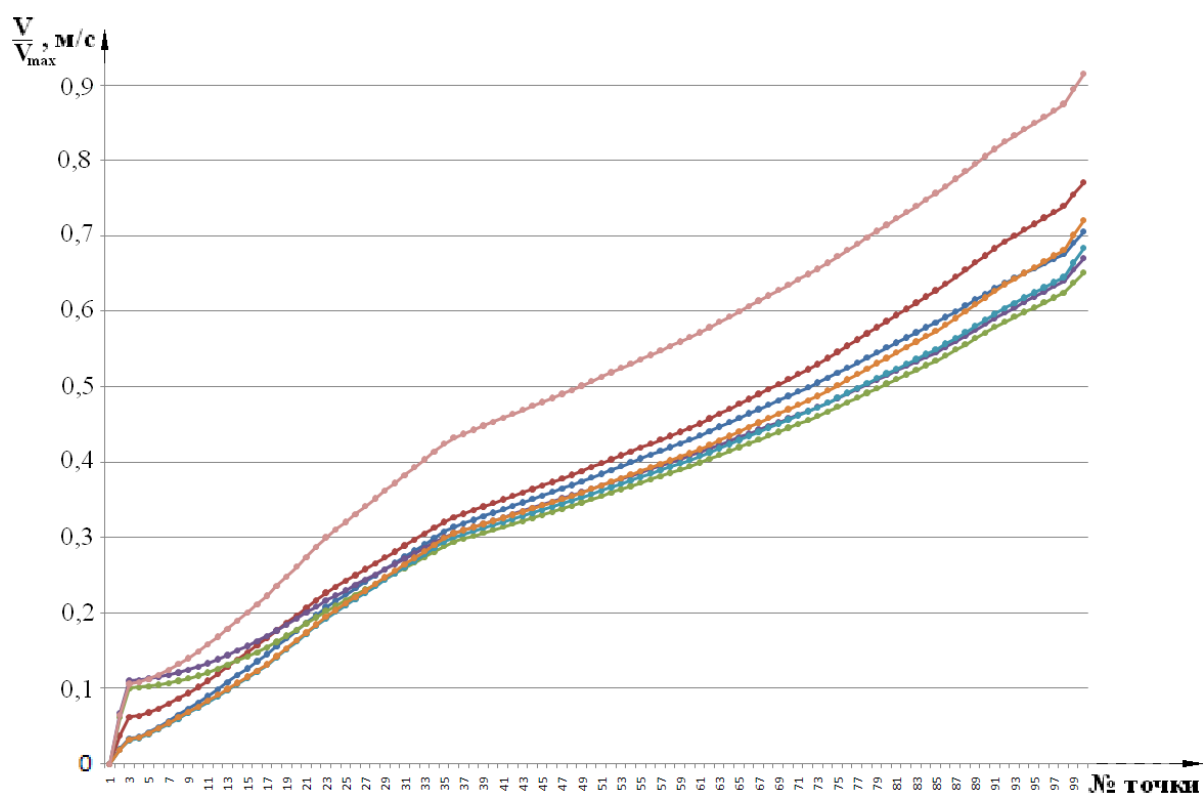


Рис.10

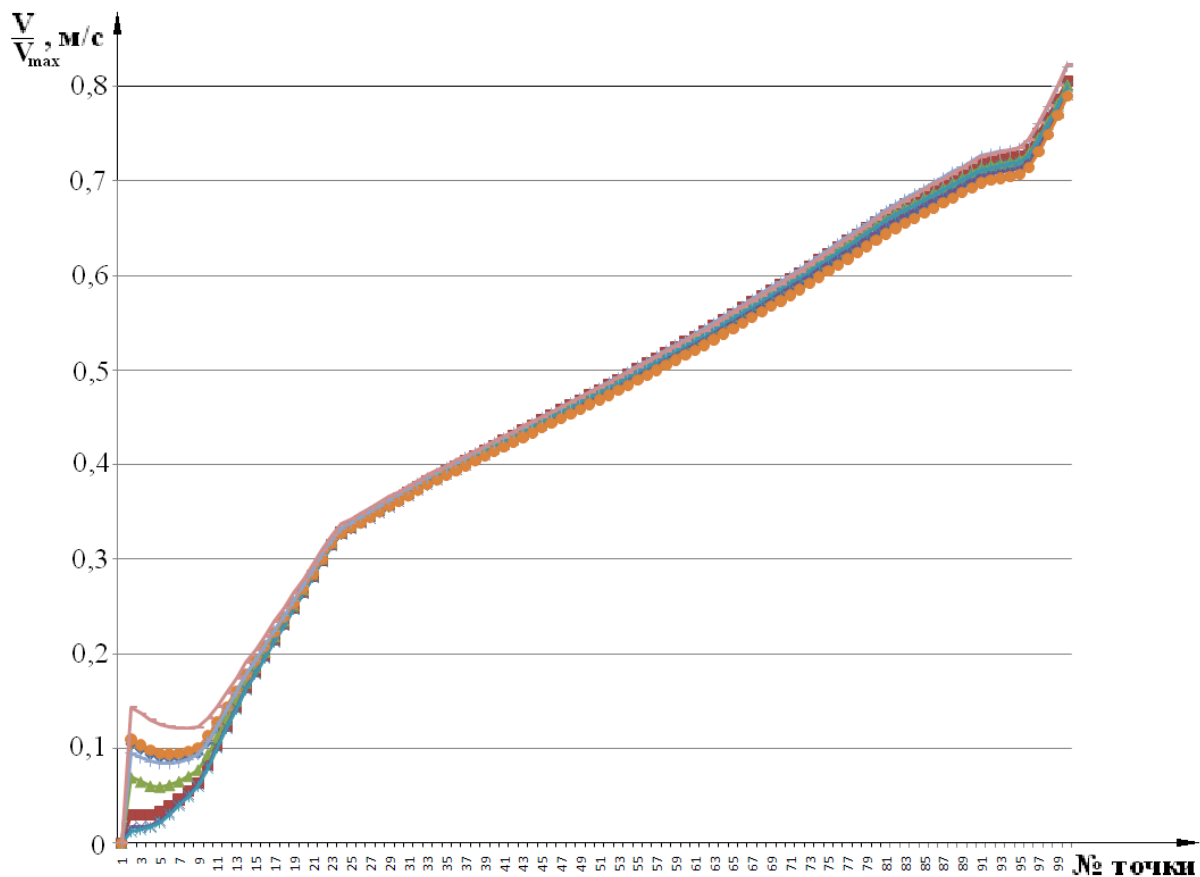


Рис.11

На графиках нет площадки, лишь некая критическая точка, после которой скорость потока начинает стремительно увеличиваться. Одновременно с этим стоит отметить, что ускоренный при охлаждении пластины пограничный слой довольно долго перемешивается с основным потоком, а внесённые аэродинамическим следом колебания потока делают всю зону за пластиной сильно неравномерной на длинном участке (Рис.9).

И если в случае, когда пластина не охлаждается, с повышением температуры основной поток быстрее начинает перемешиваться за пластиной, повышая тем самым скорость по линии 6 (Рис.10), то в случае охлаждения пластины повышение температуры основного потока почти не оказывает влияния (Рис.11).

Из проделанной работы можно сделать несколько выводов:

1. Расчёты не выявили существенных расхождений в характере течения потока перед пластиной. На всех режимах и с добавлением охлаждения скорость непосредственно перед пластиной оставалась одинаковой $V \approx 70$ м/с.

2. Ширина пограничного слоя остаётся постоянной при разных температурах основного потока, в разных местах пластины, при добавлении охлаждения пластины.

3. Скорость потока в пограничном слое увеличивается с добавлением охлаждения пластины.

4. При охлаждении пластины скорость пограничного слоя возрастает при перемещении по пластине.

5. С повышением температуры основного потока, скорость в следе начинает восстанавливаться быстрее и ближе к пластине, что означает более быстрое исчезновение неравномерности потока при высоких температурах по сравнению с более низкими температурами основного потока.

6. С повышением температуры, основной поток быстрее начинает перемешиваться за пластиной. Добавление охлаждения пластины препятствует перемешиванию потока за пластиной.

Список литературы

1. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961
2. Самойлович Г.С., Нитусов В.В., Сидоров А.А. К оценке величины аэродемпфирования колебаний лопаток турбин. Проблемы прочности. - М.: Теплоэнергетика, 1970
3. Самойлович Г.С., Сидоров А.А. Исследование аэродинамических сил при возбуждении аксиальных колебаний лопаток турбомашин. - М.: Теплоэнергетика, 1972
4. Лойцянский Л.Т. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1973

Киселёв Сергей Викторович — аспирант кафедры К1-КФ МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: SKV1985@yandex.ru.

Сидоров Альберт Александрович — доцент кафедры К1-КФ, к.т.н. МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sidpol1@rambler.ru.

S.V. Kiselev, A.A. Sidorov

NUMERICAL RESEARCH OF THE FLOW OF THE FLAT COOLED PLATE BY THE STREAM WITH DIFFERENT TEMPERATURE

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 24800, Russia

It is constructed 3D model of a flat cooled plate. Aerodynamic calculation of a stream is made at different temperatures. The boundary layer and aerodynamic traces are investigated at different modes. The analysis of current of a stream is made at cooling a plate. Schedules of speeds in key points are constructed. Are drawn conclusions on features of current of a stream at cooling a plate and without cooling.

Key words: *Plate, speed of a stream, temperature, aerodynamic flow, boundary layer, aerodynamic trace, cooler.*

Kiselev Sergey Viktorovich, Assistant department K1-KF of the Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: SKV1985@yandex.ru.

Sidorov Albert Alexandrovich, Associate Professor of K1-KF, Cand. of Bauman Moscow State Technical University (the Kaluga Branch). E-mail: sidpol1@rambler.ru.

Бушуев А.А, Петрунина М.И., Малинин А.В

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ БАЗИРОВАНИЯ ЛОПАТОК РОТОРА ТУРБИНЫ ПРИ НАРЕЗАНИИ ЕЛОЧНОГО ПРОФИЛЯ ХВОСТОВИКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ БАЗИРОВАНИЯ

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

В настоящее время единственно возможным методом обработки деталей из жаропрочных, высокопрочных и коррозионностойких материалов является глубинное шлифование. Основным преимуществом использования глубинного шлифования по сравнению с маятниковым, является малый разброс геометрических показателей, что определяется стабильностью процесса. Стабильность геометрических параметров и шероховатости рабочей поверхности определяет работоспособность замкового соединения в условиях теплонапряженного и сложноциклического нагружения.

Для обработки елочного профиля лопаток ротора турбины на одношпиндельных станках, типа ЛШ-220, требуемой точности, применяют специальную оснастку – кассету-спутник, которая представлена на рисунке 1.

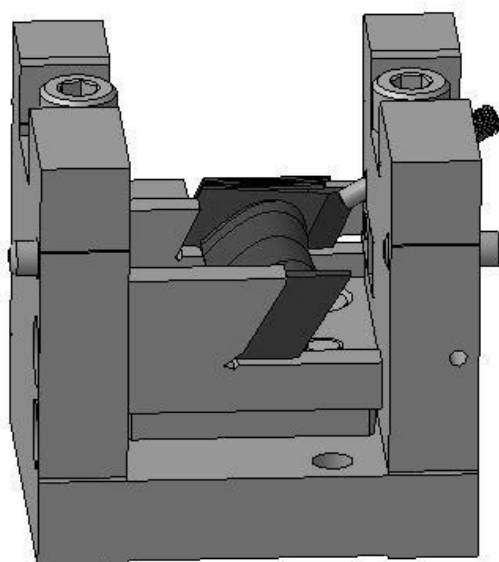


Рис. 1 Кассета-спутник

Такая оснастка позволяет передавать детали с операции на операцию без переустановки. Установка осуществляется на установочные и прижимные элементы, выполненные в виде профильных ложементов тех сечений,

в которых расположены технологические базы. При установке добиваются полного совпадения установочного элемента приспособления с профилем лопатки в устанавливаемом сечении. Таким образом, один раз установленная и закрепленная деталь из кассеты не вынимается до завершения механической обработки лопатки.

Достоинства кассеты-спутник:

- упрощает конструкцию рабочих приспособлений;
- сокращает сроки на установку и снятие кассеты.

Недостатки:

- деформирование деталей как при установке в кассету, так и при механической обработке;
- создание некоторого парка (обменного фонда) приспособлений, абсолютно идентичных друг другу, при этом каждая из данных кассет должна обеспечивать полную повторяемость условий закрепления детали по сравнению с предыдущим приспособлением;
- нестабильность установки детали, различия в точности их закрепления.

В данной работе рассматриваются погрешности взаимного расположения замковой и лабиринтовой полок, возникающих из-за малой жесткости детали при шлифовании хвостовика. Мы рассматриваем систему упор-полка лабиринта, относительно номинального положения мнимого центра масс, через который рассматриваем относительное смещение всех геометрических точек поверхности полки. В данном случае нас интересует разворот плоскости лабиринтной полки относительно мнимого центра масс, а именно угловые $-\alpha$, $+\alpha$, и линейные смещения ΔL относительно плоскости. На рисунке 2 представлен вариант базирования заготовки в кассете-спутнике по плоскостям.

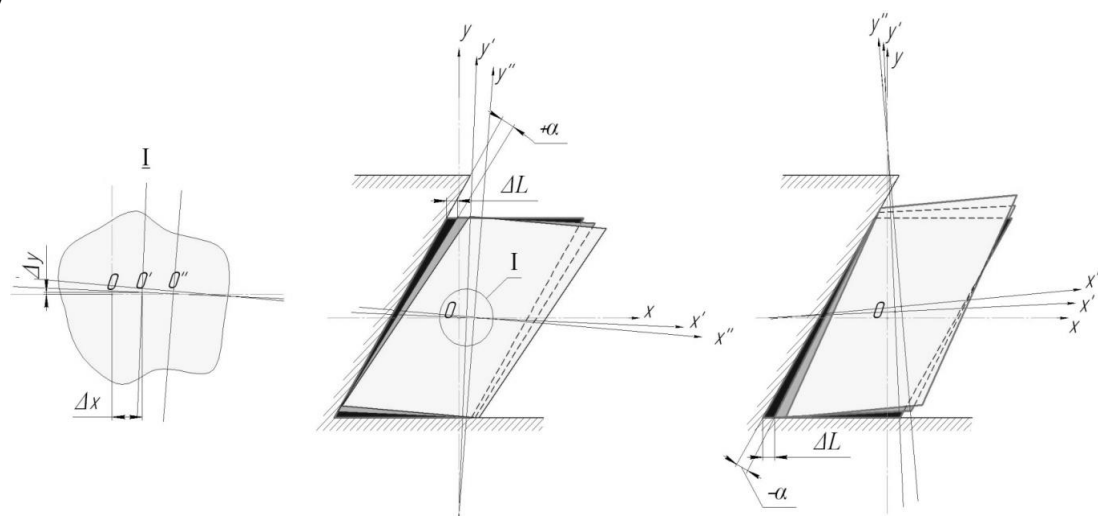


Рис.2 Базирование заготовки в кассете-спутнике по плоскостям

Мы задавали линейные смещения ΔL относительно базовых плоскостей. В результате, получали разворот относительно мнимого центра масс, по часовой $+\alpha$ и против часовой $-\alpha$ стрелки. Это позволяет нам определить угловые отклонения плоскости относительно базовых плоскостей в двух направлениях. Из условий, что лопатка зажата в кассете-спутнике по всем плоскостям вблизи хвостовика, возникает прижимная сила, действующая в сторону базовых плоскостей. Это обуславливает, что мы имеем минимум по одной точке касания в каждой базовой плоскости лабиринтной полки. В результате мы получили данные, которые представлены в таблице 1.

Для полного исследования смещений мы рассматриваем базирование по двум опорным точкам (рисунок 3). По тем же самым принципам задавались смещения относительно мнимых базовых плоскостей, и измеряли смещения центра масс. Этот метод позволяет нам более точно отследить смещения относительно начального положения центра масс, с учетом того, что точки опоры постоянно находятся в соприкосновении с плоскостями лабиринтной полки.

Таблица 1

Смещение координат центра масс по базированию на плоскости

$\Delta L = 0,0015$					
$\Delta L(-\alpha)$			$\Delta L(+\alpha)$		
X	Y	α°	X	Y	α°
0	0	0	0	0	0
0,003155	0,002443	-0,01428	0,003155	0,002443	-0,01428
0,006311	0,00489	-0,02856	0,006311	0,00489	-0,02856
0,00946	0,0073	-0,0428	0,00946	0,0073	-0,0428
0,012609	0,009769	-0,0571	0,012609	0,009769	-0,0571
0,015766	0,01221	-0,07137	0,015766	0,01221	-0,07137
0,018906	0,01465	-0,08563	0,018906	0,01465	-0,08563

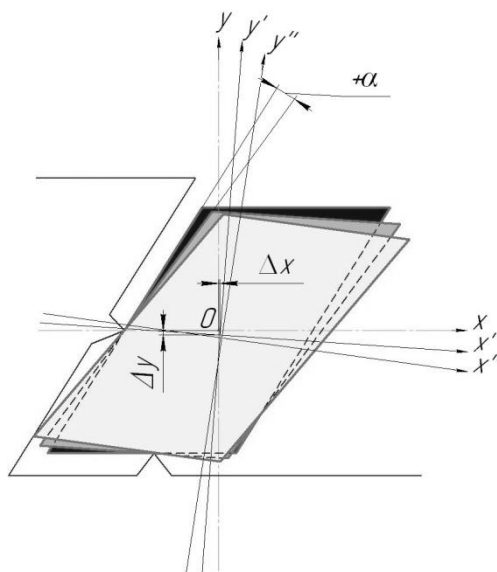


Рис.3 Базирование заготовки в кассете-спутнике по точкам

В ходе работы были сделаны замеры и сравнение смещений по двум методам базирования. Метод базирования по плоскостям эффективнее только при идеальном совпадении баз, и угловые смещения нам дают небольшие отклонения по осям номинального положения центра масс. Метод по двум точкам позволяет более широко рассматривать осевые отклонения при угловых смещениях.

Список литературы

1. *Полетаев В.А., Волков Д.И.* Глубинное шлифование лопаток турбин – М.; Машиностроение, 2009 г.
2. *Ансеров М.А.* Приспособления для металлорежущих станков – М.; МАШГИЗ, 1960 г., 5–11 с.

Бушуев А.А. — старший преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: bush1957@mail.ru.

Петрунина М.И. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: golivod92@mail.ru.

Малинин А.В. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 5cyber5@mail.ru.

С.И. Мосин, А.В. Землянский

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ УСТАНОВКИ С КОТЛОМ УТИЛИЗАТОРОМ

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

Экономия топлива и улучшение экологических показателей при выработке электроэнергии и теплоты связаны с поиском перспективных направлений развития энергетических установок.

ГТУ небольшой мощности стационарного исполнения в последнее время, становятся все более востребованы, например как «мини ТЭЦ». В качестве энергетических установок целесообразно использовать газотурбинные двигатели, имеющие по сравнению с паротурбинными лучшие технико – экономические показатели. Поэтому повышение экономичности ГТУ примерно около 40% и является актуальной задачей.

Эффективность работы ГТУ на номинальном и переменном режимах определяется как тепловым воздействием на процессы протекающие в компрессоре и турбине и регенерацией теплоты уходящих газов, так и их схемно – компоновочным решением. Удельная мощность и удельный расход топлива на номинальном режиме работы ГТУ, характеризующие степень совершенствования установки, являются функцией значительного числа переменных: политропических КПД газодинамических процессов в различных элементах установки, степеней повышения и понижения давления рабочего тела в компрессоре и турбине, коэффициентов полноты сгорания топлива в камере сгорания, теплоемкостей рабочего тела, степеней регенерации теплоты выходящих из установки продуктов сгорания, относительного расхода топлива, а также схемно – компоновочного выполнения ГТУ.

Задачей проведенных исследований влияния удельных параметров при различных схемах исполнения установок, обеспечивающий высокий эффективный КПД и соотношение электрической мощности установки с тепловой мощностью котла утилизатора.

В расчетных исследованиях эффективности и параметров ГТУ параметры давления и температуры принимались равными соответственно 101300 Па и 288 К. Политропический КПД газодинамических процессов в компрессоре был принят 0.85 и 0.87 турбине соответственно, что соответствует оптимальным адиабатным значениям КПД в турбине 0.86 – 0.9 и компрессоре 0.8 – 0.83. Данные значения уточняются в зависимости от выбранной схемы установки ГТД, степеней повышения давления в компрес-

соре и температур газа на выходе из камеры сгорания, которые были приняты в диапазоне 1250 – 1450 К.

Степень регенерации в регенераторе была выбрана из области максимального и минимального оптимального значения, то есть 0.6 и 0.8.

В данной работе были рассмотрены следующие схемы:

1. Простой цикл с одновальной конструкцией и с котлом утилизатором на выходе из турбины (Рис. 1, а).
2. Цикл с регенерацией и котлом утилизатором (Рис. 1, б)
3. Двухвальная схема с регенератором, котлом утилизатором и камерой дожигания (Рис. 1, в)

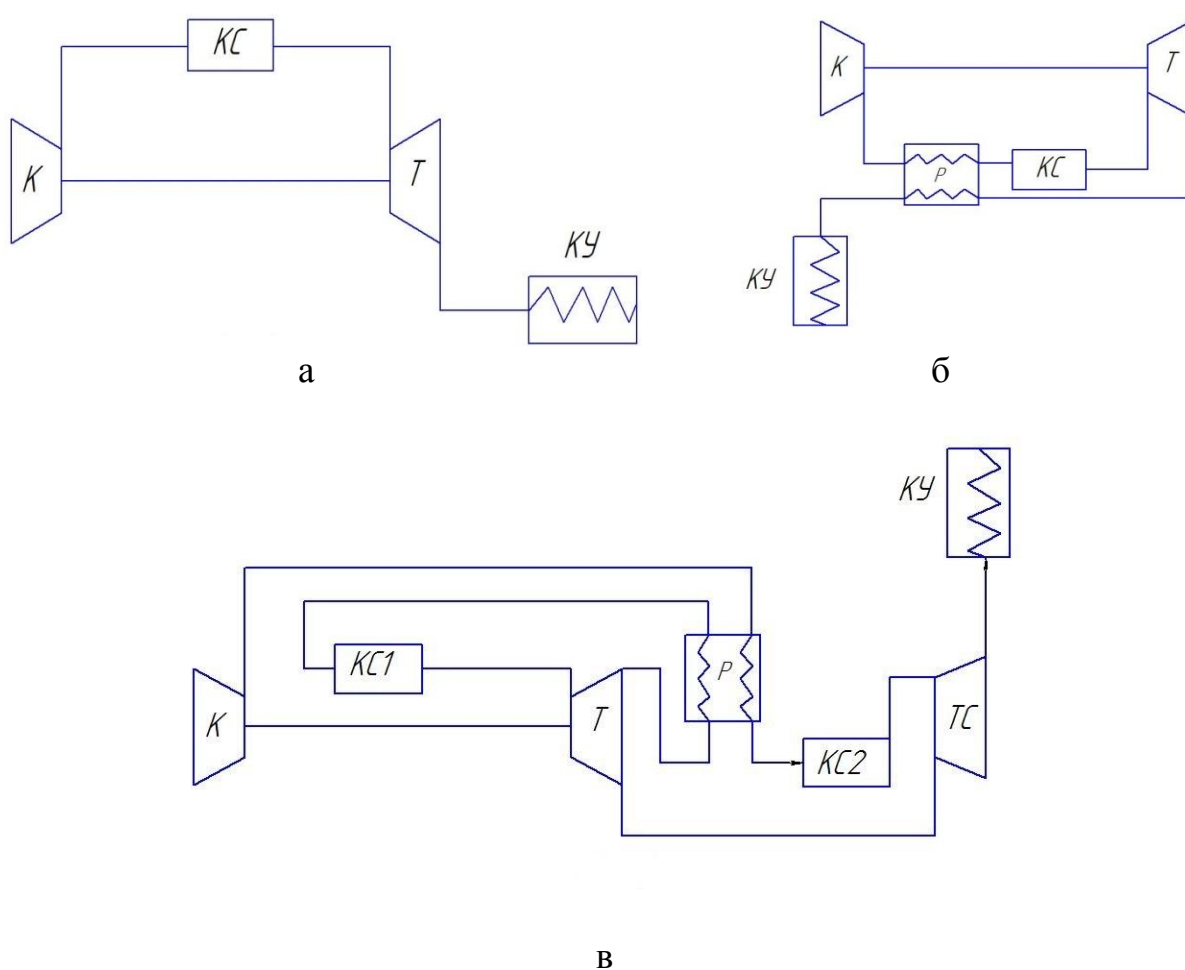


Рис.1 Схемы циклов ГТУ

а – простой цикл; б – цикл с регенерацией; в – цикл с регенерацией и камерой дожигания;

Характерной особенностью третьего варианта является то что регенератор располагается после турбины компрессора, то есть до второй камеры дожигания. Температура во второй камере дожигания принималась с уче-

том температуры газа в первой только на 150 К меньше. Многовальность установок практически не оказывает влияния на полученные результаты удельных параметров поэтому полученные результаты справедливы для различных схем исполнения.

Расчетный анализ показал, что с увеличением температуры газа на выходе из камеры сгорания эффективный КПД увеличивается во всех схемах, но существует ограничение на выбор оптимальных параметров связанных с типом конструкции компрессора, материалов лопаток турбин, центробежных рабочих колес, а также материалами регенератора и котла утилизатора. Результаты расчета цикла с регенерацией показали снижение удельной мощности и увеличение эффективного КПД установки по сравнению с простой схемой, а так же смещение области оптимального повышения степени давления в компрессоре в сторону малых значений. Оптимальная степень повышения давления смещается в сторону малых значений с увеличением степени регенерации, но при значениях превышающих 0.8 объем регенератора существенно возрастет, что приводит к снижению технико – экономических показателей установки.

Для повышения КПД в простом цикле необходимо существенно увеличивать температуры газа за камерой сгорания свыше 1500 – 1600 К. Однако при этом возникают проблемы с охлаждением прочной части турбины, ресурсом и стоимостью.

Двухвальная схема показала значительное увеличение удельной мощности за счет введения камеры дожигания и как следствие увеличение температуры на выходе из силовой турбины, но эффективный КПД данной схемы находится на уровне простого цикла. Расход воздуха в такой схеме уменьшается.

Термодинамически более совершенными являются схемы с регенерацией и промежуточным подогревом (камера дожигания), которые обеспечивают более эффективные параметры цикла при умеренных температурах рабочего тела равные примерно 1250 К, что позволяет избежать охлаждения турбины и как следствие снизить удельную стоимость за счет применения дешевых конструкционных материалов, повысить ресурс и надежность.

Схема выполняемая по третьему варианту имеет несколько исполнений, связанных с размещением камеры дожигания. Выбор варианта конструкции зависит от требования к тепловой мощности котла и требованиями к материалу турбинных лопаток, то есть в случае необходимости камеру дожигания можно поставить на входе в котел утилизатор.

Список литературы

1. Манушин Э.А, Михальцев В.Е, Чернобровкин А.П. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок. – М: Машиностроение, 1977. – 447 с.
2. Лапин Ю.Д, Карышев А.К. Расчет тепловой схемы газотурбинной установки для привода нагнетателя. – М: МВТУ, 1983. – 23 с.
3. Арсеньев Л.В, Бедчер Ф.С, Богов И.А, Левин Е.Е, Тырышкин В.Г, Ходок Е.А. Газотурбинные установки. Конструкция и расчет: Справочное пособие. – Л: Машиностроение, 1978. – 232 с.

Мосин Сергей Игоревич — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: sergei.mosin2013@yandex.ru.

Землянский А.В. — преподаватель, доцент, кандидат технических наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: zemlyansky.k1kf@yandex.ru.

М.И. Супельняк, А.К. Карышев

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СТУПЕНИ ТУРБИНЫ С ПАРЦИАЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ РАБОЧИХ ЛОПАТОК

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

Одним из способов увеличения эффективности газотурбинных установок является повышение температуры газа на входе в турбину. Однако с ростом температуры ухудшаются механические свойства сплавов, поэтому для обеспечения необходимого по соображениям прочности теплового состояния деталей, подверженных воздействию высоких температур, используют системы охлаждения. Наибольшее внимание среди охлаждаемых деталей уделяется рабочим лопаткам, как наиболее нагруженным элементам турбины. Используемые в настоящее время способы охлаждения значительно усложняют их конструкцию, тем самым удорожая ее проектирование и изготовление по сравнению с неохлаждаемыми лопатками, что приводит к увеличению капитальных затрат. Частично избежать подобных сложностей можно при использовании парциального охлаждения, при котором через часть сопловых каналов вместо продуктов сгорания подается охлаждающий агент (рис. 1). При вращении рабочие лопатки попеременно обтекаются горячим газом и охлаждающим агентом, в результате чего их температура снижается до некоторого допустимого среднего значения. В качестве охлаждающего агента целесообразно использовать водяной пар [1], который можно частично или полностью получать за счет утилизации теплоты уходящих газов. Тепловые схемы подобных турбоустановок исследовались в монографии [1], а в работе [2] был сделан вывод, что газопаровая турбина должна быть одноступенчатой. Там же была предложена оригинальная биротативная конструкция турбины.

При парциальном охлаждении циклическое изменение направления и величины теплового потока на поверхности рабочей лопатки формирует в ней нестационарное периодическое температурное поле – тепловые волны, которые являются причиной возникновения термоциклических напряжений. Поэтому анализ температурного состояния является крайне важным для дальнейшей оценки прочности лопаток. Для его проведения необходимо знать геометрию рабочих лопаток и основные газодинамические параметры рабочих тел, которые можно получить после предварительного расчета ступени на среднем диаметре.

В проведенном исследовании была получена зависимость, связывающая основные параметры рабочих тел в ступени

$$\frac{\mu_c c_{1s} v_{2s} \sin \alpha_1}{\mu_p w_{2s} v_{1s} \sin \beta_2} = \text{idem},$$

где μ – коэффициент расхода решетки; c , w – абсолютная и относительная скорости, м/с; v – удельный объем, м³/кг; α , β – углы выхода из решетки в абсолютном и относительном движении, град; величины, относящиеся к сопловой и рабочей решеткам, содержат в нижних индексах буквы «с» и «р», к выходам из них – цифры «1» и «2»; параметры, соответствующие теоретическому расширению без потерь, содержат в индексах букву «s». При выводе формулы были приняты допущения, что рабочие тела не смешиваются в ступени, а их степени парциальности не меняются по ходу проточной части. Также пренебрегалось изменением расхода и остальных параметров газа из-за выпуска охлаждающего агента в проточную часть через щелевые каналы в выходных кромках сопловых лопаток.

Найденное выражение было преобразовано и проанализировано для случая термически и калорически совершенных газов, что является справедливым для газовых турбин. Анализ показал, что наиболее оптимальной для работы ступени является близкая к нулю степень реактивности рабочих тел. В связи с этим решетки должны профилироваться с уменьшенными или нулевыми градиентами реактивности по высоте ступени для предотвращения диффузорного течения в корневой зоне рабочей решетки.

Также было получено условие безударного входа газа и пара в рабочую решетку, имеющее вид

$$\operatorname{ctg} \alpha_{1п} = \frac{\operatorname{ctg} \beta_{1г} + u/c_{1п} \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \beta_{1г} + 1 - (u/c_{1п})^2}}{1 - (u/c_{1п})^2},$$

где u – окружная скорость, м/с; буквы «г» и «п» в индексах обозначают параметры газа и пара.

С помощью найденных зависимостей были рассчитаны газопаровые ступени с парциальным охлаждением рабочих лопаток и построены профили рабочих лопаток. Для этих профилей с помощью формул [3,4] была проведена оценка термонапряженного состояния в районе кромок, спинки и корытца.

Список литературы

1. *Зысин В.А.* Комбинированные парогазовые установки и циклы. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 187 с.
2. *Зысин Л.В.* Высокотемпературные турбины с парциальными подводами газа и пара // Труды ЛПИ. – 1964. – № 232. – С. 20–25.
3. *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.
4. *Карышев А.К., Супельняк М.И.* Термоциклические напряжения в цилиндре, вызванные нестационарными периодическими условиями теплообмена с внешней средой // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. – 2012. – № 2. – С. 47–58.

Супельняк Максим Игоревич — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: max2901@mail.ru.

Карышев Анатолий Константинович — профессор, кандидат технических наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: k1kf@bmstu-kaluga.ru.

В.С. Захарова, А.В. Лысцев, А.В. Землянский

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

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

К твердому топливу можно отнести каменный и бурые угли, горючие сланцы, торф, древесину, ТБО.

Применять такое топливо возможно в установках комбинированного цикла. Это парогазовые установки (STAG), и установки, работающие по принципу внутрицикловой газификации угля (IGCC). Принципиальная схема установки IGCC показана на рисунке 1. Данный принцип выработки электроэнергии еще называют технологией «чистого угля». Благодаря газификации угля, значительно снижается уровень выбросов парниковых газов, а также несгоревших угольных микрочастиц, сажи и ртути.

Электростанции подобного типа состоят из газогенератора, который производит газификацию угля в потоке с воздушной или кислородной продувкой, установки очистки холодного газа, а также непосредственно газовой турбины комбинированного цикла. Установка газификации угля (газогенератор) производит горючий газ, который после очистки попадает в газовую турбину, и приводит её в действие. КПД электростанции комбинированного цикла на 20% больше, чем у обычной угольной электростанции, при том, что количество выбросов во внешнюю среду снижено в 2-3 раза. Электростанции подобного типа могут работать на низкосортном угле, который не подходит для классических паровых котлов.

В известных зарубежных разработках [1-4] для внутрицикловой газификации углей используются традиционные методы газификации. 11 тепловых электростанций (9 в США и 2 в Европе) уже вырабатывают электроэнергию, начиная с 1979г., используя комбинированную внутрицикловую газификацию водо-угольной суспензии под высоким давлением по методу Тексако. К этим проектам относятся электростанция «Полк-Тампа» (Polk-Tampa Electric Company), Вобаш-ривэ (Wabash River) и др. КПД производства электроэнергии на таких станциях достигает 45%. К преимуществам данного процесса относятся: высокая степень газификации углерода угля, достигающая 97-99%, а к недостаткам – высокая коррозия металла теплообменников, небольшой срок эксплуатации водо-угольных форсунок, равный 2-3 месяцам их непрерывной работы. Газификация угля в США, является технологией стратегического выбора, как для производства электроэнергии, так и для получения синтез-газа и водорода из угля. В настоящее

время в США уже работает несколько ТЭС с внутрицикловой газификацией угля (Tampa Polk Power Station, Wabash River Power Station и др.) единичной электрической мощностью более 250МВт, включая газификационный проект в Орlando с энергоблоком мощностью-нетто 285МВт. На рис.1 приведена принципиальная схема работы ТЭС с использованием этого метода. 1 – приготовление водно-угольной смеси (ВУС); 2 – ВУС; 3 – кислород из воздуха; 4 – газификатор Тексако; 5 – питательная вода; 6 – радиатор для охлаждения синтез-газа; 7 – пар высокого давления; 8 – пар; 9 – шлак; 10 – рециркулируемая неосветленная вода; 11 – синтез-газ; 12 – неочищенный синтез-газ; 13 – охладитель газа; 14 – удаление кислого газа; 15 – серная кислота; 16 – установка для производства серной кислоты; 17 – чистый синтез-газ; 18 – дымовая труба; 19 – паровая турбина; 20 – генератор; 21 – рекуператор теплоты - парогенератор; 22 – горячие отходящие газы; 23 – газовая турбина; 24 – азот из воздуха (установка разделения воздуха); 25 – воздух; 26 – камера сжигания; 27 – серооксиглерод (COS); 28 – гидролиз; 29 – аминовый скруббер.

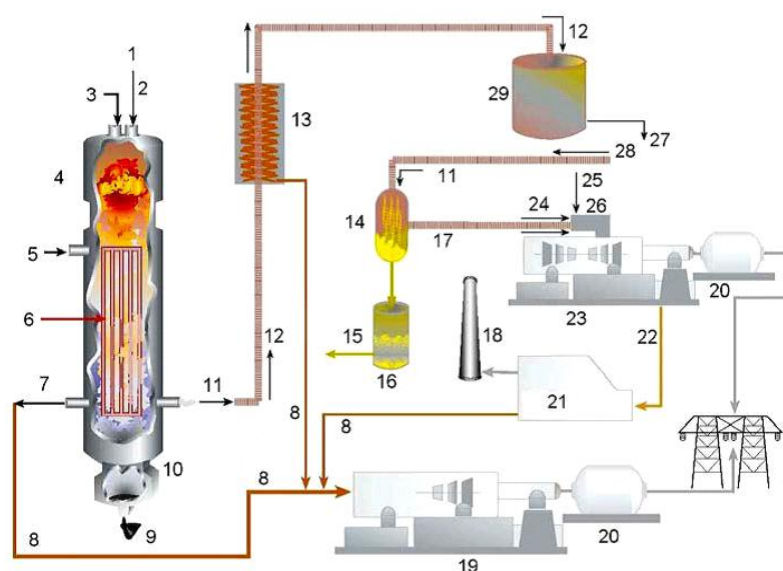


Рис. 1 Схема процесса для ТЭС с внутрицикловой газификацией угля по методу Тексако

Из существующих способов комплексной переработки углей особый интерес представляют так называемые совмещенные плазменные технологии. Использование плазменной технологии газификации углей имеет ряд преимуществ перед традиционными технологиями: отсутствие характерных для традиционных технологий автотермической газификации угля балластирующих примесей (N_2 , CO_2 , H_2O) в получаемом синтез-газе. Плазменная технология позволяет газифицировать угли любой степени метаморфизма (от сланцев до антрацитов) и получать синтез-газ высокого качества, свободный от оксидов серы и азота. В совмещенных технологических процессах, с применением плазменных технологий газификации

твердого топлива, утилизируются и органическая (ОМУ), и минеральная масса углей (ММУ) составляющие иногда 30-40% и более от массы низкосортного топлива. При этом весьма существенно то, что в совмещенных технологиях ценные компоненты получают преимущественно восстановлением оксидов минеральной массы углей.

Основные принципы комплексной плазменной переработки топлив заключаются в нагреве смеси угля, с любым окислителем (или их комбинацией) в электродуговой зоне плазмотрона, с целью получения в едином технологическом процессе из ОМУ высококалорийного синтез-газа, свободного от оксидов серы и азота, а из ММУ — ценных составляющих (кремния, ферросилиция, карбосилиция, глинозема, микроэлементов и др.).

Плазменный газификатор совмещенного типа представлен на рисунке 2.1 – плазменный газификатор; 2 – диафрагма, камера разделения синтез-газа и шлака; 3 – шлакосборник; 4 – камера вывода синтез-газа; 5 – диафрагма; 6 – камера гидратации; 7 – пылепитатель; 8 – система водяного охлаждения; 9, 10 – система электроснабжения; 11, 12 – система подачи центрального электрода; 13 – парогенератор; 14 – предохранительный клапан; 15 – подъемник шлакосборника; 16 – графитовый стержневой электрод (катод); 17 – графитовый кольцевой электрод (анод).

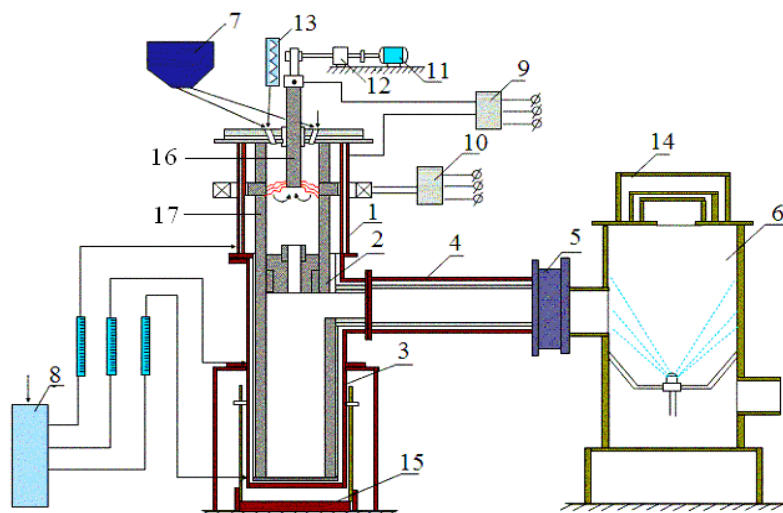


Рис. 2 Опытная установка для плазменной газификации твердого топлива

В отличие от известных исследований по комплексному использованию топлив предложенные способы плазменной технологии комплексной переработки обладают следующими преимуществами:

- практически полная утилизация как органической, так и минеральной частей углей в едином технологическом процессе. Степень использования ММУ 90—95 %, а ОМУ — 98—99 %;

- использование в процессе плазменной технологии комплексной переработки кислорода не только ОМУ, но и ММУ, что на 20—30 % сокращает расход внешнего окислителя и снижает как удельные энергозатраты, так и объемы уходящих газов;

- образование минимальных количеств оксидов серы и азота ($< 10 \text{ мг/нм}^3$) в газообразных продуктах переработки углей, что позволяет ориентировать способы плазменной технологии комплексной переработки на перспективу для создания экологически чистых ТЭС на твердом топливе с утилизацией твердых энергетических отходов;

- получение особо ценных микроэлементов (уран, молибден, ванадий и др.) из твердых топлив, которые затруднительно извлекать традиционными методами;

- возможность использования газообразных (синтез-газ) и конденсированных продуктов плазменной технологии комплексной переработки в нескольких отраслях промышленности (энергетика, металлургия, химическая промышленность).

Из отечественных разработок следует отметить реактор – газификатор ИПХФ, находящийся на территории ФГУП «ММПП «Салют», представленный на рисунке 3. 1 – сырье, 2 - инерт, 3 - весы и конвейер подачи инерта, 4 - воронка сбора возвратного инерта, 5 - конвейер возвратного инерта, 6 - конвейер подачи сырья, 7 - зола, 8 - контейнер для сбора золы, 9 - конвейер отвода золы с инертном от реактора, 10 - питатель, 11 - продукт-газ. 12 - продукты сгорания продукт-газа, 13 - вторичный воздух на охлаждение продуктов сгорания продукт-газа, 14 - первичный воздух на горение, 15 - пусковое топливо, 16 - блок розжига, 17 - тар, 18 - воздух на наддув реактора, 19 - пропан к горелке дежурного факела, 20 – дымовая труба.

Принцип работы предусматривает последовательное осуществление следующих операций: прием, взвешивание, разгрузка топлива на промплощадке; складирование топлива; подача топлива на загрузочный транспортер газификатора; газификация с получением продукт - газа; удаление золоостатков; сжигание полученного продукт - газа на горелочном устройстве с последующим выходом продуктов сгорания в дымовую трубу (утилизация теплоты не предусмотрена).

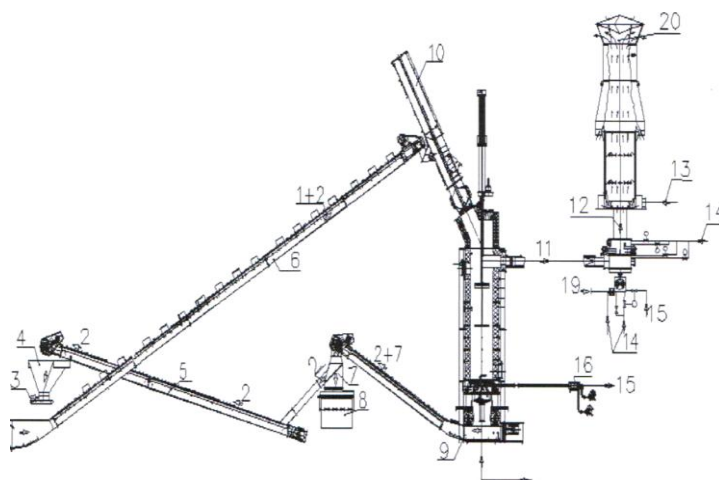


Рис. 3 Схема установки



Рис.4 Комплекс с реактором - газификатором на ФГПУ «ММПП «Салют»

Основные достоинства реактора-газификатора ИПХФ.

- Продукт-газ выходит из реактора-газификатора холодным, поэтому не требуется дополнительное оборудование для его охлаждения перед системой газоочистки.
 - Зола, выгружаемая из реактора, практически не содержит не-сгоревшего углерода и является холодной, поэтому не требуется шла-ковая водяная ванна для ее охлаждения.
 - Непрерывность и полная автоматизация всего процесса.
 - Процесс газификации имеет высокий энергетический КПД до 90 %, позволяющий перерабатывать топливо с зольностью до 90 % и влажностью до 60 %.
 - Технологическая простота увеличения мощности за счет уста-новки дополнительного числа модулей-газификаторов (при соответст-вующей синхронизации рабочего процесса в реакторах).
 - Высокая адаптивность реактора к существующим системам га-зоочистки дымовых газов, сортировки ТБО, рециклинговым технологи-

ям восстановления вторичного сырья из ТБПО, утилизации золы и шлака, утилизации тепла.

- Сравнительно высокая экологическая чистота продукт-газа.

В основу разрабатываемой технологии заложены критерии концепции экологически чистой ТЭС на твердом топливе, согласно которой любая новая технология топливоиспользования должна обеспечить безвредное для окружающей среды и эффективное сжигание твердого топлива и комплексную утилизацию отходов. При этом выбросы золы не должны превышать 0,5 г/нм³ дымовых газов, оксидов серы — 0,2—0,3 г/нм³ и оксидов азота — 0,15—0,20 г/нм³. Особенно важными являются требования, предъявляемые к золе и твердым отходам ТЭС: доля их утилизации должна составлять не менее 80 % от ММУ.

Выполненные расчеты газификации трех энергетических углей (Кузнецкого, Подмосковного и Экибастузского) показали, что из всех этих углей получается высококачественный синтез-газ, который можно эффективно использовать для выработки электроэнергии.

Использованные источники:

1. V.E.Messerle, A.B.Ustimenko. The 28th International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems. Thermal Engineering (English Translation of Teploenergetika), Vol.51, N 1, 2004, P.76-79.

2. Мессерле В.Е., Устименко А.Б. 28-я Международная конференция по использованию угля и топливным системам. Теплоэнергетика, №1, 2004, С.73-76.

3. V.E.Messerle; A.B.Ustimenko. The 31st International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems. Thermal Engineering (English Translation of Teploenergetika), Vol.54, N 3, 2007, P. 242-247.

4. Мессерле В.Е., Устименко А.Б. 31-я Международная техническая конференция по использованию угля и топливным системам (Неформальное название - the 2006 ClearWater Coal Conference). Теплоэнергетика. 2007. N 3. С.71-76.

5. Gas Turbine world 2012 GTW Handbook, volume 29.

Захарова В.С. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: zvera030991@gmail.com.

Лысцев А.В. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lystsev1991@gmail.com.

Землянский А.В. — доцент, к.т.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: zemlyansky.k1kf@yandex.ru.

А.В. Малинин, С.И. Мосин, Н.В. Гридчин

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ТРУБОК С РАЗЛИЧНЫМИ ФОРМАМИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

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

Поверхность теплообмена должна характеризоваться высокой технологичностью, низкой стоимостью, стабильностью теплогидравлических характеристик, малой склонностью к загрязнению при работе на загрязненном теплоносителе, простотой очистки в случае ее загрязнения во время эксплуатации, а также отвечать общим требованиям, предъявляемым к теплообменному аппарату. В эти требования обычно включают ограничение его массогабаритных характеристик. В некоторых случаях (установки аэрокосмического или транспортного применения) массогабаритные ограничения могут иметь решающее значение.

Уменьшение размеров теплообменного аппарата можно достичь за счет интенсификации процессов теплообмена. Простым и очевидным способом интенсификации теплообмена является увеличение скорости теплоносителя, но это связано с увеличением гидравлического сопротивления теплообменника. Поэтому стремятся найти такие способы, которые позволяют уменьшить размеры теплообменного аппарата без существенного изменения (увеличения) затрат энергии на циркуляцию теплоносителя.

Многочисленные теоретические и экспериментальные работы последних десятилетий посвящены способам эффективного гидродинамического воздействия на поток теплоносителя в каналах теплообменного устройства с помощью привнесенной шероховатости. Замечено, что наибольший эффект интенсификации теплообмена достигается за счет увеличения турбулентной проводимости в тонком пристенном слое, где градиент температур достигает максимальных значений. Следовательно, если воздействие на поток сведется к воздействию только на пристенный слой без увеличения степени турбулентности ядра потока, то потери давления в таком канале возрастут незначительно.

Генераторы вихрей должны порождать такую турбулентность, которая способствует росту турбулентной проводимости в пристенном слое на всей длине канала, но не будет вызывать увеличения степени турбулентности ядра потока. При частом расположении турбулизаторов порожденные ими турбулентные пульсации не затухают и диффундируют в ядро потока. При редком расположении турбулизаторов турбулентные пульсации успе-

вают затухать раньше, чем поток достигает очередного турбулизатора, и часть поверхности в результате работает как гладкая.

При оптимальном расположении турбулизаторов вся стенка охвачена интенсивными турбулентными пульсациями, которые, однако, не выносятся в поток.

В результате турбулентных пульсаций потока возле поверхности теплообмена увеличивается теплоотвод от интенсифицированной поверхности. Обтекание трубок при ламинарном и турбулентном течении представлено на рисунке 1.

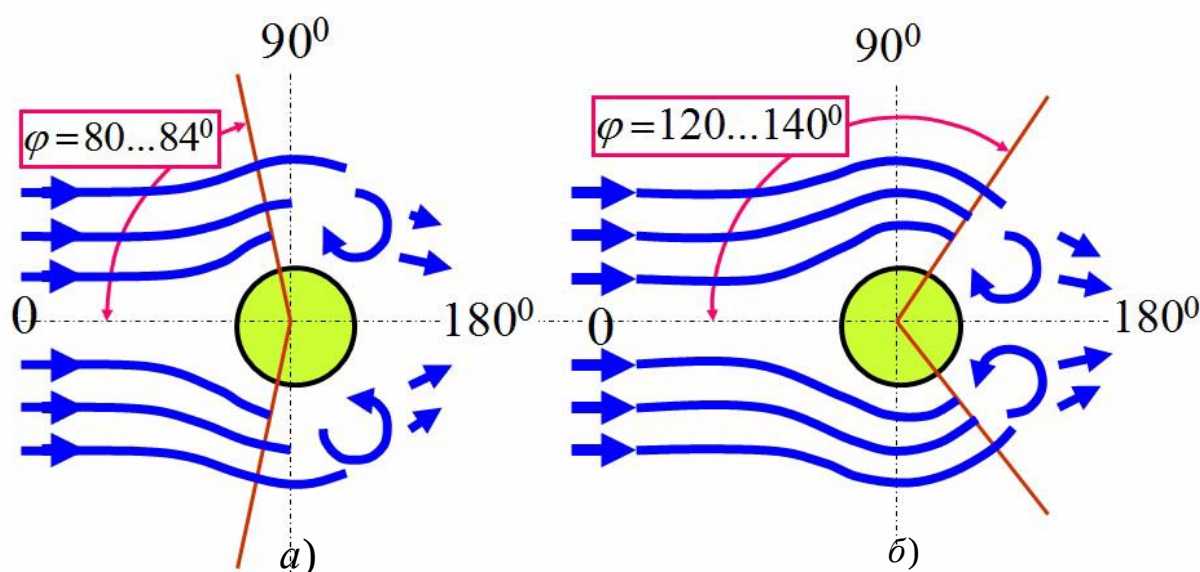


Рис. 1 Отрыв пограничного слоя при ламинарном (а) и турбулентном (б) обтекании трубок

Таким образом, можно сделать вывод, что главным способом является подбор поверхности с максимальной теплоотдачей при минимальном аэродинамическом сопротивлении и с возможностью более простого получения требуемой поверхности. Выполнение требуемой задачи лежит через: подбор материала с высоким коэффициентом теплопроводности, развитие поверхности теплообмена установленных форм, выбор технологического исполнения получения поверхности. Предлагаемые технические решения должны быть технологичными, не приводящими к существенному повышению трудоемкости и стоимости производства поверхностей нагрева.

Кроме применения различных форм турбулизаторов возможны переходы от круглой формы к изменению формы на удобообтекаемые – овальную или плоскоовальную.

Эффективность теплообменного аппарата определяется: коэффициентом теплоотдачи и коэффициентом гидравлических потерь.

В работе проводились исследования влияние формы поверхности теплообмена на аэродинамические и тепловые свойства на примере медных трубок с внешним диаметром 8 мм, толщиной стенок 1 мм и длиной 100 мм. Исследовались трубки четырех видов: с гладкой поверхностью, с однозаходной метрической резьбой, многозаходной двухсторонней резьбой и с многозаходной односторонней резьбой.

Продувка осуществляется на двух режимах со скоростями воздушного потока: $C_1 = 20 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; $C_2 = 26 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Исследуемые трубки были зафиксированы специальным приспособлением, в котором с помощью тройников устанавливались термодпары по оси трубки от края сопла. Для оптимальной продувки трубок необходимо обеспечить равномерное поле скоростей на протяжении всего рабочего участка установки, исключая отрывы потока и различные завихрения. В противном случае точность эксперимента будет минимальной из-за пульсаций потока на выходе из сопла.

Результаты экспериментальных исследований показали, что форма резьбового профиля при изменении шага и числа заходов влияет на изменение теплоотдачи и значительно влияет на коэффициент сопротивления. На коэффициент гидравлического сопротивления в каналах с турбулизаторами

сильное воздействие оказывает профиль выступа и коэффициент лобового сопротивления, то есть коэффициент сопротивления уменьшается по мере уменьшения коэффициента профильного сопротивления.

Так как геометрические параметры исследуемых трубок не позволяли провести замеры изменения температуры воды циркулирующей через трубки (в данном случае погрешность измерения показаний оказалась равной погрешности измерения прибора), эксперимент был направлен на получение коэффициентов теплопередачи исследуемых поверхностей и их сравнение в стационарном потоке. Термодпары были зафиксированы с помощью системы тройников и изолированы от контакта с металлом, чтобы исключить лишний отвод тепла для точного замера температуры воды.

Термодпары расположены по торцам трубки в осевом направлении. Эксперимент проводился в лаборатории при стандартных атмосферных условиях. Вода при температуре 100 С° подавалась через отверстие в тройнике, после чего оно закрывалось. После того как поле температур распределилось по всей длине трубки, производилось включение аэродинамической трубы. Задача эксперимента состояла в определении коэффициента теплопередачи при данной толщине стенки трубки и стационарном

теплоносителя, в течение установленного времени от заданного начальным условием установившегося поля температур.

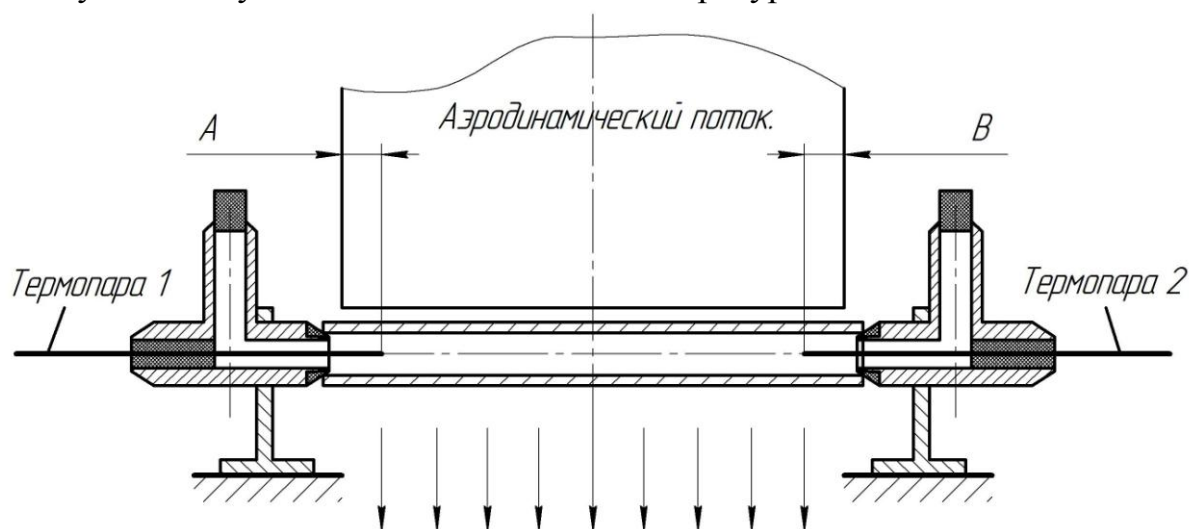


Рис.2 Экспериментальный стенд

На рисунке 2 представлена принципиальная схема экспериментальной установки. В течение всего эксперимента изменение температуры окружающей среды составило не более $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для определения равномерности потока по аэродинамической трубе термопара перемещалась на расстояние А и В ($A=B$), при обдувке термопары смещались ближе к центру потока и замерялся результат. Разность показаний от центра к краю потока составило $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Малая эффективность многозаходных трубок, с точки зрения аэродинамики, объясняется большим сопротивлением, а следовательно, и трением на их поверхности при обтекании плоскопараллельным потоком. Однозаходная трубка, напротив, за счет небольшой ширины зуба оребренной поверхности (метрическая резьба) и расположения её под углом 90^0 относительно образующей поверхности, обладает малыми потерями.

С точки зрения теплообмена лучшими интенсифицированными поверхностями в ходе эксперимента оказались трубки с однозаходной метрической резьбой, и многозаходной двухсторонней резьбой.

Проведенные многочисленные исследования показали, что лучшим является такой вариант интенсифицированной поверхности, которая позволяет при сохранении уровней тепловой нагрузки и циркуляционной мощности уменьшать размер поверхностей теплообмена, или при сохранении поверхностей теплообмена уменьшать циркуляционную мощность, или при сохранении поверхности теплообмена и циркуляционной мощности увеличивать тепловую нагрузку теплообменника. Следовательно, нуж-

но выбирать такие методы воздействия на поток теплоносителя, которые не приводят к росту потерь.

Список литературы

1. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок: Учебник для вузов / В.Л. Иванов, А.И. Леонтьев, Э.А. Манушин, М.И. Осипов; Под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 592 с.: ил.

2. Письменный Е.Н. Пути совершенствования трубчатых воздухонагревателей // Теплоэнергетика. – 2012. – №7. – с.67 – 72.

3. Леонтьев А.И., Олимпиаев В.В. Анализ эффективности пристенных закручиваний потока (обзор) // Теплоэнергетика. – 2013. – №1. – с.68 – 78.

Малинин А.В. — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 5cyber5@mail.ru.

Мосин Сергей Игоревич — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sergei.mosin2013@yandex.ru.

Гридчин Н.В. — ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: gridchin_n1980@mail.ru.

А.В. Птахин, М.И. Супельняк, В.С. Крылов

РАСЧЕТ СТУПЕНИ ТУРБОМАШИНЫ НА СМЕСИ H_2O+CO_2

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

На сегодняшний день возможности повышения эффективности паротурбинных установок за счет усложнения тепловых схем являются практически исчерпанными, а дальнейший прогресс в этом направлении видится в значительном увеличении температуры пара перед турбиной. Препятствием для этого является конструкция традиционных парогенераторов, основанных на внешнем сжигании топлива, отчего максимальная температура пара лимитирована механическими свойствами сплавов поверхностей нагрева. Данная проблема может быть решена путем перехода к внутреннему сжиганию топлива в среде воды или низкотемпературного водяного пара. В связи с этим естественен интерес разработчиков энергоустановок к использованию в качестве топлива H_2 и O_2 , продуктом сгорания которых является лишь H_2O .

Однако водород в природе находится лишь в связанном состоянии и его выделение из химических соединений связано с затратами энергии, которые в значительной мере ослабляют положительный термодинамический эффект от повышения максимальной температуры цикла. Энергозатратным является и процесс выделения O_2 из воздушной атмосферы.

Анализ тепловых схем энергоустановок с водород-кислородным перегревом водяного пара, получаемого в котле, с учетом затрат энергии на производство и сжатие H_2 и O_2 показал, что заметный прирост КПД может быть получен только в том случае, когда процессы производства H_2 и O_2 и выработки электроэнергии увязаны в единый оптимально организованный технологический процесс. Однако и в этом случае такие установки оказываются менее эффективными, чем парогазовые, а дальнейшее повышение их КПД представляется проблематичным. Альтернативой H_2 в качестве топлива может быть CH_4 или синтез-газ, являющийся продуктом газификации угля. Как показывают исследования [1], энергоустановки, в которых реализовано внутреннее сжигание CH_4 , могут по ряду показателей составить конкуренцию ПГУ, работающих на продуктах газификации угля.

В состав парогазовой смеси, получаемой в результате сжигания CH_4 непосредственно в среде пара или питательной воды, входят неконденсирующиеся газы (преимущественно CO_2), составляющие от 4 до 20% массы смеси. В связи с этим к конструктивному облику конденсирующих устройств и методам их расчета предъявляются особые требования. Помимо

этого при проектировании турбины должны быть учтены изменения термодинамических свойств смесового рабочего тела по сравнению с чистым водяным паром. Это достигается выбором соответствующего уравнения состояния реального газа. При этом нужно учитывать, чтобы уравнение состояния имело достаточно простую форму и было удобным для проведения расчетов на ЭВМ. Среди них можно выделить двухпараметрическое уравнение Редлиха-Квонга и его модификации, трехпараметрическое уравнение Пенга-Робинсона, использующееся для описания нормальных углеводородов, восьмипараметрическое уравнение Бенедикта-Вебба-Рубина, хорошо описывающее свойства легких углеводородов и их смесей, и некоторые другие.

Оптимизация проточной части современных турбин проводится с помощью таких CFD пакетов, как ANSYS CFX, ANSYS FLUENT, STAR-CD, NUMECA FINE Turbo и др., в которые включены наиболее употребительные в инженерных расчетах уравнения состояния реальных газов. При использовании ANSYS CFX можно проводить расчеты по стандартному уравнению Редлиха-Квонга, его модификации Аунгера, уравнению Пенга-Робинсона и уравнениям IAPWS-IF97 для воды и водяного пара. Если принять, что для окисления CH_4 в камере сгорания используется O_2 , подаваемый в стехиометрическом соотношении, то рабочим телом в турбине будет смесь H_2O и CO_2 . Расчет ее термодинамических свойств целесообразно проводить либо по уравнению Редлиха-Квонга, являющегося наиболее удачным двухпараметрическим уравнением состояния, либо по уравнению Редлиха-Квонга-Аунгера, представляющего собой четырехпараметрическое уравнение.

Чтобы определить допустимые границы использования данных уравнений, необходимо провести сравнение результатов с достоверными данными. Поскольку наибольшую долю смеси составляет H_2O , то можно ожидать, что ее термодинамические свойства будут близки к свойствам водяного пара. Поэтому выбранное уравнение состояния должно хорошо описывать свойства водяного пара, которые точно рассчитываются по уравнениями IAPWS-IF97. Для этого были рассчитаны располагаемые теплорепарды $\Delta h_0^*(p_k) = h(p_0^*, T_0^*) - h(p_k, s_0)$, удельные объемы $v_0^* = v(p_0^*, T_0^*)$, $v_k = v(p_k, s_0)$ и температура $T_k = T(p_k, s_0)$ для $p_0^* = 13,58 \text{ МПа}$ и $T_0^* = 850^\circ\text{C}$. Как показали результаты расчетов, уравнение Редлиха-Квонга и его модификация Аунгера хорошо описывают свойства водяного пара вплоть до $p_k = 100 \text{ кПа}$ (табл. 1), с дальнейшим понижением давления расхождение быстро увеличивается, достигая 50 % при $p_k = 10 \text{ кПа}$. Отсюда был сделан вывод о допустимости применения данных уравнений для рас-

чета смеси при $p_k > 100 \text{ кПа}$. Проведенный расчет смеси показал, что массовая доля CO_2 составляет порядка 5 %, а отличие ее свойств от водяного пара составляет порядка 3 %, т.е. вполне допустимо проводить расчет для H_2O .

Таблица 1

Сравнение уравнений состояния для водяного пара

Уравнение	IAPWS-IF97	Редлих-Квонг	Аунгер
p_k , кПа	100	100	100
v_0^* , л/кг	37,436	36,887	36,596
Δh_0^* , МДж/кг	1,544	1,531	1,539
v_k , м ³ /кг	1,703	1,692	1,691
T_k , К	374,541	369,242	369,989

Список литературы

1. Газопаровая установка со сжиганием топлива в кислороде // Теплоэнергетика. – 2010. – № 2. – С.75–77.

Птахин Антон Викторович — ассистент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dr.ago.suv@mail.ru.

Супельняк Максим Игоревич — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: max2901@mail.ru.

Крылов Виктор Сергеевич — студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dr.ago.suv@mail.ru.

М.И. Супельняк, А.К. Карышев

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЛНЫ И ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ТВЕРДОМ ТЕЛЕ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ КАНАЛОМ

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

В телах, между которыми и окружающей средой происходит циклически повторяющийся процесс теплообмена, со временем формируется нестационарное периодическое температурное поле. После многократного повторения циклов нагрева-охлаждения их температура практически не зависит от начальных условий и определяется только граничными условиями теплообмена.

Периодическим изменением температуры деталей во времени сопровождается работа ряда технических устройств. К ним относятся элементы конструкции двигателей внутреннего сгорания, теплообменных аппаратов регенеративного типа, турбин с парциальным охлаждением рабочих лопаток и т.д. Периодические тепловые процессы влияют на надежность и эффективность работы устройств. Так, от характера изменения температуры во времени зависят термоциклические напряжения, возникающие в парциально охлаждаемых рабочих лопатках турбин и влияющие на их многоцикловую термоусталостную прочность, и эффективность работы регенераторов, определяемая количеством теплоты, передаваемым посредством насадок от горячего теплоносителя к холодному.

Для исследования периодических тепловых процессов используются различные упрощенные модели. Так, в работах [1,2] авторы использовали модель цилиндра для оценки термонапряженного состояния парциально охлаждаемой рабочей лопатки. Такой подход позволяет рассчитать температурные волны и термоциклические напряжения в районе кромок и спинки лопатки, ограниченных выпуклыми поверхностями. Однако корытце лопатки ограничено вогнутой поверхностью, поэтому для него целесообразно выбрать другую модель. В качестве нее можно использовать неограниченное твердое тело с цилиндрическим каналом, теплообмен на поверхности которого с внутренней жидкой средой происходит по закону Ньютона-Рихмана. В результате проведенного исследования с использованием подходов [1,2] было получено решение несвязанной задачи термоупругости для такой модели.

Для определения температурного поля рассматриваемой области была решена краевая задача теплопроводности без начальных условий

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (R < r < \infty, t > -\infty),$$

$$\lambda \frac{\partial T(R, t)}{\partial r} = \alpha(t) [T(R, t) - T_c(t)],$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} T(r, t) \neq \infty,$$

где $T \equiv T(r, t)$ – температура неограниченного твердого тела, К; r – радиальная координата, м; t – время, с; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; R – радиус цилиндрического канала, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $\alpha(t + T) = \alpha(t) > 0$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $T_c(t + T) = T_c(t)$ – температура внутренней среды, К; T – период циклического процесса теплообмена, с.

После определения поля температуры было найдено вызванное им напряженно-деформированное состояние тела. Для этого была решена квазистатическая задача теории упругости в перемещениях

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) - \frac{u_r}{r^2} = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \beta \frac{\partial \vartheta}{\partial r}, \quad (R < r < \infty, t > -\infty),$$

$$(1 - \mu) \frac{\partial u_r(R, t)}{\partial r} + \mu \frac{u_r(R, t)}{R} = (1 + \mu) \beta \vartheta(R, t),$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} u_r(r, t) = 0,$$

где $u_r = u_r(r, t)$ – радиальное перемещение, м; β – коэффициент линейного температурного расширения, К⁻¹; $\vartheta \equiv \vartheta(r, t) = T(r, t) - \bar{T}$ – избыточная температура, К; μ – коэффициент Пуассона. Напряженное состояние определялось по известному полю перемещения с помощью известных соотношений линейной теории упругости.

Прочность тела оценивалась с помощью коэффициента запаса усталостной прочности $n_\sigma = 2\sigma_{-1}/\Delta\sigma_{\text{экв}}(R)$, где σ_{-1} – предел выносливости материала; $\Delta\sigma_{\text{экв}}(R)$ – размах колебаний эквивалентного напряжения на поверхности канала. Последняя величина вычислялась через размахи колебаний радиальных, окружных и осевых напряжений по теории удельной потенциальной энергии формоизменения

$$\Delta\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{(\Delta\sigma_{rr} - \Delta\sigma_{\varphi\varphi})^2 + (\Delta\sigma_{\varphi\varphi} - \Delta\sigma_{zz})^2 + (\Delta\sigma_{zz} - \Delta\sigma_{rr})^2}{2}}.$$

Список литературы

1. *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.
2. *Карышев А.К., Супельняк М.И.* Термоциклические напряжения в цилиндре, вызванные нестационарными периодическими условиями теплообмена с внешней средой // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. – 2012. – № 2. – С. 47–58.

Супельняк Максим Игоревич — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: max2901@mail.ru.

Карышев Анатолий Константинович — профессор, кандидат технических наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: k1kf@bmstu-kaluga.ru.

М.И. Супельняк, А.К. Карышев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ВОЛН В ЦИЛИНДРЕ

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

Работа ряда технических устройств сопровождается протеканием в их элементах периодических тепловых процессов. К ним относятся турбины с парциальным охлаждением рабочих лопаток, теплообменные аппараты регенеративного типа, двигатели внутреннего сгорания и т.д. Температурное состояние их деталей определяется из решения уравнения теплопроводности с граничными условиями третьего рода. В некоторых случаях необходимо принимать во внимание нестационарность коэффициента теплоотдачи, что вызывает трудности принципиального характера. В работе [1] было получено приближенное аналитическое квазистационарное решение одной из таких задач для неограниченного цилиндра при равномерных по всей поверхности нестационарных периодических условиях теплообмена Ньютона-Рихмана. Для его опытной проверки был разработан (рис. 1) и изготовлен экспериментальный стенд (рис. 2).

Схема стенда представлена на рис. 1. Его основным элементом является теплообменный аппарат регенеративного типа 1, который состоит из вертикально расположенных соосных цилиндра и цилиндрического корпуса. Цилиндр имеет диаметр 50 мм и является разборным. Одна из его частей выполнена из фторопласта и используется на участке тепловой стабилизации потока. Другая часть, изготовленная в двух вариантах – из меди и стали, препарирована термopарами. Стальной корпус имеет внутренний диаметр 59 мм и толщину стенки 3 мм. Его наружная поверхность теплоизолирована. В кольцевой канал между цилиндром и корпусом подается вода. Для выравнивания поля скорости на входе в канал и снижения влияния на поток бокового выхода из теплообменного аппарата используются перфорированные пластины. Общая длина канала составляет 470 мм, длина участка стабилизации – 210 мм. Периодическая зависимость температуры среды и коэффициента теплоотдачи от времени в установке создается за счет попеременной подачи в теплообменник горячей и холодной воды с различными расходами. Холодная и горячая вода подаются из открытых емкостей 2 и 3 с помощью центробежных насосов 4 и 5 соответственно. Вода в емкости 2 подогревается двумя ТЭНами суммарной мощностью 6 кВт и в зависимости от текущего режима циркулирует по одному из двух замкнутых контуров. Вода в емкость 3 поступает из водопровода и после прокачки через систему по одному из двух путей сливается в канализацию. Для удаления воздуха в верхней точке системы предусмотрен автоматический воздухоотводчик 6. Расход жидкости, протекающей через кольцевой канал, измеряется с помощью электромагнитного преобразователя расхода НПО «Промприбор» МастерФлоу МФ-5.2.1-Б-И-0,001 7. С помощью хромель-алюмелевых термоэлектрических преобразователей в установке измеряется температура цилиндра в десяти точках и температура жидкости

на входе и выходе из теплообменного аппарата. Последняя термопара расположена достаточно далеко от выхода из корпуса, чтобы поле температуры жидкости перед ней успело выровняться. Для снятия показаний термопар используются два универсальных восьмиканальных регулятора-измерителя компании ОВЕН – ТРМ138 и ТРМ 148, подключенных к ПК. ТРМ148 также используется для управления электромагнитными клапанами фирмы ODE, переключающими направления потоков горячей и холодной воды. Клапаны К1, К3, К6 – нормально закрытые 21А8KV45; К2, К4, К5 – нормально открытые 21А8ZV55G. Время их срабатывания составляет 50–60 мс.

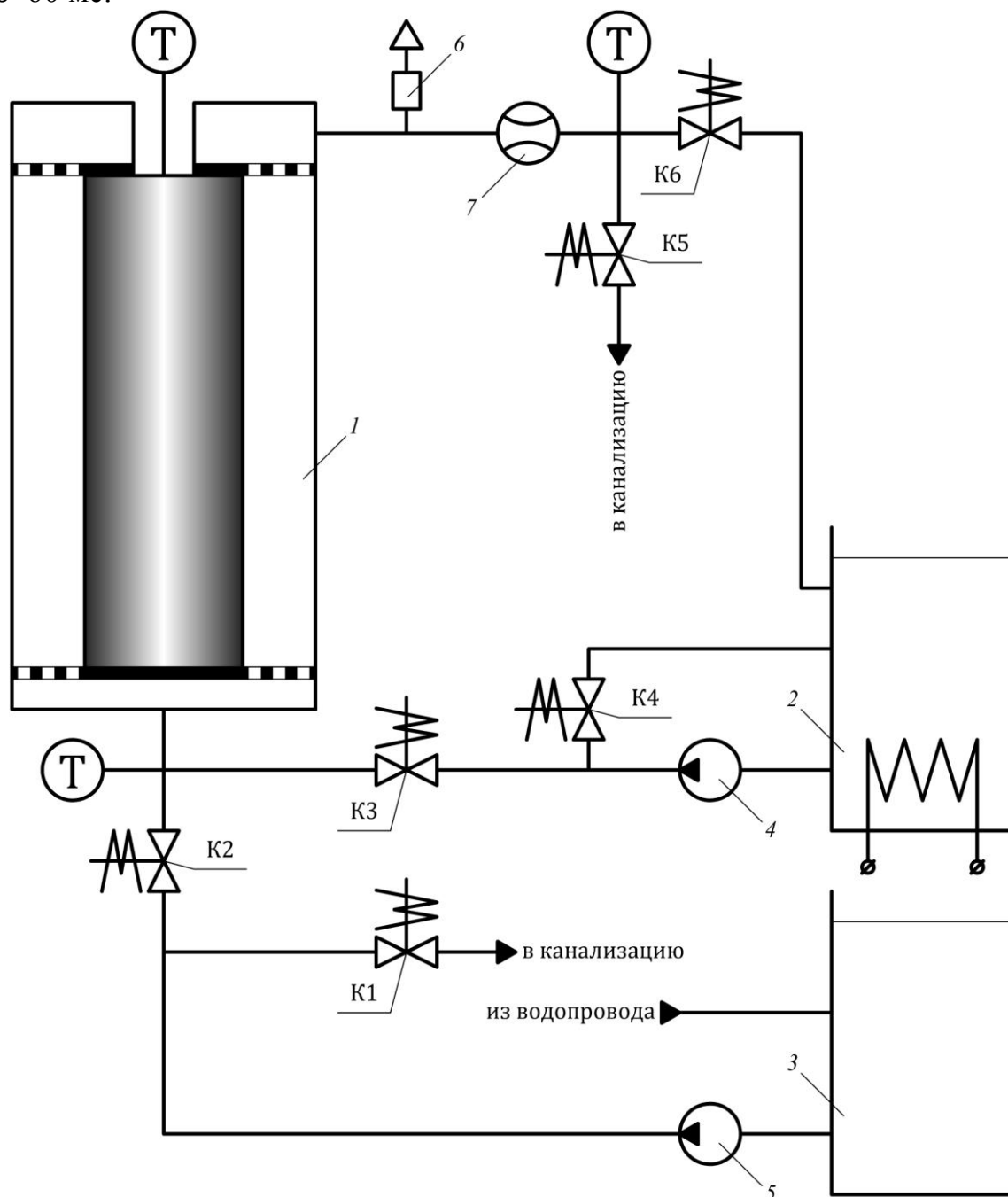


Рис. 1

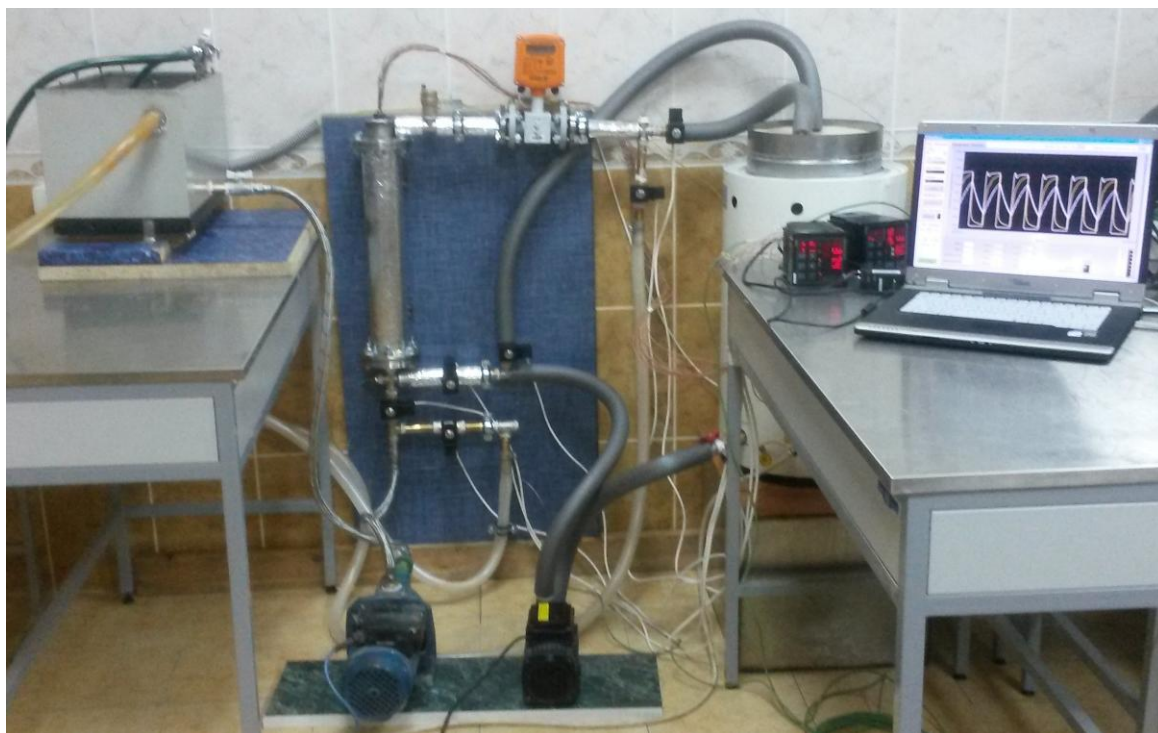


Рис. 2

В разработанной установке вода движется по вертикальному кольцевому каналу, что позволяет добиться достаточно равномерных условий теплообмена в окружном направлении, но не по высоте канала. Чтобы оценить окружную и осевую неравномерность поля температуры цилиндра, термопары, диаметр защитного чехла которых составляет 1 мм, запаиваются оловом в осевые отверстия диаметром 3 мм, расположенные вдоль трех равноудаленных в окружном направлении радиусов и имеющие различную глубину. Схема их установки приведена на рис. 3. Термопары T1, T4, T7 измеряют температуру на расстоянии 400 мм от входа в кольцевой канал, остальные – на расстоянии 350 мм.

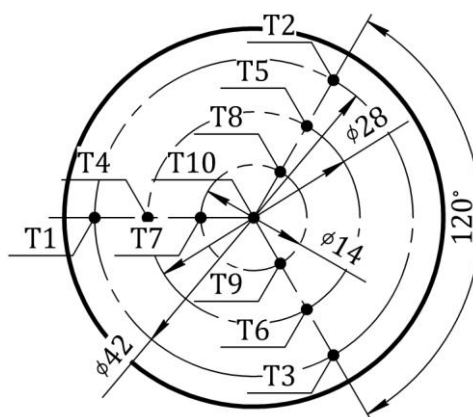


Рис. 3

Список литературы

1. *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.

Супельняк Максим Игоревич — аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: max2901@mail.ru.

Карышев Анатолий Константинович — профессор, кандидат технических наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: k1kf@bmstu-kaluga.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1.

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

3

Матюхин А. В.

Направленная кристаллизация жаропрочных материалов 4

Демин П. М., Пащенко В. Н.

Построение линии конечной конфигурации для многосекционного манипулятора, основанного на механизмах параллельной кинематики с помощью кривой Безье второго порядка 16

Соколова И. Д., Скворцов М. С., Юсупова К. Н.

Программный метод силового расчета привода главного движения металлорежущего оборудования 26

Пантюков А. С., Никитич В. Т.

Радиационные методы контроля как средство повышения качества и производительности 34

Калмыков В. В., Юсупова К. Н.

Сравнительный анализ методов активного контроля состояния режущего инструмента 44

Калмыков В. В., Кудрявцев Н. В.

Фрезерование поверхности головки рельса 52

Павлова Т. В., Калмыков В. В.

Методы увеличения эффективности машиностроительного производства 62

Штокал А. О., Шаталов В. К.

Микродуговое оксидирование как способ создания изоляционного слоя нагревателя космического телескопа 67

Новик О. В., Калмыков В. В.

Научное наследие А. Л. Чижевского в современном машиностроении 70

Волков А. В.

О следствии концепции Ю. М. Ермакова для расчета усилий резания 76

<i>Бриченков С. Н.</i> О точности алгоритмов аналитического расчета сил резания	79
<i>Логутенкова Е. В., Антонюк Ф. И.</i> Рациональное построение комбинированного процесса осадки	85
<i>Ковтун А. В., Смоляр С. Г., Землянский А. В.</i> Состояние и перспективы изготовления деталей турбомашин на 3D-принтере	88
<i>Калмыков В. В., Кудрявцев Н. В., Гольцов И. С.</i> Становление и развитие научной школы кафедры «Технологии машиностроения» МГТУ им. Н. Э. Баумана	93
<i>Вяткин А. Г., Вяткин А. А.</i> Точность операции закрытой штамповки, выполняемой на винтовом прессе	98
<i>Антонюк Ф. И.</i> Удельные силы холодного выдавливания втулок с фланцами	102
СЕКЦИЯ 2. ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА	105
<i>Ткачев Д. А., Труханов К. Ю., Пантюхов Г. П.</i> Автоматизация процесса сварки кольцевых швов	106
<i>Ткачев Д. А., Максимов Н. Н.</i> Изучение влияния параметров режима сварки на напряжения при сварке тонколистовых конструкций	108
<i>Орлик Г. В., Чечеткин К. А.</i> Нанесение антифрикционного покрытия на низкоуглеродистую сталь	112
<i>Вовченко А. В., Труханов К. Ю., Царьков А. В.</i> Предварительная обработка изображений для контроля геометрии сварочных швов с помощью нейронных сетей	116
СЕКЦИЯ 3. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	119
<i>Кузнецов В. В., Кечиев Л. Н.</i> Методика расчета порога отказа МОП-транзисторов при электростатическом разряде	120
<i>Соловьев И. В., Столяров А. А.</i>	

Автоматизированная дозиметрическая система с использованием МДП-сенсоров радиации	124
<i>Прасицкий Г. В., Инюхин М. В.</i>	
Анализ современного уровня параметров отечественных и зарубежных теплоотводящих материалов	130
<i>Щербаков А. Н., Андреев В. В.</i>	
Измерение характеристик МДП-структур после инъекционной модификации	137
<i>Коржавый А. П., Капустин Д. В., Капустин В. И.</i>	
Исследование состава ионного тока при поверхностной	143
<i>Андреев Д. В.</i>	
Модификация диэлектрических пленок МДП-приборов при сильнополевых и плазменных воздействиях	148
<i>Дмитриев В. Г., Андреев В. В.</i>	
Обзор применения методов атомно-силовой микроскопии для исследования зарядового состояния тонких диэлектрических пленок	153
<i>Прасицкий Г. В., Инюхин М. В.</i>	
Организация производства каркасных псевдосплавов на основе молибдена и меди	157
<i>Андреев В. В., Столяров А. А., Ахмелкин Д. М.</i>	
Повышение надежности МДП-приборов путем инжекционно-термической обработки	162
<i>Аунг Пьо, Сорочан В. В.</i>	
Применение гетеропереходов CDS/CDTE для преобразования солнечной энергии	167
<i>Прасицкий Г. В., Инюхин М. В.</i>	
Способ повышения качества псевдосплавного материала на основе молибдена и меди	170
СЕКЦИЯ 4.	
ТУРБОМАШИНЫ И КОМБИНИРОВАННЫЕ	
УСТАНОВКИ	174
<i>Шевелев Д. В., Сомкин С. А.</i>	
Выбор оптимальных параметров термодинамического цикла	

когенерационных микроГТУ	175
<i>Блябляс А. Н., Корепанов М. А.</i>	
Моделирование гидрогазодинамических процессов при конденсации паровоздушной смеси в трубе	185
<i>Жинов А. А., Милов П. А.</i>	
Определение вязкости смесового рабочего тела высокотемпературной турбины	197
<i>Киселёв С. В., Сидоров А. А.</i>	
Численное исследование обтекания плоской охлаждаемой пластины потоком с разной температурой	207
<i>Бушуев А. А., Петрунина М. И., Малинин А. В.</i>	
Исследование погрешности базирования лопаток ротора турбины при нарезании елочного профиля хвостовика при различных методах базирования	220
<i>Мосин С. И., Землянский А. В.</i>	
Исследование эффективности регенеративной установки с котлом утилизатором	224
<i>Супельняк М. И., Карышев А. К.</i>	
Особенности расчета ступени турбины с парциальным охлаждением рабочих лопаток	228
<i>Захарова В. С., Лысцев А. В., Землянский А. В.</i>	
Перспективы развития энергетических установок на твердом топливе	231
<i>Малинин А. В., Мосин С. И., Гридчин Н. В.</i>	
Постановка эксперимента для исследования аэродинамических и тепловых свойств трубок с различными формами поверхностей	237
<i>Птахин А. В., Супельняк М. И., Крылов В. С.</i>	
Расчет ступени турбомшины на смеси $H_2O + CO_2$	242
<i>Супельняк М. И., Карышев А. К.</i>	
Температурные волны и термоциклические напряжения в неограниченном твердом теле с цилиндрическим каналом	245
<i>Супельняк М. И., Карышев А. К.</i>	
Экспериментальный стенд для исследования тепловых волн в цилиндре	248
СОДЕРЖАНИЕ	252

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 12.04.2014.
Формат 60х90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Печ. л. 16. Усл. п. л. 16. Тираж 80 экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Санитарно-эпидемиологическое заключение
№ 77.99.60.953.Д.003961.04.08 от 22.04.2008 г.

Оригинал-макет и отпечатан в Редакционно-издательском отделе
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57-31-87

ISBN 978-5-7038-3869-3

