

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

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

**Материалы  
Региональной научно-технической конференции**

**Том 1**



УДК 378:001.891  
ББК 74.58:72  
Н34

**Руководитель конференции:**

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

**Руководители направлений:**

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

**Руководители секций:**

*Е.Н. Малышев; Г.В. Орлик; В.В. Андреев; А.А. Жинов;*  
*Ю.П. Корнюшин; А.П. Коржавый; А.И. Пономарев; А.К. Рамазанов;*  
*А.А. Анкудинов; Ю.С. Белов; В.Г. Косушкин; А.В. Мазин; А.А. Шубин;*  
*А.К. Горбунов; Н.Е. Шубин; А.В. Максимов; В.Н. Пащенко;*  
*М.В. Астахов; Е.Н. Сломинская; О.Л. Перерва; В.В. Ильин; В.М. Алакин*

Н34      **Научное оборудование в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе:** материалы региональной научно-технической конференции, 16 – 18 апреля 2019 г. Т. 1. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 240 с.

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

УДК 378:001.891  
ББК 74.58:72

© Коллектив авторов, 2019  
© Калужский филиал МГТУ  
им. Н. Э. Баумана, 2019  
© Издательство МГТУ  
им. Н. Э. Баумана, 2019

## **СЕКЦИЯ 1.**

# **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

К.В. Яшкин

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ГАМИЛЬТОНОВА ЦИКЛА

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

В настоящее время существует множество задач перестановочного типа, практическое решение которых занимает особое место в комбинаторике. Нахождение оптимального пути в технологическом процессе является одной из основных задач на пути к оптимизации производства, в частности нахождение наилучшего варианта перемещения инструмента при обработке заготовок. Формулировка этой задачи и описание методов её решения отображается в работах [1,2].

Если представить этот процесс на чертеже, то будет иметь место задача поиска гамильтоновых циклов в неориентированном графе, которая изучается вот уже более 100 лет [3]. Формально гамильтонов цикл неориентированного, взвешенного графа  $G = (V, E)$ , представляет собой простой цикл содержащий все вершины множества  $V$ , и все рёбра множества  $E$ . На Рис.1 представлено одно из возможных решений гамильтонова графа.

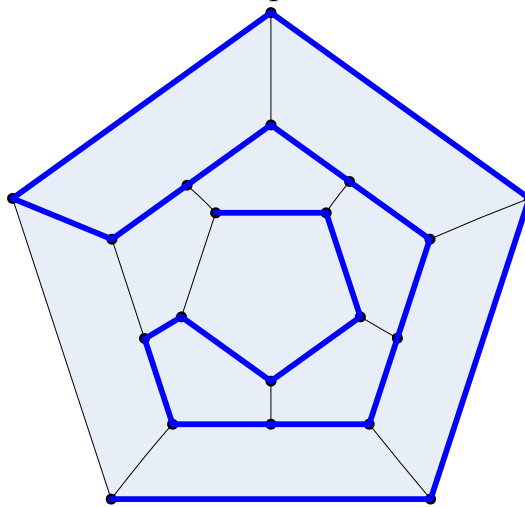


Рис. 1. Гамильтонов граф

Такое решение не является единственным для представленного додекаэдра, а также поиск этого решения не представляет никакой математической сложности. Однако стоит задать рёбрам определённые веса  $w_{i,j}$ , то есть свести её к задаче о коммивояжёре, так задача перестаёт иметь как множество решений, так и свою простоту, но её всё ещё можно решить устно. Если же взять конкретную корпусную деталь, с восьмью и более отверстиями, подлежащих обработке, которые расположены в сложной геометрической последовательности, то для решения подобной задачи будет необходимо перебрать все возможные варианты обхода отверстий в поиске

кратчайшего пути, что займёт не мало времени, или воспользоваться алгоритмом поиска кратчайших путей.

На сегодняшний день имеется множество алгоритмов, предлагающих решения задачи коммивояжера, их можно разделить на 2 класса, приближённые и точные. В алгоритмах приближённого класса решение находится быстро, но не всегда оптимально, а в алгоритмах точного класса найденное решение оптимально, но за непомерно большое время.

В данный момент разрабатывается алгоритм способный находить оптимальные маршруты за короткое время, который базируется на гамильтоновом контуре, но оптимальный маршрут коммивояжера не обязательно является гамильтоновым контуром. Возникает вопрос, в каких случаях гамильтонов контур является решением общей задачи коммивояжера?

В книге [4] приводится теорема, отвечающая на данный вопрос:

**Теорема:** если для каждой пары вершин  $(x, y)$  графа  $G$  выполняется условие:

$$a(x, y) \leq a(x, z) + a(z, y) \text{ для всех } z \neq x, z \neq y, \quad (1)$$

то гамильтонов контур является решением общей задачи коммивояжера на графе  $G$ .

### Список литературы

[1]. Яшкин К.В., Калмыков В.В. Варианты совершенствования решения задачи коммивояжера // В книге: *Научно-технические технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗЕ Материалы Региональной научно-технической конференции*. 2018. С. 24-25.

[2]. Яшкин К.В. Задача коммивояжера в технологических операциях // В книге: *Научно-технические технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в ВУЗЕ Материалы Региональной научно-технической конференции*. 2018. С. 19-20.

[3]. Кормен, Томас Х. и др. Алгоритмы: построение и анализ, 3-е изд.: Пер. с англ. – М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2013. – 1328 с.: ил. – Парал. Тит. Англ. ISBN 978-5-8459-1794-2 (рус.).

[4]. *Алгоритмы оптимизации на сетях и графах*: Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 321с., ил.

[5] Ankuda E.S., Kalmykov V.V., Musokhranov M.V., Ustinov I.K. Protecting surfaces of parts with wear-resistant vibration-damping coatings // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 483 (2019) 012039 doi: 10.1088/1757-899X/483/1/012039.

[6] Kalmykov V.V., Musokhranov M.V., Logutenkova E.V., Malyshev E.N., Gorbunov A.K. Generation of surface energy in metals using row-by-row microdeformation // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. T. 12. № 24. С. 15621-15626.

[7] Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N. Experimental research of variability of surface energy value of Fe37-3FN, c45 and 41Cr4 steels

// International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 17. С. 6428-6433.

[8] *Kalmykov V.V., Musokhranov M.V., Logutenkova E.V.* Dependence of physical and mechanical properties of metal surfaces on microgeometric parameters // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 483 (2019) 012045 doi:10.1088/1757-899X/483/1/012045

**Яшкин Константин Владимирович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kostyayashkin@yandex.ru

**Научный руководитель: Калмыков Вадим Владимирович.**  
Преподаватель кафедры «Машиностроительные технологии» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kalmykovvv@bmstu.ru

И.Э. Гинсар

## **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ЛИТЬЕ ПЛАСТМАСС С ПОМОЩЬЮ SOLIDWORKS PLASTICS И ПУТИ ИХ УСТРАНЕНИЯ**

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

Программа SolidWorks Plastics используется для имитации и оптимизации процесса литья деталей из пластмасс. Данная программа позволяет достаточно точно и полно дать описание процесса литья и рассчитать его технологичность. При использовании имеется возможность проектирования пресс-формы, анализ появления возможных дефектов и определение путей их устранения, исключение дорогостоящих операций и уменьшения сроков выхода качественного изделия на рынок [1].

Используя SolidWorks Plastics, возможно ещё на стадии моделирования процесса литья обнаружить следующие виды дефектов:

1. Линии спая;
2. Утяжины (вмятины);
3. Пузырьки воздуха [2].

Линии спая представляют собой видимый дефект похожий на надрез или волосяные линии. Этот дефект особенно выделяется на тёмных, блестящих или прозрачных деталях или изделиях, у которых полированная до блеска поверхность. Довольно часто встречается у изделий, изготовленных из такого материала как ABS [3]. Визуально данный дефект в программе выглядит следующим образом (рис. 1):

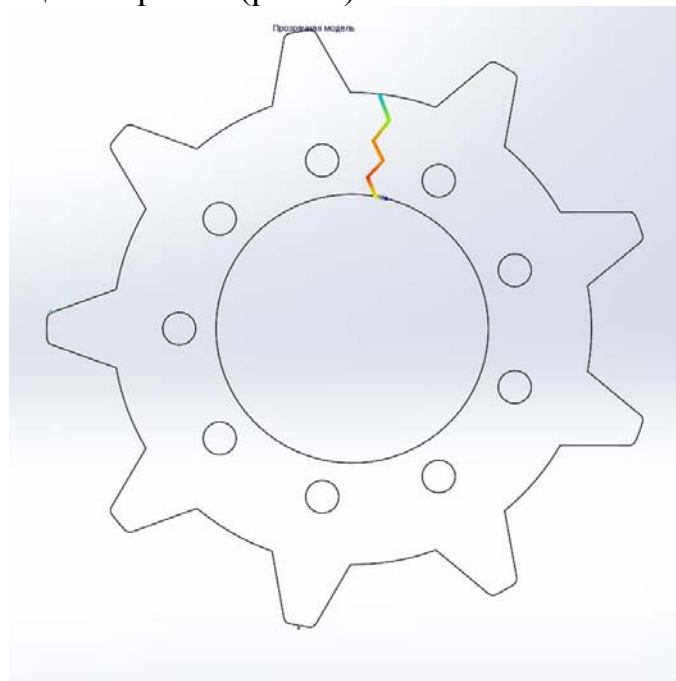


Рис. 1. Линии спая

Данный дефект встречается тогда, когда потоки расплавленного материала с уже остывшими кромками встречаются друг с другом и их слияние без отметин уже невозможно. Причинами этому являются недостаточная текучесть, слишком низкая скорость впрыска, конструкция самой детали, недостаточное удаление из формы.

Уменьшить количество дефекта или исключить его можно технологическим способом, а именно увеличение температуры расплава, скорости впрыска, изменение местоположения инжекции и перенос линий спая в те места, где они оптически незаметны [4].

Утяжины (вмятины) возникают вследствие неравномерной усадки во время охлаждения отливаемой детали, возникает в тех местах, где находятся ребра жесткости, бобышки и т.п. Дефект при высоких значениях остаточных напряжений может привести к нарушению целостности детали, поэтому рекомендуется избегать появления такого дефекта на стадии проектирования (рис. 2).

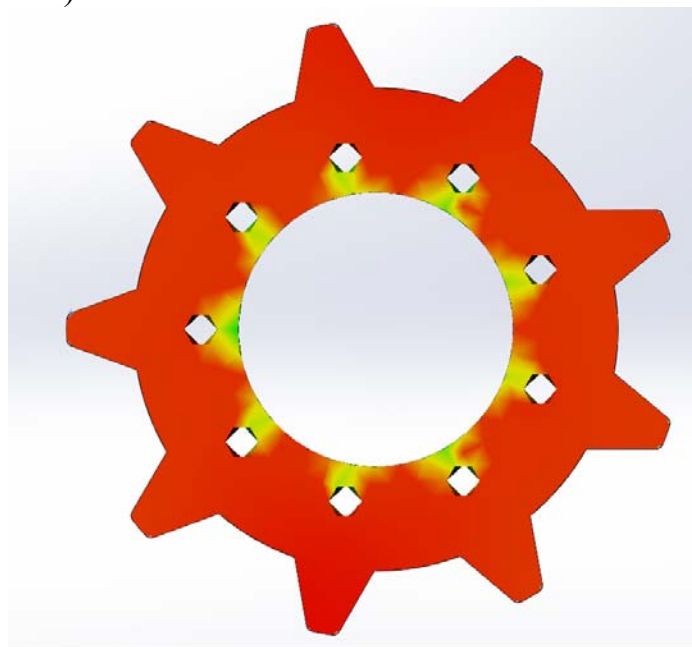


Рис. 2. Утяжины (вмятины)

Равностенные детали позволяют исключить появление утяжин, но в случае изделий с различной толщиной стенок следует увеличить удельное давление впрыска расплавленного материала, выбрать «точку впрыска» на самой толстой части детали, определить оптимальные размеры литника и питателя, исходя из формы отливаемой детали [5].

Пузырьки воздуха наиболее распространенный вид дефекта в пластмассовых деталях. Возникают они в ходе заполнения пресс-формы расплавом. Наличие их зависит от конструкции детали и формы. Схлопывания таких пузырьков вблизи поверхности приводит к образованию включений воздуха. Причинами появления могут служить малое сечение литникового канала, малое давление впрыска, плохая вентиляция формы. Графически дефект выглядит в виде пузырьков (рис. 3).



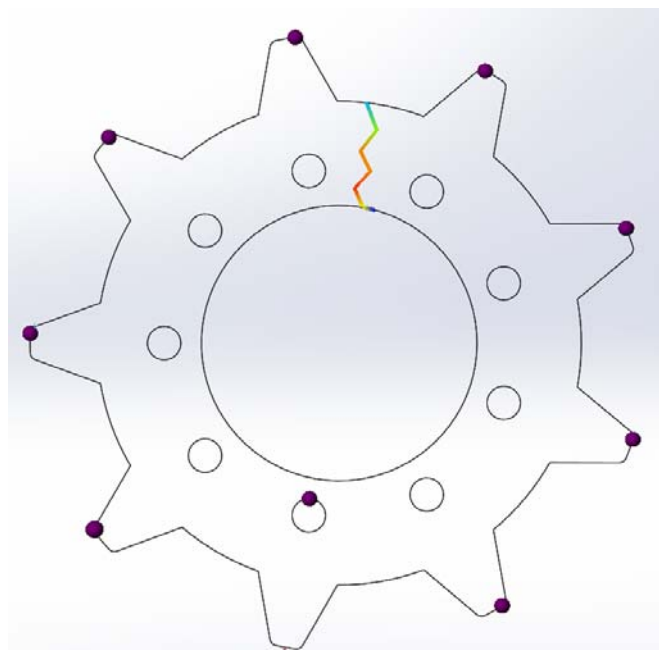


Рис. 3. Пузырьки воздуха

Способами устранения дефекта могут быть оптимизация геометрии детали, проверка вентиляции формы, увеличение объема впрыска, увеличение давления литья, также увеличение размеров инъекции [6].

Программа SolidWorks Plastics даёт наиболее полное представление о появлении возможных дефектов, их количества, местоположения [7]. И получив неудовлетворительный результат, можно изменить, как конструкцию самой детали, так и параметры процесса, месторасположение и размер инъекции. После внесения изменений возможно повторить процесс моделирования уже с новыми значениями. Всё это способствует экономии ресурсов, материала и времени, что является наиболее важным.

### Список литературы

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

[2]. *Броцыхин Е.А., Шульгина Э.С.* Технология пластических масс. Учебное пособие для техникумов. — Л.:Химия, 1982. — 328 с.

[3]. *Бихлер М.* Детали из пластмасс. Отливать без дефектов. — Demag plastservice, 1999. — 105 с.

[4]. *Мурашов В.В., А.Ф. Румянцев.* Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. — М.: Спектр, 2006. — 242 с.

[5]. *Яблочников Е.И., Брагинский В.А., Восоркин А.С.* Применение систем виртуального моделирования при выборе и проектировании поли-

мерных композиционных материалов // Приборостроение. — 2012. — №7. — С. 17-19.

[6]. Садова А.Н., Дебердеев Т.Р., Кузнецова О.Н., Стоянов О.В. Проблемы выявления и устранения причин дефектов в процессе получения изделий из термопластов. Часть I. — Казань, 2009. — 123 с.

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

**Гинсар Ирина Эдуардовна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: irinaginsar708@gmail.com

**Научный руководитель: Бысов Сергей Александрович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 1m-kf.mgtu@inbox.ru

А.Д. Малютин

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ**

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

Глубокими считают отверстия глубиной более  $10d$ . Детали с глубокими отверстиями применяются во всех отраслях промышленности. Сверление таких отверстий связано с целым рядом трудностей:

- длинные сверла обладают меньшей жесткостью, и под действием сил резания прогибаются, что может привести к искривлению оси отверстия;

- с увеличением длины отверстия затрудняется извлечение стружки из отверстия во время работы;

- смазочно–охлаждающая жидкость (СОЖ) при глубоком сверлении подается под большим давлением и с большими расходами, существенно отличающимися по величине от обеспечиваемых насосными системами обычного металлорежущего оборудования.

Эти факторы определяют специфику самого процесса глубокого сверления, применяемого оборудования, оснастки, технологических приемов и послужили причиной создания специального оборудования и инструмента для глубокого сверления.

### **Технология сверления спиральными сверлами**

На практике уже при  $h > 3d$  в случае сверления отверстий спиральными сверлами наблюдаются трудности с подводом СОЖ в зону резания и удалением стружки из отверстия.

Одним из способов отвода стружки из отверстий при использовании спиральных сверл осуществляется периодическим выводом сверла из отверстия для освобождения инструмента от стружки. Лучшие результаты дает использование внутреннего напорного подвода СОЖ в зону резания.

Для обеспечения надежного стружкодробления без вывода сверла из отверстия при одновременном повышении стойкости применяют также спиральные быстрорежущие сверла с каналами для внутреннего подвода СОЖ. В нашей стране такие сверла изготавливаются диаметром от 10 до 30 мм.

На увод оси отверстия влияет схема обработки. Существуют три схемы сверления, влияющие на увод сверла:

- заготовка вращается, а сверло совершает движение подачи;
- заготовка и сверло вращаются в противоположных направлениях;
- заготовка неподвижна, вращается сверло.

Наилучшим является второй вариант, но к нему близок и первый.

### **Ружейная технология сверления**

Особенности ружейного сверления глубоких отверстий одноперыми сверлами:

- диаметры обрабатываемых отверстий от 0,6 до 80,0 мм;
- возможна обработка отверстий с соотношением глубины отверстия к диаметру до 100d;
- применение специально разработанных сортов твердых сплавов и покрытий для проведения обработки определенных материалов на оптимальных режимах и с оптимальным стружкообразованием;
- подвод СОЖ через отверстия в инструменте;
- вывод СОЖ и стружки через отверстие, образованное пазом в корпусе сверла и стенками просверливаемого отверстия.

В связи с простым процессом подвода СОЖ к зоне резания и выводом СОЖ, сверла могут применяться как на специальных станках для глубокого сверления, так и на обрабатывающих центрах всех типов. Ограничением при использовании сверл малых диаметров является станция СОЖ, которая должна обеспечивать высокое давление подвода СОЖ.

#### **Эжекторная технология сверления**

Особенности эжекторного сверления глубоких отверстий:

- диаметры обрабатываемых отверстий от 20 до 60 мм глубиной до 1000 мм;
- применяется на станках с горизонтальным расположением режущего инструмента и легко встраивается в существующее оборудование;
- используется для обработки деталей, для которых трудно обеспечить герметичность;
- не требует уплотнения между обрабатываемой деталью и кондукторной втулкой;
- позволяет использовать предварительно изготовленное пилотное отверстие для направления вместо кондукторной втулки;
- СОЖ подается между штангами к режущим кромкам сверлильной головки и отводит стружку через внутреннюю штангу.

Широкое распространение этого способа сверления объясняется его преимуществами, возможностью применения его на станках общего назначения и хорошей организацией снабжения потребителей эжекторным инструментом.

#### **Технология STS/ВТА (одноштанговая)**

Особенности одноштанговой системы STS:

- стандартный диапазон диаметров обрабатываемых отверстий от 15,6 до 130,0 мм;
- предусмотрен наружный подвод СОЖ по зазору между стенкой обрабатываемого отверстия и наружной поверхностью стебля инструмента. При этом отвод стружки осуществляется внутри инструмента за счет подаваемой под большим давлением СОЖ;
- использования специализированных станков глубокого сверления;
- возможно получение отверстий с точностью 7...8 квалитетов с минимальными уводами оси и кривизны оси получаемого отверстия;

- производительность технологии STS/BTA в 4-6 раз выше эжекторной системы;

- отсутствует необходимость в стружечных канавках, что позволяет изготавливать штанги с цилиндрическим сечением по всей длине;

- возможность применения инструмента диаметром более 200 мм.

Несмотря на обязательное применение специального оборудования, оснастки и технологических приемов, технология сверления глубоких отверстий с наружным подводом СОЖ решает сложнейшие задачи по обработке деталей с глубокими отверстиями, недоступные для решения никакими другими технологиями, и признана самой совершенной технологией глубокого сверления.

### **Электроэрозионная обработка - прошивка отверстий**

Электроэрозионная обработка применяется для прошивки глубоких отверстий малого диаметра. К отверстиям малого диаметра относят условно отверстия с диаметром от 0,1 до 3 мм.

В качестве электродов используют проволоку из меди, вольфрама и его сплавов с медью или серебром. При обработке титановых сплавов применяют латунную проволоку, обеспечивающую большую стабильность.

Прошивку глубоких отверстий малого диаметра трубчатым капиллярным электродом с прокачкой рабочей жидкости под давлением 7...10 МПа часто называют струйной электроэрозионной обработкой.

Для реализации эффективных технологий получения глубоких отверстий малого диаметра разработаны специальные станки, часто называемые супердрелями (super drill).

### **Вывод**

Получение глубоких отверстий может происходить различными способами.

Для получения отверстий спиральными свёрлами необходимо иметь удлинённую рабочую часть с подводом СОЖ.

Ружейные свёрла: обрабатывают деталь с небольшим диаметром отверстия. Может выполняться на обрабатывающих центрах при наличии предварительно засверленного отверстия для направления. Требуется подачи СОЖ под высоким давлением.

Эжекторная технология сверления: Не требует уплотнения между обрабатываемой деталью и кондукторной втулкой. Легко встраивается в существующее оборудование. Рекомендуются при обработке деталей, с которыми возникают проблемы герметизации.

Одноштанговая система: Для материалов с усложненным стружкообразованием таких, как нержавеющие и низколегированные стали. Отличается стабильностью работы и высокой долговечностью всех элементов. Необходим специализированный станок глубокого сверления. Рекомендуются для больших партий деталей.

Электроэрозионная обработка: В основном применяется для выполнения отверстий малого диаметра (0,1-3 мм).

#### **Список литературы**

[1]. *Звонцов И.Ф.* Технологии сверления глубоких отверстий /Звонцов И.Ф., Серебренецкий П.П., Схиртладзе А.Г. – 2013. – 496 с.

[2]. *Кирсанов С.В.* Обработка глубоких отверстий в машиностроении. – Справочник. – 2010.

[3]. *Рогов В.А.* Основы технологии машиностроения. 2-е изд., испр. и доп. – Учебник для вузов. / Рогов В.А. – 2019. – 351с.

**Малютин Алексей Дмитриевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [alekseimalutin@yandex.ru](mailto:alekseimalutin@yandex.ru)

**Научный руководитель: Мусохранов Марсель Владимирович.** КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: [m1@bmstu-kaluga.ru](mailto:m1@bmstu-kaluga.ru)

Н.О. Исаев

## **АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ПЛИТА**

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

Работа посвящена анализу разнообразных способов изготовления заготовок для деталей, имеющих форму плиты. Размерный диапазон таких заготовок достаточно широкий. Поэтому для каждого размерного интервала может не совпадать наиболее подходящий способ производства. Чаще всего, в качестве исходного материала применяют листовой прокат различной толщины. Основными способами раскроя листового материала являются: механическая отрезка на ножах или ленточных пилах, плазменная резка. К интересным способам можно отнести резку лазерным лучом и гидроабразивной струей.

Каждый из способов имеет свою эффективную область применения. Она связана как с самим процессом изготовления деталей, так и конструкцией оборудования.

**Механические способы.** Самой простой конструкцией является конечно же механический способ отрезки. Так называемая гильотина, достаточно быстро отрубает заготовки нужного размера. Однако она имеет свои недостатки. Важным является то, что после обрубки на заготовке остаются небольшие впадины. Поэтому следует учитывать немалые припуски. Перпендикулярность среза порой не достигается, что также является минусом данной операции. Обработка на ленточных пилах, является более точным методом, в сравнении с гильотиной. Малый расход материала достигается тонкой величиной реза. Однако скорость его будет существенно меньше, чем у гильотины.

**Плазменная резка.** Этот способ, пожалуй, можно отнести к часто применяемому способу. Плазменный резак хорошо справляется с заготовками средних размеров из чугуна, алюминия и некоторых видов сталей. Однако резка данным способом ограничивается толщинами материалов. Например, для стальных заготовок, целесообразно использовать данный способ лишь при толщине до 50мм [1]. Также трудно будет отрезать заготовку под углом, и есть большая вероятность оплавки заготовки.

**Лазерный способ.** Он является одним из самых интересных, но и довольно сложным способом. Сфокусированный луч лазера очень быстро, за мгновения, способен вырезать заготовку высокой точности и практически различной формы. Целесообразно использовать его в массовом производстве при изготовлении заготовок толщиной до 16мм [2]. Дороговизна оборудования, необходимость фокусировки луча для разных типов деталей и малая толщина реза, не позволяют использовать этот способ повсеместно.

**Гидроабразивная резка.** Такой способ осуществляется струёй воды с частицами твёрдого материала. Данный способ, как и лазерный, является затратным. Однако, при этом способе можно вырезать заготовку из любого материала и толщиной до 300мм (1). Высокая скорость обработки и получение качественной поверхности отрезаемой части, Ra=1,6мкм [3], делают этот способ одним из самых эффективных. Исходя из источника [3], целесообразно использовать такой метод при толщине материала от 8мм. Если толщина окажется меньше, то лазерная резка в этом случае будет более производительней. Современные станки позволяют регулировать зазор между его соплом и обрабатываемой поверхностью, что обеспечивает равномерность реза и оптимальный расход смеси. Однако, чем больше будет толщина заготовки, тем выше разбрызгивание смеси.

Проанализировав данные способы между собой, можно выбрать наиболее подходящий для конкретного случая. Более подробные и наглядные сравнения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение способов

	Механические способы	Плазменная резка	Лазерная	Гидроабразивная
Относительная стоимость	низкая	средняя	высокая	высокая
Толщина раскраиваемого материала	До 16мм нержавеющие стали, до 20 мм чёрные	До 120мм алюминий, до 90мм чугуны	До 16мм	До 300мм
Качество кромки и точность	Заусенцы. низкая	Окалины на поверхности. средняя	высокое	высокое
Шероховатость кромки	Rz40мкм	Rz 60-100мкм	Rz5-10мкм	Rz20-80мкм
Ширина реза	0,1мм	2-3мм	0,15-0,3мм	0,2-1мм
Термовоздействие	отсутствует	Очень высокое	Среднее 0,2 от края	отсутствует
Фигурные контуры	Невозможно	Сложно	Любая форма	Любая форма
Преимущества использования	Выгодно для производства уголков и прямолинейных полос	Выгодно при использовании деталей невысокой точности и больших размеров	Изготовление сложных контуров деталей малой толщины, высокая производительность	Обработка практически любых материалов и отсутствие нагрева, высокая производительность



### Список литературы

[1]. *Бабаев Ф.В.* Металлосбережение путем рационального раскрытия материала // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 2. С.48–52.

[2]. *Звонцов И. Ф., Иванов К. М., Серебrenицкий П. П.* 3 43 Разработка технологических процессов изготовления деталей общего и специального машиностроения // Технология лазерной обработки: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2018. — 696 с.

[3]. *Машиностроение.* Энциклопедия [Текст]: В 40 т. Т. III-2. Технологии заготовительных производств // Технология гидроабразивной резки. И.Л. Акаро [и др.]; под общ. ред. В.Ф. Мануйлова. М.: Машиностроение, 2016. 708-736 с.

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

**Научный руководитель: Вяткин Андрей Геннадьевич.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: and-vyatkin@mail.ru

И.А. Чуйков

## ВИДЫ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛОВ И СПОСОБЫ ИХ НАНЕСЕНИЯ

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

Основными причинами (более 70 %) выхода из строя деталей машин и металлоконструкций являются процессы изнашивания и коррозии. Ежегодные потери металла от трения и износа составляют до 4–5 % валового национального дохода. Поэтому для увеличения срока службы стальных деталей является целесообразным применение различных способов нанесения защитных и упрочняющих покрытий на их рабочие поверхности.



Рис. 1. Основные виды покрытий металлов

**Цинкование металла.** Это процесс нанесения на поверхность изделия специального вещества. Такие растворы создаются на основе цинка, который является наиболее подходящим исходным материалом. Он предотвращает коррозию, а также защищает поверхность от воздействия агрессивных веществ.

### Основные методы обработки

Горячее цинкование. Его главными положительными свойствами является высокое качество, а также долгий срок эксплуатации. Существует также и ряд отрицательных свойств. Метод не является экологически безопасным. А также необходимо поддерживать высокую температуру цинка, поэтому для поддержания такой температуры затрачивается много электроэнергии.

Гальваническое цинкование металла. Гальванический способ основан на погружении металлического изделия в ванну, где находится раствор

электролита. К детали подсоединяется источник тока. В этом случае возникает процесс электролиза. Ему подвергается цинк, который и покрывает металлическую деталь.

**Холодное цинкование.** Суть его заключается в том, что металлическое изделие окрашивается специальными веществами, которые содержат цинк. Единственное оборудование для холодного цинкования металла, которое используется — это распылитель. Он помогает добраться до недоступных мест и выполнить покраску равномерно и качественно.

**Алитирование углеродистой стали.** Это процесс насыщения поверхностного слоя изделия алюминием, который проходит при определенной температуре.

Выделяют несколько наиболее распространенных технологий химико-термического воздействия: алитирование в порошкообразных смесях, алитирование напылением, металлизация с последующим обжигом, алитирование в вакууме, алитирование методом погружения.

Существенный недостаток: воздействие высокой температуры становится причиной перестроения атомной решетки, вследствие чего поверхностный слой становится хрупким.

**Гальваническое покрытие.** Это химический метод нанесения металлической пленки для защиты изделий и придания им дополнительных характеристик: устойчивости к коррозии, твердости, износостойкости, декоративности и т. д.

Схема, по которой реализуется гальваническое покрытие металла, довольно проста. В нее входит изделие, на которое наносится защитное покрытие, емкость с раствором электролита, куда помещается изделие. Третьим участником процесса является металлическая пластина, на которую подается положительный заряд тока, она выполняет функции анода, помещенное в раствор изделие становится катодом, куда подается отрицательный заряд.

При замыкании электрической сети металл анода (пластины) растворяется в электролите и под действием тока устремляется к отрицательно заряженному изделию (катоде), тем самым создавая прочное покрытие. Электролит является проводящим раствором для перемещения металлов с анода на катод. Размер емкостей (ванн) с электролитом бывает разным, в зависимости от производственных задач.

К основным видам таких покрытий относят: серебрение, никелирование, хромирование, гальваническое золотое покрытие, омеднение, латунирование, родирование.

К недостаткам метода относится большой расход электроэнергии, экологические угрозы, высокая стоимость очистных мероприятий.

**Порошковое полимерное покрытие металла.** Суть метода заключается в нанесении на поверхность предмета порошковой краски, которая при затвердевании образует сплошную непроницаемую полимерную пленку.

ку. Полимерное покрытие обладает следующими свойствами: высокая эстетичность, непроницаемость, стойкость в неблагоприятной среде, абсолютная устойчивость к воде, большая прочность, жаростойкость, экологичность и т.д.

**Газопламенное напыление.** Газопламенное напыление представляет собой нагрев, плавление, диспергирование расплава и перенос расплавленных частиц ацетилено-кислотного пламени материала на металлическую поверхность детали, где формирует стабильное непрерывное покрытие.

В пламя горелки на основе ацетилен-кислорода или пропан-кислорода подается из питателя металлический/полимерный порошковый (установка FP), или же проволока (установка FS15), плавится и затем переносится сжатым воздухом на напыляемую поверхность, образуя прочное покрытие. Технология газопламенного напыления проста в работе, может применяться как в ручном, так и в автоматизированном режиме.

К основным недостаткам этого метода относят наличие пористости (обычно в пределах 5—25 %), которая препятствует применению покрытий в коррозионных средах без дополнительной обработки и невозможность нанесения покрытий из тугоплавких материалов с температурой плавления более 2800 °С.

Таким образом, проанализировав различные виды и методы покрытия изделий, был сделан вывод о том, что наиболее эффективный и дешевый способ защиты изделия от коррозии является холодное цинкование.

### **Список литературы**

[1]. В.А. Наумов, С.Н. Шарапов, Л.И. Бессуднов. Виды защитных покрытий металлов и способы их нанесения - МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация, 2016

[2]. В. Синявский. Свойства анодно-оксидных и других твердых покрытий на алюминиевых сплавах. "Технология легких сплавов" № 4, 2003, С. 40-45.

**Чуйков Илья Андреевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: ilyachuikov97@yandex.ru

**Научный руководитель: Мусохранов Марсель Владимирович.** КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

Д.А. Тарасенков

## **ВЛИЯНИЕ УСИЛИЯ НАТЯЖЕНИЯ ПРОВОДА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

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

Обмотки являются важнейшими функциональными элементами электрических устройств. От качества обмоток в значительной мере зависит качество изделий, в которых обмотки используются. Дефекты обмоток относятся к категории скрытых, а последствия их появления могут привести к внезапным отказам, поэтому проблема повышения качества обмоток имеет первостепенное значение, определяющее в конечном итоге надёжность функционирования изделия, а также производительность и себестоимость его изготовления.

При разработке технологического процесса изготовления обмоток необходимо учитывать влияние различных факторов на точность получения выходных параметров намотанного изделия. Для обоснованного назначения допусков электромагнитных характеристик и увязки их с технологией изготовления обмоток необходимо изучить возможные отклонения параметров исходных материалов и деталей; погрешности, вносимые в процессе намотки и причины их появления.

Основным технологическим фактором, определяющим качество и производительность процесса намотки, является натяжение провода. Усилие натяжения определяет геометрические размеры и рабочие характеристики наматываемого узла. Поэтому вопрос правильного выбора натяжения проволоки приобретает первостепенное значение [1].

Различают три вида натяжения провода: максимально и минимально допустимые, а также и оптимальное.

В общем случае под максимально допустимым натяжением понимается натяжение, при котором в процессе формирования обмотки не происходит практически заметных изменений электрических и геометрических параметров провода и не нарушается целостность изоляции.

Под минимально допустимым натяжением понимается натяжение, необходимое для изгиба провода по форме каркаса при заданных плотности и коэффициенте заполнения обмотки и сохранении прочности, жёсткости и других свойств каркаса [1].

Натяжение, при котором получается обмотка с точностью в пределах, заданных допуском, считается оптимальным для данной обмотки. Оптимальное натяжение  $T_{opt}$  находится между максимально  $T_{max}$  и минимально  $T_{min}$  предельными натяжениями:

$$T_{min} \leq T_{opt} \leq T_{max}.$$

Настройка намоточного станка на определённые натяжения обычно осуществляется по таблице предельно допустимых натяжений, при этом динамические нагрузки на привод, возникающие в процессе наматывания практически не учитываются. Экспериментальные исследования показывают, что динамическое натяжения в 1,5-2 раза превосходят статические, а при попадании системы в резонанс – достигает ещё больших значений [2].

Оптимальная величина для каждого вида намоточных проводов зависит от вида обмотки и предельно допустимой величины натяжения для данного провода [3].

Изменение сопротивления провода от натяжения можно найти по формуле:

$$\delta R_H = \frac{R_0 - R_H}{R_0} \cdot 100\%,$$

где  $R_0$  – первоначальное сопротивление провода при отсутствии растягивающих усилий;  $R_H$  – сопротивление провода, подвергнутого нагрузке в виде определённого натяжения.

При приложении растягивающего усилия происходит уменьшение диаметра провода, что также влияет на электромагнитные характеристики. Это можно отразить следующей формулой нахождения индуктивности [4]:

$$L = \frac{\mu l}{2\pi} \left( l_H \frac{2l}{D} - 1 \right),$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость воздуха,  $l$  – длина отрезка провода,  $D$  – диаметр провода,  $l_H$  – длина провода, подвергнутого нагрузке в виде определённого натяжения.

Тогда относительное изменение индуктивности при изменении диаметра равно

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{l_H \frac{D}{D + \Delta D}}{l_H \frac{4l}{D} - 1}.$$

Параметр усилия натяжения провода является систематически изменяемым и требует учёта при определении длины провода и числа витков обмотки.

### Список литературы

[1] *Копылов И.П.* Электрические машины: учебник для вузов/И.П. Копылов. – 6-е изд., стер. – М.: Высш. Шк., 2009. – 607 с.

[2] *Иванов И.И., Соловьёв Г.И., Фролов В.Я.* Электротехника и основы электроники: Учебник. 7-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 736 с.: ил. – (Учебник для вузов. Специальная литература).

[3] *Гольдберг О.Д.* Электромеханика: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская; под ред. О.Д. Гольдберга. – 2-е изд. испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 512 с.

[4] *Герасимова В.Г.* Электротехнический справочник: в 4 т. Электрические изделия и устройства. – М: Изд-во МЭИ, 1998. – 518 с.

[5] *Копылов, И. П.* Проектирование электрических машин в 2 ч. Часть 1: учебник для академического бакалавриата / И. П. Копылов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018. — 490 с. — (Серия: Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-08701-7. — Режим доступа: <https://www.biblio-online.ru/bcode/426171/>. Дата обращения: 28.03.2019.

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

**Научный руководитель: Попков Вячеслав Михайлович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: slavclinde@yandex.ru

В.И. Виноградов

## **ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ДЕТАЛИ «ПОЛУМУФТА ЗУБЧАТАЯ»**

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

Выбор способа получения заготовки – всегда очень сложная, трудно разрешимая задача, так как различные способы часто могут обеспечить технические и эксплуатационные требования, предъявляемые к детали. Выбранный способ получения заготовки должен быть экономичным, обеспечивающим высокое качество детали, производительным и нетрудоемким процессом.

Выбор способа производства заготовок определяется следующими факторами:

- 1) технологическими свойствами материалов, то есть его литейными свойствами или пластичностью, структурными изменениями в процессе изготовления заготовки и величиной зерна и т.д.;
- 2) конструктивными формами и размером деталей;
- 3) требуемой точностью выполнения заготовки и качества ее поверхности (шероховатость, остаточные напряжения и т.д.);
- 4) объемом выпуска продукции или типом производства;
- 5) производственными возможностями заготовительных цехов;
- 6) временем, затрачиваемым на подготовку производства (изготовление моделей, штампов или пресс-форм и т.д.);
- 7) гибкостью производства, то есть возможностью быстрой переналадки оборудования и оснастки в условиях автоматизированного производства;
- 8) экономичностью производства.

Рассмотрим 3 варианта заготовок, полученные: 1) литьем в п/г формы 2) штамповкой в открытых штампах на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП) 3) отрезкой из прутка проката диаметром 210 мм.

**Литье в п/г формы.** Литой металл характеризуется относительно большим размером зерен, неоднородностью химического состава и механических свойств по сечению отливки, наличием остаточных напряжений и т. д. Исходя из назначения детали (используется в зубчатом зацеплении) такие условия не удовлетворяют. К тому же материал детали 20Х2Н4А обладает не лучшими литейными свойствами, а предназначен для изготовления цементируемых, особо ответственных, высоконагруженных деталей, к которым предъявляются требования высокой прочности, пластичности и вязкости сердцевины и высокой поверхностной твердости, работающих под действием ударных нагрузок и при отрицательных температурах.



**Заготовка из проката** характеризуется стоимостью заготовки, ниже стоимости заготовки получаемой штамповкой. Существенно увеличивается расход металла, объем механической обработки и производственный цикл изготовления детали, что при достаточно большой программе выпуска (5000 дет/год) недопустимо. Исходя из служебного назначения детали и свойств материала, если заготовка изготовлена из проката, то направление волокон металла не способствует повышению прочности зубьев.

**Заготовка, полученная штамповкой в открытых штампах на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП)** наиболее близкая по конфигурации к готовой детали. В этом случае существенно сокращается расход металла, объем механической обработки и производственный цикл изготовления детали, что является важным для серийного производства. Обработка давлением создает волокнистую макроструктуру металла. Дорогостоящее штамповочное оборудование и оснастка, затраты на покупку или изготовление штампов, могут окупиться существенной экономией материала, уходящего в стружку и соответственно меньшей трудоемкостью изготовления детали. Из-за небольших припусков на обработку снизятся затраты на режущие инструменты, их переточку или замену. Достаточно высокий КИМ.

Таблица 1

Сравнение способов

Параметр	Способ изготовления		
	Литье в п/г формы	ГОШ в открытых штампах на КГШП	Прокат горячекатаный круглый
Точность размеров	14...17 квалитет	14...16 квалитет	9...12 квалитет
Шероховатость, Ra	20...80	12,5...40	5
КИМ, %	51	66,7	36,7

Таблица 2

Программа выпуска, шт/год	Масса металла уходящего в стружку при методе изготовления, кг		
	Литье в п/г формы	ГОШ в открытых штампах на КГШП	Прокат горячекатаный круглый
5000	20800,5	10739,3	37267,9
4000	16640,4	8591,4	29814,8
3000	12480,3	6443,6	22360,7
2000	8320,3	4237	14907,2
1000	4160,1	2147,9	7453,6

### Список литературы

[1]. *Килов А.С., Вольнов С.В., Килов К.А.* Производство заготовок. Объемная штамповка: Серия учебных пособий из шести книг. Книга 1. Проектирование и производство поковок (штампованных заготовок): - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2014. – 155с.

[2]. *Кондаков А.И.* Выбор заготовок в машиностроении. М.: Машиностроение, 2007. — 560 с. [Электронный ресурс]: <https://e.lanbook.com/book/770>

[3]. *Методы* получения заготовок деталей машин: учебное пособие / В. Ф. Пегашкин, Е. В. Пегашкина; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. техн.ин-т (филиал). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2016. – 81 с.

[4]. *Руденко П.А. и др.* Проектирование и производство заготовок в машиностроении Учеб. пособие /Под общ ред. В. М. Плескача. – К.: Выща шк., 1991. – 247 с.

**Виноградов Владислав Игоревич** – студент КФ МГТУ им. Баумана.  
E-mail: [vinogradov.vl4dislav@yandex.ru](mailto:vinogradov.vl4dislav@yandex.ru)

**Научный руководитель: Бысов Сергей Александрович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [bysov.s@yandex.ru](mailto:bysov.s@yandex.ru)

Н.А. Трифонов

## **ВЫБОР МЕТОДА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИСТОВ**

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

*Разделительные операции* предназначены или для получения заготовки из листа или ленты, или для отделения одной части заготовки от другой. Операции могут выполняться по замкнутому или по незамкнутому контуру.

Отделение одной части заготовки от другой осуществляется относительным смещением этих частей в направлении, перпендикулярном к плоскости заготовки. Это смещение вначале характеризуется пластическим деформированием, а завершается разрушением.

*Отрезка* – отделение части заготовки по незамкнутому контуру на специальных машинах – ножницах или в штампах.

В качестве разделительных операций заготовок из листов на производстве, как правило, применяются следующие методы:

Кислородная резка газом– это один из способов термической обработки металла путем воздействия чистого потока кислорода на горячий металл. Газовой резке поддаются только те металлы, температура плавления которых должна быть больше температуры воспламенения его в кислороде, а также она должна быть выше температуры плавления оксидов, при этом теплопроводность металла должна быть как можно меньшей.

*Преимущества:* возможность осуществления реза любой сложности; относительно быстро и универсально; широкий ассортимент и диапазон толщин металлопроката; оптимальное соотношение «цена – качество» услуги.

*Недостатки:* возможна резка только углеродистых сталей; худшее, по сравнению с другими способами, качество резанной кромки; низкая точность резки.

Ленточнопильная резка выполняется с использованием специального оборудования: станка с натянутым на два шкива полотном ленточной пилы. Ленточнопильная резка металла применяется при изготовлении заготовок из конструкционных, нержавеющей, высоколегированных, быстрорежущих сталей, цветных металлов, легких сплавов. Используют эту технологию в машиностроении, в металлургии, энергетике, автомобильной промышленности.

*Преимущества:* отсутствие оплавленности краёв; высокая чистота поверхности реза; высокая точность реза.

*Недостатки:* высокая стоимость резки, необходимость в специальном оборудовании.

Суть гидроабразивной резки заключается в том, что в зону реза под большим давлением подается вода, в состав которой включены абразивные вещества.

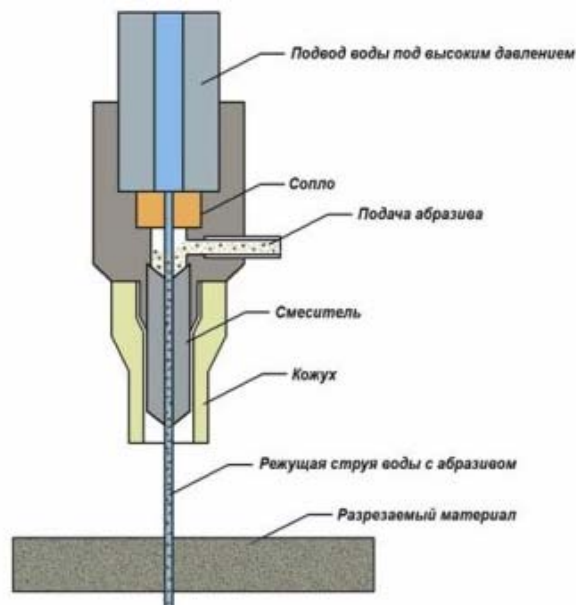


Рис.1. Принцип действия гидроабразивной резки

Чаще всего абразивная резка с участием воды применяется для разделения листового металла, но в последнее время такой метод все активнее используют для обработки других материалов, к которым относятся: природные камни (гранит, мрамор и др.); углеродистая и нержавеющая сталь, титан и другие металлы; керамическая плитка, листовое стекло; различные полимерные материалы и резина.

*Преимущества:* исключение нагрева обрабатываемой детали; широкий функционал оборудования; высокая скорость, точность и экономичность процесса; возможность резки деталей большой толщины.

*Недостатки:* При резке образуется конусность кромки отрезаемой детали; обработка как тонкостенных, так толстостенных деталей происходит с одной скоростью, что снижает рентабельность.

В действительности, ни один из методов резки листового металла не является идеальным. При его выборе необходимо учитывать следующие данные: капитальные затраты на оборудование, стоимость резки детали, простоту использования, производительность, точность и качество получаемой поверхности, а также требования к сервисному и техническому обслуживанию.

Проанализировав основные методы, оптимальным выбором нарезания заготовок для детали обойма была выбрана резка пропановым резаком KRASS РЗП-02М 2278070. При единичном типе производства ленточно-пильная и гидроабразивная резка не подходят ввиду своей большой стоимости. Помимо этого, деталь имеет несложный профиль, который не требует применения специального оборудования.

### **Список литературы**

[1] *Справочник* по листовой штамповке: учебное пособие. Демин В.А. Львович К.Д., Маркин П.В., Семенов В.И., Феофанова А.Е.; Под ред. Демина В.А. и Семенова Е.И. – М.: МГИУ, 2011. – 177с.

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

**Трифонов Николай Александрович** – студент КФ МГТУ им. Баумана. E-mail: kolyan.trifonov97@gmail.com

**Научный руководитель: Малышев Евгений Николаевич.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Mk.kf@yandex.ru

Е.А. Медведева

## **ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ**

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

В условиях эксплуатации машины или прибора, поверхности их деталей в первую очередь подвергаются внешним воздействиям. Износ трущихся поверхностей, возникновение усталостных трещин, смятие, коррозионное и эрозионное разрушения, разрушение в результате кавитации и др. – это процессы, протекающие на поверхности детали и в прилегающих к ней слоях. В связи с этим, существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей изделия оказывают именно характеристики поверхностного слоя материалов, обуславливающие совокупностью геометрических параметров и физико-механических свойств поверхностного слоя. Придание поверхностным слоям особых свойств способствует существенному повышению показателей качества машин в целом и напрямую влияет на показатели надежности. В данной работе рассмотрены вопросы формирования шероховатости поверхности как одной из основных геометрических характеристик, описывающих качество поверхностного слоя материала.

В процессе формообразования деталей на их поверхности появляется шероховатость – ряд чередующихся выступов и впадин сравнительно малых размеров. Шероховатость может быть следом от резца или другого режущего инструмента, копией неровностей форм или штампов, может возникать вследствие вибраций, возникающих при резании, а также в результате действия иных факторов. Шероховатость на работу деталей машин оказывает существенное влияние [1,2]. Например, шероховатость влияет на качество посадки, герметичность соединений, на качество гальванических и лакокрасочных покрытий, на точность измерения деталей, а также может нарушать характер сопряжения деталей за счет смятия или интенсивного износа выступов профиля и т.п. Существует большое количество показателей шероховатости, каждый из которых отражает определённую характеристику поверхности, выраженную числовым значением [3]. В 1975 году в СССР был введен в действие ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики» [4], устанавливающий 6 параметров шероховатости. Однако в последующие десятилетия стандарт не пересматривался, не совершенствовался и в настоящее время, в связи со стремительной модернизацией оборудования, развитием измерительных технологий и производства в целом, возникла необходимость в новом стандарте, отвечающем современным требованиям. Несколько лет назад наряду с действующим, впервые вступил в силу стандарт ГОСТ Р ИСО 4287–2014[5], определяющий уже 14 показателей шероховатости. Пре-

имуществом нового стандарта является то, что он впервые нормирует показатели волнистости и первичного профиля. Многообразие новых параметров позволяет инженеру выбрать те, которые наиболее точно будут описывать характеризующую поверхность. Выбор параметров должен осуществляться исходя из функционального назначения изделия.

Безусловно, полный переход на новый стандарт повлечёт за собой ряд сложностей. Например, может потребоваться современное оборудование, обладающее большей точностью измерений, появится необходимость переквалификации персонала, переработки документации предприятия и т.д. Поэтому, так как ГОСТ 2789–73 не был отменен, необходимо определить случаи, в которых будет наиболее целесообразно использовать тот или иной стандарт. Если предприятие производит продукцию удовлетворительной точности или же в том случае, когда прежних нормируемых показателей вполне достаточно для описания характеризующей поверхности, использовать новый государственный стандарт финансово и экономически не целесообразно. Однако, применение ГОСТ Р ИСО 4287–2014 будет оправдано при необходимости повышения качества выпускаемой продукции и если предприятие планирует вести интернациональное сотрудничество. К сожалению, показателей, представленных в ГОСТ 2789–73, в некоторых случаях оказывается недостаточно, чтобы в полной мере описать микрогеометрию поверхности и удовлетворить требованиям заказчика. Поэтому немаловажным является то, что новый российский стандарт идентичен международному ИСО 4287:1997. Это обеспечивает возможность ведения конструктивного диалога между заказчиком и производителем и позволяет выпускаемой продукции в полной мере соответствовать международным стандартам по всем критериям оценки качества, не уступая западным аналогам.

Новый стандарт значительно расширил список показателей для характеристики поверхностей деталей и предоставил возможность инженерам расширить свои возможности по описанию микрогеометрии изделий, скорректировать их эксплуатационные свойства, повысить качество и надёжность отечественной продукции и вывести её на новый, международный уровень качества.

### Список литературы

[1] *Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Федоров В.А.* Влияние шероховатости исходной поверхности на силу алмазного выглаживания // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. –2014. –№ 12. –С. 171–180.

[2] *Калмыков В.В., Лепченков А.В.* Анализ корреляционной зависимости математических моделей продольной и поперечной шероховатости при точении // Главный механик. –2018. –№ 5. –С. 54–60.

[3] *Курочкина А. В.* Особенности перехода предприятий на контроль параметров шероховатости поверхности по ГОСТ Р ИСО 4287-2014 //Актуальные проблемы авиации и космонавтики. –2016. –Т. 2. –№ 12.

[4] *ГОСТ 2789-73.* Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики

[5] *ГОСТ Р ИСО 4287-2014.* Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности.

**Медведева Екатерина Александровна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: medvedeva.katr@yandex.ru

**Научный руководитель: Калмыков Вадим Владимирович.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kalmykovvv@bmstu.ru



Р.О. Ермачков

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТОЧНОСТИ ВЫСОТЫ ОСАЖЕННЫХ ЗАГОТОВОК ОТ СПОСОБА НАЛАДКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОСАДКЕ НА ГИДРАВЛИЧЕСКОМ ПРЕССЕ**

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

Скорость деформирования оказывает значительное влияние на точность осадки [2]. Соответственно при разном выборе пресса точность размеров осажённых заготовок будет разной. Исходя из этого, можно предположить, что и способ наладки пресса [7] будет оказывать существенное влияние на точность размеров (как высотных, так диаметральных) заготовок.

Во всех работах по холодной штамповке рассматривается осадка в саму поковку, то есть вся сила пресса действует только на заготовку [1,3,4]. Однако совершенно не изученным остаётся такой важный способ осадки заготовок, как осадка с применением жёсткого упора. Однако, вполне вероятно, что данный способ осадки позволил бы достичь большей точности высоты осажённых заготовок.

В целях подтверждения этой гипотезы был выполнен многофакторный эксперимент, в процессе которого решали задачу изготовления поковки высотным размером 22,5 мм после осадки.

В ходе эксперимента была проведена осадка цилиндрических заготовок диаметром 18 мм из алюминия Д16Т и меди М1 на гидравлическом прессе модели П481А с номинальной силой  $P=400\text{кН}$ . Заготовки имели разный высотный размер с шагом 0,5 мм в диапазоне от 28,5 до 31,5 мм. Осадку проводилась двумя способами: с металлическим упором высотой 22,5 мм и без упора. Каждый опыт эксперимента проводился 2 раза, после чего вычислялось среднее значение. Наладку системы проводили по большему размеру исходных заготовок.

Исследуемые факторы обозначили следующим образом:  $x_1$  - предел текучести материала ( $\sigma_s$ , МПа);  $x_2$  - относительная погрешность объёма исходной заготовки ( $\delta V_h$ , %). В качестве отклика выступала относительная погрешность высотного размера поковок после их осадки ( $\delta h$ , %).

Уровни варьирования факторов и интервалы варьирования в натуральном и нормализованном масштабах представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни факторов			Интервал варьирования
	-1	0	+1	
$X_1(\sigma_s)$ , МПа	75	175	275	100
$X_2(\delta V_h)$ , %	5	7,5	10	2,5

План эксперимента с результатами измерения осажённых заготовок при штамповке без упора представлен в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты ПФЭ 22 при штамповке без упора

N	$X_1(\sigma_s), \text{МПа}$	$X_2(\delta V_h), \%$	Параллельные опыты		$\bar{y}_i$
			$y_1$	$y_2$	
1	275	10	5.92	5.82	5.87
2	75	10	10.44	10.32	10.38
3	275	5	3.55	3.11	3.33
4	75	5	5.64	5.69	5.67

План эксперимента с результатами измерения осажённых заготовок при штамповке с упором представлен в таблице:

Таблица 3.

Результаты ПФЭ 22 при штамповке с упором

N	$X_1(\sigma_s), \text{МПа}$	$X_2(\delta V_h), \%$	Параллельные опыты		$\bar{y}_i$
			$y_1$	$y_2$	
1	275	10	1.07	0.97	1.02
2	75	10	0	0	0
3	275	5	1.2	1.28	1.24
4	75	5	0.22	0.32	0.27

После обработки результатов многофакторных экспериментов по известной методике [6] были получены уравнения регрессионного анализа, позволяющие выявить силу и характер влияния исследуемых факторов на отклик.

Уравнения регрессионного анализа, отражающие связь выходного параметра системы в виде относительной случайной погрешности высотного размера поковок ( $\delta h, \%$ ) после их осадки от предела текучести материала ( $\sigma_s, \text{МПа}$ ) и от относительной погрешности объёма исходной заготовки ( $\delta V_h, \%$ ) для штамповки без упора (1) и штамповки с упором (2), имеют вид:

$$y(\delta h) = 6.31 - 1.71X_1(\sigma_s) + 1.81X_2(\delta V_h) - 0.54(\sigma_s \delta V_h) \quad (1)$$

$$y(\delta h) = 0.63 + 0.5X_1(\sigma_s) - 0.12X_2(\delta V_h) \quad (2)$$

На основе полученных уравнений регрессионного анализа, можно сделать следующие выводы:

1) при осадке без упора с увеличением предела текучести осаживаемого материала относительная погрешность высоты осажённой поковки уменьшается, а при осадке с упором – увеличивается;

2) при осадке без упора предел текучести и относительная погрешность объёма заготовки оказывают примерно одинаковое по силе воздействие на относительную погрешность высоты осаженной поковки, но разное по направлению, а при осадке без упора влияние первого фактора гораздо сильнее.

3) при осадке с упором эффект взаимодействия двух факторов не оказывает существенного влияния на отклик.

### Список литературы

[1]. Антонюк Ф.И. Вяткин А.Г. Анализ факторов, влияющих на точность холодной плоской осадки // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. – № 1. - с. 3-5.

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

[3]. Антонюк Ф.И., Малышев А.Н. Повышение точности холодной объёмной осадки на гидравлических прессах// КШП.ОМД. – 2005.

[4]. Вяткин А.Г., Матвеев С.В., Влияние погрешности наладки винтового пресса на точность высотных размеров поковки при осадке// Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. №7. С. 22-25.

[5]. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник для студентов вузов. Л.: Машиностроение, 1985. 512с.

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

[7]. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства: учеб. Для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Машиностроение, 1987. – 384 с.

[8]. <https://elibrary.ru/item.asp?id=15809142> (Вяткин А.Г. Сравнительная оценка точности операций холодной объёмной штамповки, выполняемых на кривошипных и гидравлических прессах)

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

**Научный руководитель: Вяткин Андрей Геннадьевич.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: and-vyatkin@mail.ru

Д. В. Васильев

## **ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИНСТРУМЕНТОВ, РАССМАТРИВАЕМЫЕ В СТАТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ И В ДВИЖЕНИИ**

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

Исходной базой для формулирования определений геометрических параметров в состоянии покоя являются:

- 1) простота и доступность технологических приемов исполнения в металле заданных чертежом линейных и угловых размеров инструмента;
- 2) простота и доступность, а также достоверность контрольных измерений точности технологического исполнения на инструментах, заданных чертежом линейных и угловых размеров.

Отрыв определяемых геометрических параметров в статике от условий реальной работы инструмента целесообразен не только в интересах облегчения технологических приемов изготовления измерения последних, но также вполне допустим и с теоретической точки зрения [1]. При использовании математического аппарата представляется возможным даже для самых неблагоприятных условий произвести надлежащий перерасчет геометрических параметров с одного сечения или направления на другое и с любой степенью точности учесть влияние условий работы инструмента на величину геометрических параметров в состоянии покоя [2].

Исходной базой для формулирования определений геометрических параметров в движении является:

- 1) закономерность траекторий относительного перемещения режущих элементов инструмента и поверхностей изделия;
- 2) закономерность процесса деформации стружкообразования и направления сбегания срезанной стружки по контактной площадке передней поверхности инструмента.

В зависимости от сложности принципиальной кинематической схемы комбинации и соотношения линейных или угловых скоростей сочетаемых движений могут иметь место самые разнообразные (как по характеру, так и по сложности) траектории относительного перемещения инструмента и изделия [3]. Характер и сложность траекторий относительного перемещения могут быть изменены, если одному и тому же инструменту сообщить другие элементарные, явные или скрытые, движения или же в достаточно широких пределах изменить соотношение скоростей движений, сообщаемых инструменту и изделию [4].

Взаимодействие металлов на трущихся поверхностях обрабатываемого изделия, срезанной стружки и контактных площадках инструмента происходит в направлениях траекторий относительного перемещения этих по-

верхностей. Любые изменения, вносимые в характер и направление этих траекторий, неизбежно отражаются на проявлении износа трущихся контактных площадок инструмента и на стойкости последних.

Помимо указанных последствий любые изменения в характере и направлении траектории относительного перемещения непосредственно связаны с соответствующими изменениями абсолютной величины и направления измерения реально существующих геометрических параметров режущих элементов [5, 6]. В общем случае реальные геометрические параметры в процессе работы инструмента не тождественны с геометрическими параметрами в статике ни по величине, ни по направлению измерения.

Если определения геометрических параметров в статике находят свое практическое приложение как руководящий норматив для надлежащей простановки размеров на чертежах конструируемых инструментов и контрольных измерений в процессе изготовления последних, то определение геометрических параметров в движении должно найти свое практическое приложение как техническое руководство при лабораторных исследованиях и нормировании режимов резания в условиях заводской эксплуатации режущих инструментов.

### Список литературы

- [1]. *Грановский Г.И.* Кинематика резания. - М.: МАШГИЗ, 1948. - 205 с.
- [2]. *Этин А. О.* Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. – М.: Машиностроение 1964. -321 с.
- [3]. *Зенкин Н.В., Щелупова О.А.* Исследование влияния технологических факторов на качество поверхности обработанной фрезами с двумя режущими кромками // Машиностроение и компьютерные технологии. 2012. № 8. С. 1.
- [4]. *Калмыков В.В., Антонюк Ф.И., Зенкин Н.В.* Выбор метода для автоматизации контроля состояния режущего инструмента // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 3 (7). С. 53-55.
- [5]. *Зенкин Н.В., Калмыков В.В., Мальшев И.Е.* Фрезерование отверстий специальными фрезами // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 1 (5). С. 76-81.
- [6]. *Зенкин Н.В., Щелупова О.А.* Обработка внутренних поверхностей вращения фрезами с двумя режущими кромками // Инженерный вестник. 2012. № 7. С.

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

**Научный руководитель: Зенкин Николай Васильевич.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

Я.С. Мельников

## ГИБРИДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЯ

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

В настоящее время с интенсивным развитием технологий и оборудования, появляется все больше требований к точности и, соответственно, качеству изделий [1-2]. И если в конце прошлого века -несколько базовых параметров, характеризующих профиль поверхности было достаточно для определения годности изделия, то в современном машиностроении становится все сложнее дать оценку качеству поверхности используя устаревшие высотные и шаговые параметры, так как имея одинаковые значения этих характеристик, изделие может иметь разные эксплуатационные свойства и износостойкость (см. рис.1) [3].

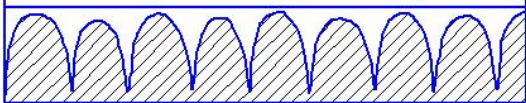
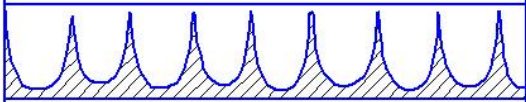
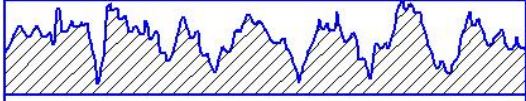
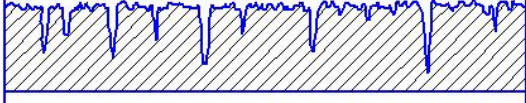
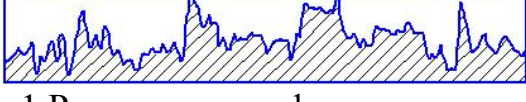
Профиль поверхности	Параметры поверхности		
	$R_{max}$	$R_z$	$R_a$
	5	5	1
	5	5	1
	5	4.5	1
	5	4.7	1
	5	4	1

Рис.1 Различные профили с одинаковым значением  $R_a$

Таким образом, становится понятно, что использовать три высотных и два шаговых параметра недостаточно, и необходимо использовать дополнительные параметры, которые смогут в полной мере оценить характер и профиль поверхности.

Примерами таких параметров могут стать гибридные параметры, которые описаны в Национальном стандарте ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [6], а также в американском стандарте ASMEB 46.1-2002 [5]:

1. Среднеквадратичный угол наклона оцениваемого профиля  $R\Delta q$  (rootmeansquareslope) в пределах базовой длины, который рассчитывается по следующей формуле [3]:

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left( \left[ \frac{dz}{dx} \right] \right)^2 dx} \quad (1)$$

где  $dz_i/dx$  – тангенс угла наклона в  $i$ -ой точке профиля (или же местный угол наклона), который в свою очередь считается по следующей формуле [6]:

$$\Delta z_i = \frac{z_i - z_{i-1}}{\Delta x} \quad (2)$$

где  $z_i$  – высота  $i$ -ой точки профиля;  $\Delta x$  – расстояние между смежными точками профиля.

Среднеквадратичный угол наклона оцениваемого профиля характеризует адгезионные свойства поверхности, что важно при покраске и покрытиях.

Кроме того, среднеквадратичный угол наклона характеризует концентрацию напряжений, фрикционные свойства, износоустойчивость и отражательные свойства поверхности [3].

2. Средний абсолютный наклон  $R\Delta a$  (AverageAbsoluteSlope) в пределах длины оценки, рассчитываемый по следующей формуле [5]:

$$R\Delta a = \frac{1}{\ln \int_0^l \left| \frac{dz}{dx} \right| dx} \quad (3)$$

Этот параметр отражает: твердость, упругость поверхности; износоустойчивость, отражательную способность, величину коэффициента трения, адгезию и виброустойчивость.

3. Средний квадратический наклон (RootMeanSlope)  $Rd q$  – среднее квадратическое значение наклона профиля в пределах базовой длины оценки [5].

$$Rd q = \sqrt{\frac{1}{\ln \int_0^l \left( \left[ \frac{dz}{dx} \right] \right)^2 dx}} \quad (4)$$

Параметр более чувствителен к экстремальным наклонам, чем  $R\Delta a$ .

В литературных источниках отсутствует информация описывающая степень влияния данных гибридных параметров на конкретные эксплуатационные свойства. Кроме того, нет данных какие технологические режимы формируют их. Проведение исследований для решения этих вопросов является актуальным. Результаты исследований будут востребованы при производстве деталей с заданными эксплуатационными характеристиками.

### Список литературы

[1] Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Савина Ю.А. Математическое моделирование качественных характеристик при обработке конструкцион-

ных материалов на основе железа // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 5. С. 74-77.

[2] *Логутенкова Е.В., Мельников Я.С.* Анализ геометрических характеристик изделий // В сборнике: Научно-технологические инновации в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2017. С. 4-6.

[3] *Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н.* Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт/ Под редакцией канд. т.н. Табачниковой Н.А. СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2007, 136с.

[4] PawelPawlus/ Ananalysisofslopeofsurface topography. RzeszowUniversity of Technology, Department of Manufacturing Technology and Production Organization 35-959 Rzeszow, Poland.

[5] Американский национальный стандарт «Surface texture (Surface Roughness, Waviness and lay)» ASME B46.1-2002.

[6] Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделия (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности.

**Мельников Ярослав Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: melnikov.yar2017@yandex.ru

**Научный руководитель: Мусохранов Марсель Владимирович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: marls77@yandex.ru



А.О. Штокал, Е.В. Рыков, А.В. Артемьев, Т.А. Говорун,  
В.К. Шаталов, К.Б. Добросовестнов, В.А. Богачёв,  
О.П. Баженова

## **ИЗУЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ МДО-ПОКРЫТИЯ НА АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ Д16АТ В УСЛОВИЯХ ВИБРОУДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ**

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

В составе космических аппаратов могут находиться узлы с отложенным срабатыванием. В ближайшем будущем такие узлы будут использоваться всё чаще, что связано с ростом срока активного существования космических аппаратов, а также с необходимостью их отправки всё дальше от Земли для исследования удалённых участков Солнечной системы.

Наибольшую техническую сложность представляет задача предотвратить возникновение холодной сварки между контактирующими металлическими поверхностями узлов с отложенным срабатыванием. Имеются сведения о том, холодная сварка приводила к потере работоспособности отдельных систем космических аппаратов [1]. Экспериментально определено, что твёрдые смазочные покрытия на основе дисульфида молибдена, используемые для предотвращения контакта металлических поверхностей, могут истираться до металлической подложки под действием фреттинга при выведении космического аппарата на целевую орбиту.

Перспективным направлением исключения холодной сварки контактирующих поверхностей узлов с отложенным срабатыванием является формирование на них керамических покрытий, так как диффузионная сварка керамических материалов без применения металлических промежуточных слоёв происходит только в контролируемой среде (в космосе роль контролируемой атмосферы играет вакуум) и при температуре около 1600°C [2], что гораздо выше температур, при которых работают узлы космических аппаратов. Также следует учесть, что одни из самых низких сил адгезии в условиях фреттинга были обнаружены при использовании керамического покрытия «Керонит» [3].

Наиболее прогрессивным методом формирования керамического слоя на поверхности контактирующих деталей из алюминиевых, магниевых или титановых сплавов представляется микродуговое оксидирование (МДО) [4–6]. МДО-покрытие, сформированное на поверхности алюминиевого сплава АМг6, также не выдерживает фреттинг-износа, возникающего в процессе выведения космического аппарата на целевую орбиту. Существует предположение [7], что в первую очередь это связано с низким пределом текучести алюминиевого сплава АМг6. Поэтому в нашем эксперименте в качестве материала основы был выбран алюминиевый сплав Д16АТ, предварительно закалён-

ный и естественно состаренный. Толщина сформированного МДО-покрытия в точке контакта поверхностей составила 175 мкм.

Для экспериментальной проверки стойкости МДО-покрытия на поверхности алюминиевого сплава Д16АТ к фреттинг-износу в узлах космического аппарата на этапе транспортирования было использовано приспособление (рис. 1, 2), которое позволяет смоделировать нагрузки на контактирующие поверхности деталей узлов космического аппарата при его транспортировке на целевую орбиту. К приспособлению приложена вибрационная нагрузка, аналогичная возникающей при выведении космического аппарата ракетой-носителем «Протон-М».

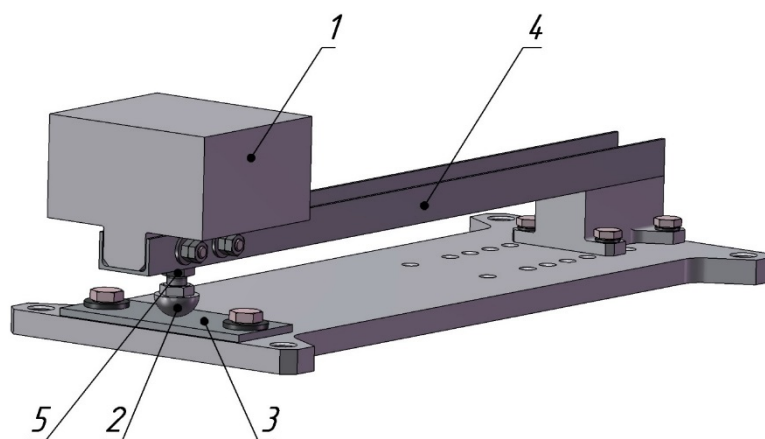


Рис. 1. Приспособление, моделирующее нагрузки на контактирующие поверхности деталей узлов космического аппарата при его транспортировке на целевую орбиту. 1 – имитатор нагрузки; 2 – упор; 3 – площадка; 4 – балка; 5 – контргайка

Перемещение имитатора нагрузки 1 вдоль балки 4 позволяет изменять собственную частоту приспособления. Для обеспечения заданных конструктивными условиями размещения узла в составе космического аппарата собственной частоты колебаний размеры сечения и длина  $l_{\sigma}$  балки приспособления определяется из условия равенства податливости балки и податливости узла космического аппарата:

$$\frac{l_{\sigma}}{E_{\sigma} \cdot I_{\sigma}} = \frac{l_m}{E_m \cdot I_m},$$

где  $l_{\sigma}$  – длина балки, м;  $l_m$  – длина силового элемента узла, м;  $E_{\sigma}$  – модуль упругости материала балки, МПа;  $E_m$  – модуль упругости материала силового элемента узла, МПа;  $I_{\sigma}$  – геометрический момент инерции сечения балки,  $m^4$ ;  $I_m$  – геометрический момент инерции сечения силового элемента узла,  $m^4$ .

Так, балка 4 приспособления на рис. 1 обеспечивает изгибную частоту колебаний, равную 15 Гц, что соответствует реальным значениям частоты колебаний наиболее часто применяемых силовых схем узлов космических

аппаратов. Масса имитатора нагрузки 1 составляет 1,99 кг, расстояние от центра масс имитатора нагрузки до заделки балки (вылет балки) – 0,198 м.



Рис. 2. Приспособление установлено на вибростенде

Усилие предварительной затяжки упора обеспечивает нераскрытие стыка при динамических воздействиях. После контакта упора 2 и площадки 3 с целью создания усилия предварительной затяжки упор был докручен с определённым моментом. Для упора с резьбой М8 момент затяжки составляет  $(0,7 \pm 0,035) \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Таким образом, усилие в точке контакта поверхностей упора и площадки составляет  $(550 \pm 27,5) \text{ Н}$ . Чтобы предотвратить самоотвинчивание упора 2 в процессе вибронагружения, в конструкцию приспособления введена контргайка 5.

Испытания на воздействие вибрации, соответствующие режимам транспортировки космического аппарата, проводились на виброкомплексе V984LS (149) фирмы LING DS LTD по одной оси, направленной по нормали к рабочей поверхности площадки 3 (рис. 1). Виброкомплекс оснащён многоканальной системой управления SCADAS III фирмы LMS. На виброкомплексе и приспособлении были установлены 5 акселерометров типа AP2037 (рис. 2) для контроля режимов вибронагружения. Исследования проводили в нормальных атмосферных условиях для проведения измерений и испытаний согласно ГОСТ 28198-89.

В самом начале и после вибронагружений проводились испытания по определению критических частот в диапазоне от 5 до 200 Гц на режимах, представленных в табл. 1. Скорость изменения частоты составляла 1 отк/мин. Уровень вибронагружений задавали в  $g$ , где  $g$  – ускорение свободного падения, которое принимается равным  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

Таблица 1.

Режим виброн нагружений при испытаниях по определению критических частот

Диапазон частот, Гц	5-10	10-20	20-40	40-80	80-200
Уровень виброн нагружений, $g$	0,15	0,2	0,3	0,5	1,0

В диапазоне частот от 5 до 20 Гц проводились испытания на синусоидальную вибрацию на режимах, представленных в табл. 2. Скорость изменения частоты составляла 1 отк/мин.

Таблица 2.

Режим виброн нагружений при испытаниях на синусоидальную вибрацию

Диапазон частот, Гц	5-10	10-20
Уровень виброн нагружений, $g$	0,5	0,5-0,6

В диапазоне частот от 20 до 2000 Гц проводились испытания на случайную вибрацию на режимах, представленных в табл. 3.

Таблица 3.

Режим виброн нагружений при испытаниях на случайную вибрацию

Время действия режима, с	Диапазон частот, Гц	20-50	50-100	100-200	200-500	500-1000	1000-2000
120	Уровень виброн нагружений,	0,04-0,05	0,05-0,06	0,06-0,1	0,1	0,1-0,06	0,06-0,03
480	$\frac{g^2}{Гц}$	0,02	0,02	0,02	0,02-0,008	0,008-0,004	0,004-0,002

После испытания на вибростенде площадка из алюминиевого сплава Д16АТ с МДО-покрытием (рис. 3) была изучена на металлографическом микроскопе (рис. 4, 5).

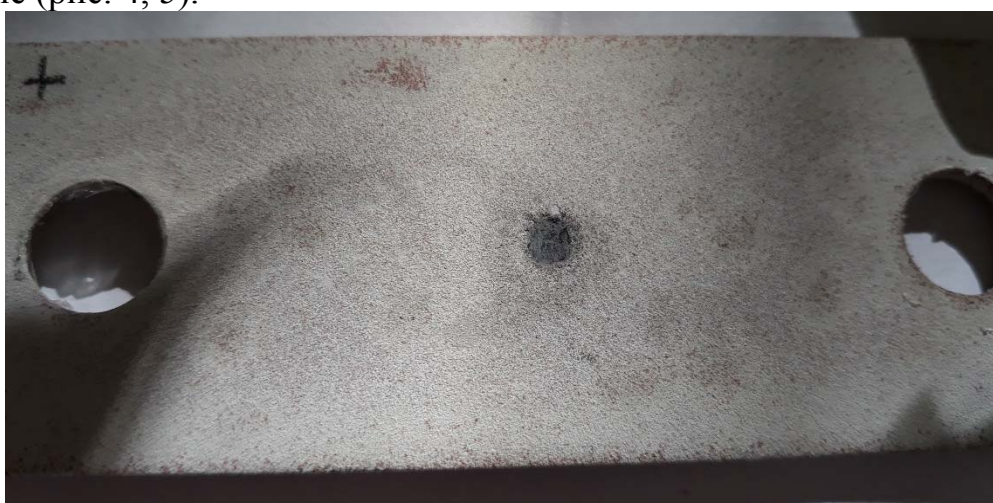
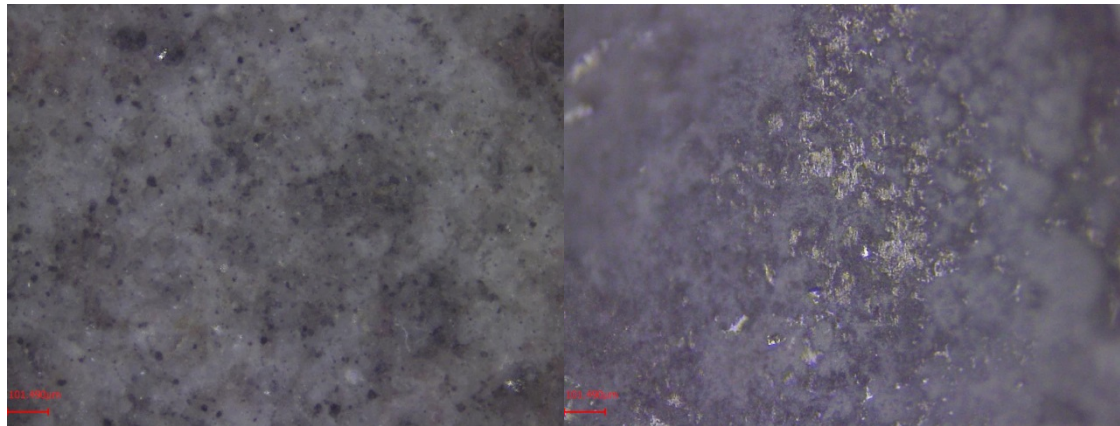


Рис. 3. Площадка из алюминиевого сплава Д16АТ с МДО-покрытием после испытания на вибростенде



а

б

Рис. 4. Поверхность МДО-покрытия на алюминиевом сплаве Д16АТ на свободном участке (а) и в зоне контакта с упором (б)

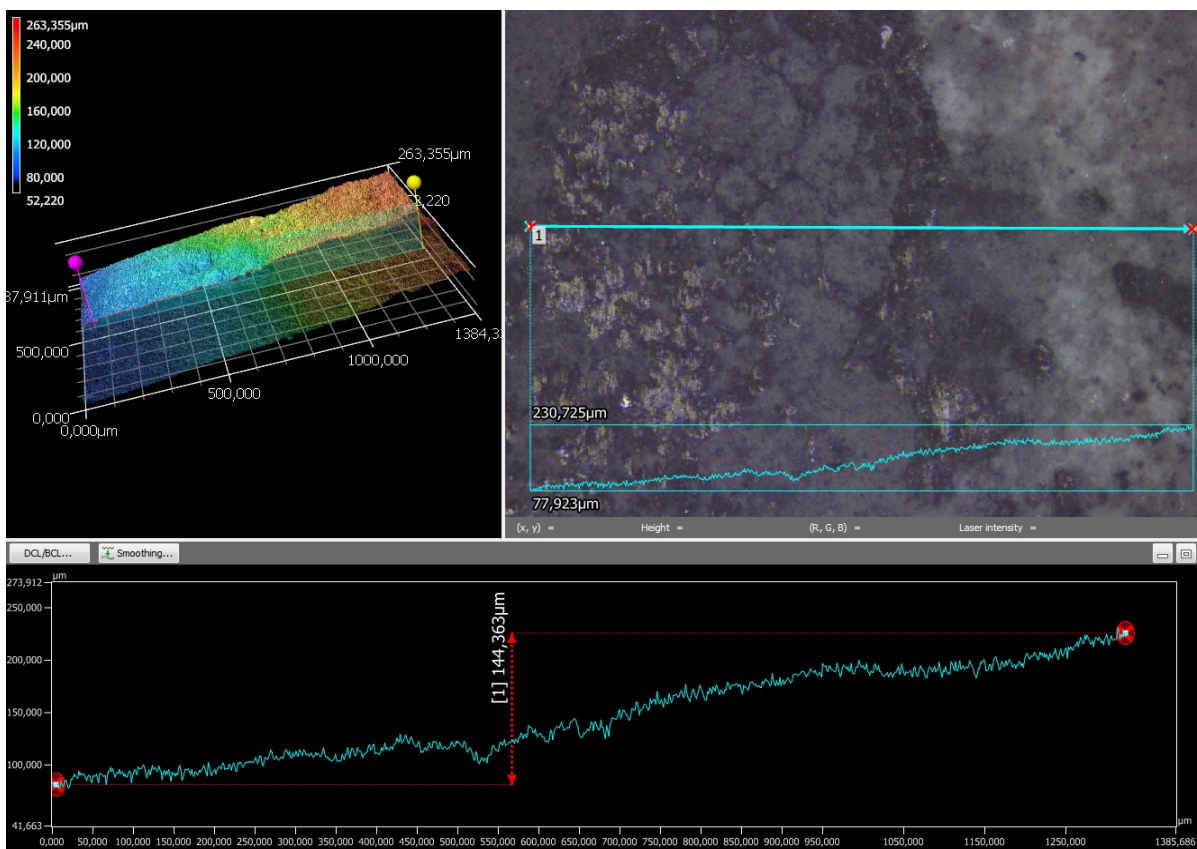


Рис. 5. Профилограмма поверхности МДО-покрытия на алюминиевом сплаве Д16АТ в зоне контакта с упором

Изучение профилограммы (рис. 5) и сравнение её геометрии с изначальной толщиной покрытия, а также анализ поверхности МДО-покрытия на свободном участке и в зоне контакта с упором (рис. 4, а,б) показывают, что в процессе фреттинг-износа большая часть МДО-покрытия в зоне контакта сработалась. Также в зоне контакта обнаружены частицы изношенного МДО-покрытия в совокупности с материалом упора – сталью 20Х13 (рис. 3). Наличие данных частиц, играющих роль твёрдого смазочного покрытия, а также снижение площади контакта металлических поверхностей

(рис. 4, б) приводит к снижению сил адгезии в условиях фреттинга, обнаруженному в работе [3]. Данный факт позволяет заключить, что использование МДО-покрытия на поверхности алюминиевого сплава Д16АТ приводит к уменьшению площади контакта металлических поверхностей после виброударного нагружения в процессе выведения космического аппарата на целевую орбиту, следовательно, вероятность возникновения холодной сварки и площадь возможного схватывания металлических поверхностей также снижаются.

### Список литературы

[1]. Штокал А.О., Рыков Е.В., Добросовестнов К.Б., Говорун Т.А., Шаталов В.К., Богачёв В.А. Пути повышения надёжности работы узлов раскрытия космических аппаратов с отложенным срабатыванием // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. — 2017. — № 4 (38). — С. 60–67.

[2]. Люшинский А.В. Диффузионная сварка разнородных материалов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. — М.: Академия, 2006. — 42 с.

[3]. Merstallinger A., Sales M., Semerad E., Dunn B.D. Assessment of Cold Welding between Separable Contact Surfaces due to Impact and Fretting under Vacuum (ESA STM-279 November 2009). — ESA Communication Production Office, 2009. — 57 p.

[4]. Шаталов В.К., Лысенко Л.В., Минаев А.Н., Сулина О.В., Штокал А.О. Способы микродугового оксидирования поверхностей деталей из титановых сплавов [Электронный ресурс] // Наука и образование. — 2013. — № 7. — С. 1–18. — DOI: 10.7463/0713.0583316. — Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/583316.html> (дата обращения: 19.06.2017).

[5]. Шаталов В.К., Штокал А.О., Рыков Е.В., Добросовестнов К.Б. Применение методов микродугового оксидирования при создании конструктивных элементов космических аппаратов [Электронный ресурс] // Наука и образование. — 2014. — № 6. — С. 183–192. — DOI: 10.7463/0614.0712840. — Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/712840.html> (дата обращения: 19.06.2017).

[6]. Штокал А.О., Рыков Е.В., Добросовестнов К.Б., Говорун Т.А., Баженова О.П., Рожкова Т.В. Многофункциональный метод изготовления прецизионных узлов космического телескопа // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2016. — Т. 21. — № 1. — С. 27–41.

[7]. Говорун Т.А., Шаталов В.К., Штокал А.О., Рыков Е.В., Добросовестнов К.Б., Баженова О.П., Богачёв В.А. Методы предотвращения холодной сварки контактирующих поверхностей узлов раскрытия космических аппаратов при длительном нахождении на целевой орбите // Научно-технические технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, 18–20 апреля 2017 г. — Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. — Т. 1. С. 28–33.

**Штокал Александр Олегович**– ведущий конструктор сектора конструирования наземных систем, канд. техн. наук. Филиал АО "НПО Лавочкина" в г. Калуга. E-mail: [cuauthemoc1@yandex.ru](mailto:cuauthemoc1@yandex.ru)

**Рыков Евгений Валентинович** – начальник сектора конструирования наземных систем. Филиал АО "НПО Лавочкина" в г. Калуга. E-mail: [rik@laspace.ru](mailto:rik@laspace.ru)

**Артемьев Артем Валентинович** –главный конструктор. Филиал АО "НПО Лавочкина" в г. Калуга. E-mail: [arav@laspace.ru](mailto:arav@laspace.ru)

**Говорун Татьяна Александровна**– аспирант. Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [Glancet@yandex.ru](mailto:Glancet@yandex.ru)

**Шаталов Валерий Константинович** – заведующий кафедрой "Материаловедение и химия", д-р техн. наук. Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [vkshatalov@yandex.ru](mailto:vkshatalov@yandex.ru)

**Добросовестнов Константин Борисович**– начальник сектора надёжности, безопасности, прочности и эргономического обеспечения Филиал АО "НПО Лавочкина" в г. Калуга. E-mail: [dkb@laspace.ru](mailto:dkb@laspace.ru)

**Богачёв Вячеслав Алексеевич**– начальник отдела экспериментальной отработки и внедрения новых материалов № 574 АО "НПО Лавочкина", г. Химки Московской области. E-mail: [tribolab@laspace.ru](mailto:tribolab@laspace.ru)

**Баженова Ольга Петровна** –начальник сектора экспериментальной отработки и внедрения новых материалов № 574-1 АО "НПО Лавочкина", г. Химки Московской области. E-mail: [bazhenova\\_laspace@mail.ru](mailto:bazhenova_laspace@mail.ru)

В.Г. Тертычный

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС АЗОТИРОВАНИЯ**

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

Метод азотирования, суть которого заключается в насыщении поверхностного слоя стального изделия азотом, стал применяться в промышленных масштабах относительно недавно. При азотировании на стальное изделие не оказывается значительное термическое воздействие, однако твердость поверхностного слоя многократно возрастает. После выполнения данного процесса изделия сразу можно подвергать полировке и другим видам финишной обработки.

В процессе азотирования происходит насыщение стальной детали аммиаком в атмосфере аммиака ( $\text{NH}_3$ ) при температурах 500...700 °С. Для нагрева применяются специальные герметичные печи, через которые пропускается аммиак. Однако следует отметить, что основным недостатком данного метода является весьма большая длительность процесса. В среднем процедура длится не менее 90 часов. Глубина азотированного слоя после обработки получается в пределах от 0,3 мм до 0,6 мм. Азотирование может производиться по двум режимам: одноступенчатому (с выдержкой 90 часов при температуре до 520 °С) или двухступенчатому (с выдержкой 15...20 часов при температуре до 520 °С и с выдержкой 20...25 часов при температуре до 570 °С). При декоративной обработке процессу подвергаются любые типы стали, включая черные углеродистые. Температура при этом может различаться от 600 до 700°С, а выдержка - от 50 минут до 1 часа.

Одним из главных требований к азотированному слою является повышенный показатель твердости и износостойчивости, которые достигаются благодаря применению сплавов, содержащих алюминий. Например, марка 38ХМЮА, которая кроме железа и углерода включает в себя хром, молибден и алюминий. В процессе азотирования данной стали образуются нитриды железа, хрома, молибдена и алюминия, которые придают поверхностному слою высокие показатели твердости (примерно 1200 HV). Однако, марка применяемой мной стали (сталь 40Х) не содержит алюминия. Для производства деталей, которые принципиально допускают меньший показатель твердости упроченной поверхности, допускается использование азотируемых сталей, в состав которых не входит алюминий. Эти стали имеют при пониженной твердости азотированного слоя более высокие механические характеристики и технологичность. Под механическими характеристиками при этом понимаются такие показатели, как предел ползучести, текучести, длительной прочности материала, прочности на разрыв; под технологичностью подразумеваются свойства материала, определяю-



щие его способность к достижению минимальных затрат при производстве и эксплуатации.

### Список литературы

[1] Безъязычный В.Ф. Основы технологии машиностроения [Электронный ресурс]: учебник для вузов. Москва: Машиностроение, 2013. 567 с. [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=37005](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=37005).

[2] Герасимов, С.А. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов [Электронный ресурс]: монография / С.А. Герасимов, Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева. — Электрон. дан. — М. : 2014. — 518 с. <https://e.lanbook.com/book/106481>.

[3] Крылов, О. В. Гетерогенный катализ / О. В. Крылов. - М. : Академкнига, 2004. - 679 с.

[4] Кузнецов, Л.Д. Основы предвидения каталитического действия / Л.Д. Кузнецов, П.Д. Рабина, В.С. Соболевский, Ш.Ш. Мищенко . // Сб. Азотная промышленность. - 1967. - №4. - С.19.

[5] Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г.-И. Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1994.

[6] Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985.

[7] Либерман Е.Ю. Катализаторы синтеза аммиака : определение активности / Е. Ю. Либерман, Н. В. Нефёдова, Т.В. Конькова - М. : РХТУ, 2002. - 48 с.

[8] Рудницкий, Л.А. Механизм взаимодействия металлов с газами / Л.А. Рудницкий , М.И. Иванов , П.Д. Рабина , Л.Д. Кузнецов // Кинетика и катализ. - 1968. - №89. - С. 36-41.

[9] Румянцева, К.Е. Термическая и химико-термическая обработка [Электронный ресурс] : учебное пособие / К.Е. Румянцева. — Электрон. дан. — Иваново : ИГХТУ, 2012. — 103 с. <https://e.lanbook.com/book/4540>.

**Тертычный Владислав Геннадьевич**— студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [vladexbattlefield@gmail.com](mailto:vladexbattlefield@gmail.com)

**Научный руководитель: Бысов Сергей Александрович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [bysov.s@yandex.ru](mailto:bysov.s@yandex.ru)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПУТЁМ НАНЕСЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ**

**Введение.** Определяющим качественным показателем режущего инструмента является его стойкость. Существует ряд мероприятий, позволяющих увеличить этот показатель. Наиболее распространенным из них, является нанесение разного рода износостойких покрытий.

Первое износостойкое покрытие TiN позволило совершить большой рывок в области металлообработки. Даже однослойные покрытия, позволили увеличить срок эксплуатации инструмента на 40-50% [1-2]. Современные покрытия используют при нанесении на пластины, а не на весь инструмент, т.к. это увеличивает производительность и уменьшает затраты на переточку. Также в инструментальном производстве применяют многослойные покрытия, с помощью которых можно подбирать необходимые параметры, такие как жаростойкость, износостойкость и т.д.

Упрочнение инструмента или облагораживание режущих лезвий в настоящее время становится одним из наиболее важных мероприятий и не требует больших затрат. Ни одно из названий не отражает в полной мере сущность процессов, при которых на поверхности уже готового инструмента перед его использованием наносятся тонкие пленки других материалов или эти поверхности насыщаются некоторыми химическими элементами [3]. В результате изменяются физико-механические свойства поверхностных слоев инструмента, что в несколько раз увеличивает его стойкость или обеспечивает возможность повышения производительности обработки за счет увеличения скоростей резания.

Основные достоинства фрез с нанесенным износостойким покрытием [4-5]:

1. Повышение производительности обработки за счет увеличения скоростей резания и подачи.
2. Увеличение срока службы инструмента.
3. Снижение шероховатости обрабатываемых поверхностей.
4. Расширение области применения за счет увеличения твердости поверхности.

**Постановка задачи.** На предприятии ПАО “КАДВИ” возникла необходимость повышения стойкости инструмента при обработке лопаток для газотурбинного двигателя. Совместно с компанией OerlikonBalzers, было принято решение о нанесении специального покрытия BALINITALCRONA, а впоследствии его модификации BALINITALCRONAPRO на основе хромонитрида алюминия на режущий инструмент.

**Оборудование и материалы. Результаты.** Результаты применения специальных износостойких покрытий на инструменте из твердого сплава  
 Наименование инструмента: фреза концевая.  
 Материал инструмента: сплав DK460UF.  
 Обрабатываемый материал: жаропрочный литейный сплав на никелевой основе ЖС6К.  
 Оборудование: 5-ти осевой обрабатывающий центр HermleC600U.

Результаты применения специальных износостойких покрытий на инструменте из быстрорежущей стали.

В таблице 1 приведен химический состав сплавов.

Таблица 1.

Химический состав сплавов

Сплав	Наименование элемента												
	WC	Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	Co	Ti	Al	V
ЖС6К	-	≤2	0,13-0,2	≤0,4	≤0,4	60,1-68,4	9,5-12	3,5-4,5	4,5-5,5	4-5,5	2,5-3,2	5-6	-
ASP 2060	-	-	2,3	-	-	-	4,2	7,0	6,5	10,5	-	-	6,5
DK460UF	90	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-

На рисунке 1 и 2 показана зависимость стойкости инструмента и количества обрабатываемых лопаток от вида применяемого покрытия. На рисунке 3 изображён эскиз лопатки.

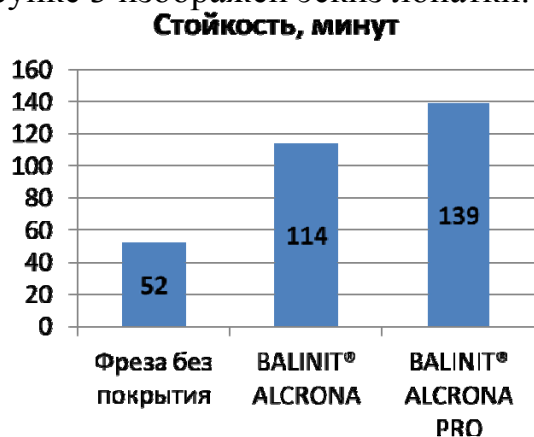


Рис. 1. Зависимость стойкости инструмента от вида применяемого покрытия

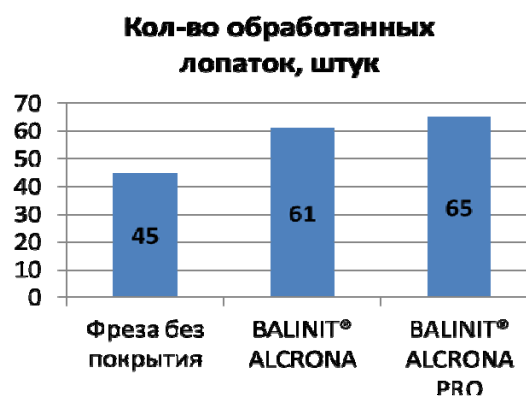


Рис. 2. Зависимость количества обрабатываемых лопаток от вида применяемого покрытия

Наименование инструмента: фреза концевая.  
 Материал инструмента: сплав ASP2060.  
 Обрабатываемый материал: жаропрочный литейный сплав на никелевой основе ЖС6К.  
 Оборудование: консольно-фрезерный станок 6P82Г.

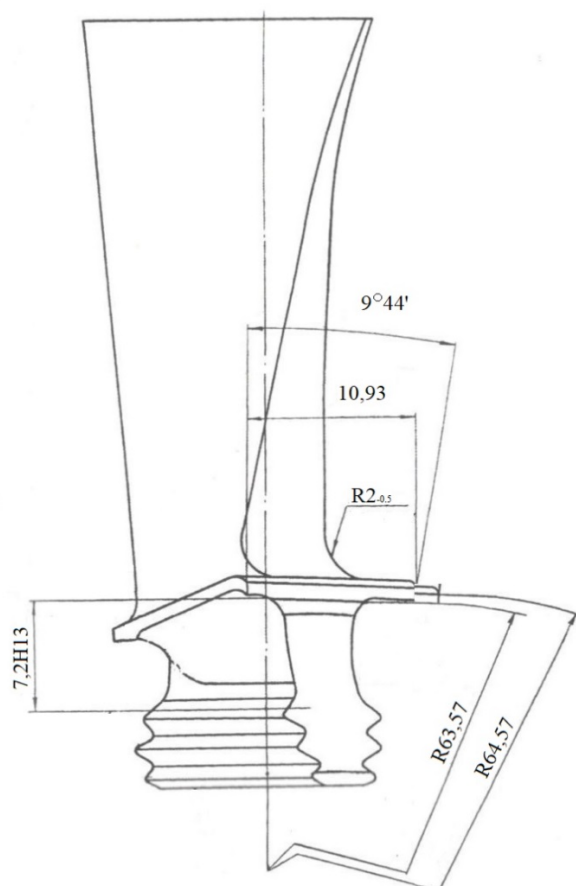


Рис. 3. Эскиз лопатки

### Выводы

В результате проведенных исследований была повышена производительность обработки лопаток на 20 %. Срок службы инструмента увеличен в 2,7 раза. За счёт увеличения жаростойкости и стойкости инструмента появилась возможность использовать такие режимы резания, при которых была обеспечена шероховатость обрабатываемой поверхности  $Ra=0,8$ . Ранее этот показатель составлял  $Ra=1,6$ . Расширилась область применения инструмента за счёт увеличения твёрдости, появилась возможность обработки жаропрочных сплавов, а также обработка материалов с твёрдостью до HRC 70.

### Список литературы

- [1]. Попеско А.И., Ступин А.В., Чесноков С.А. Износ технологических машин и оборудования при оценке их рыночной стоимости // Учебное пособие / Москва, 2002. Сер. Энциклопедия оценки.
- [2]. Гусев А.С., Поляков А.А. Повышение стойкости режущего инструмента с использованием многослойных покрытий // Успехи современного естествознания. 2012.№6. С. 174.
- [3]. Маношин Д.В., Насад Т.Г. Метод повышения стойкости режущих твердосплавных пластин для обработки труднообрабатываемых сплавов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 3.№2(58). С. 92-95.

[4]. *Калмыков В.В., Атрощенко В.Н.* Исследование влияния методов обработки поверхностей на их износостойкость // В сборнике: Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе / Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2017. С. 20-22.

[5]. *Ивченко Т.Г., Петряева И.А., Михайлов А.Н.* Оценка эффективности использования режущих инструментов с износостойкими покрытиями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. №8-2. С. 190-198.

**Аксёнов Александр Сергеевич** – заместитель начальника инструментального производства по технической части ПАО «КАДВИ». E-mail: A.Aksenov@kadvi.ru

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

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

**Сорокин Владимир Павлович** – учащийся МБОУ Школа №13. E-mail: vladimir.pav@icloud.com

Е.С.Телтова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

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

Обработка отверстий является одной из наиболее трудоемких операций. Это обусловлено особенностями процесса резания, т.к. затруднен подвод СОЖ к режущим лезвиям, вывод стружки, недостаточная жесткость режущего инструмента невозможность непосредственного наблюдения за резанием.

Отверстия обрабатывают на сверлильных, расточных, координатно-расточных станках, так же на всех станках с ЧПУ.

### Конфигурация отверстий

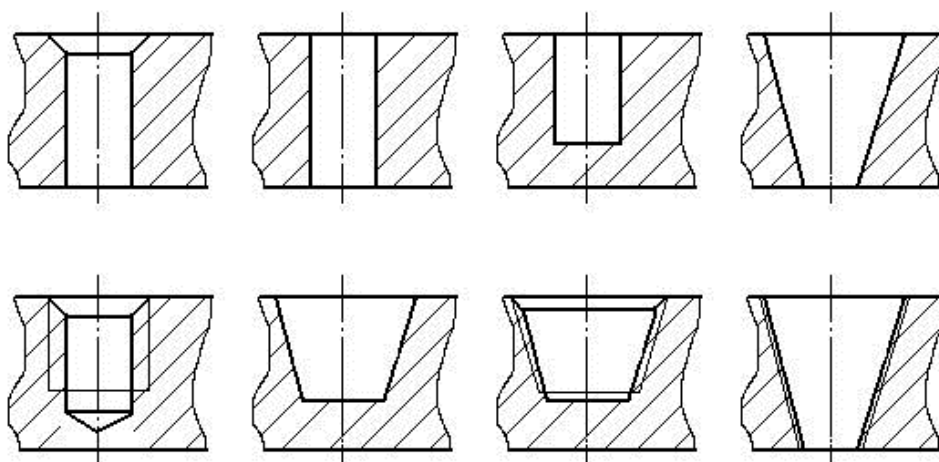


Рис.1 Типы отверстий

Конфигурация любого отверстия может быть сформирована из основных и дополнительных элементов. Основные элементы – это глухие или сквозные отверстия. Дополнительные элементы отверстий являются фаски, резьба, углубления прямоугольного профиля, канавки и т.д.

Большинство основных элементов составляют плоские цилиндрические отверстия от 7 до 13 квалитета точности. В то же время в большом количестве деталей время обработки, приходящееся на обработку отверстий, доходит до 80%.

### Способы обработки отверстий

Конкретный способ и инструмент для обработки отверстий выбираются в соответствии с характеристиками необходимого результата. Различают три способа обработки отверстий – сверление, развертывание и зенкерование.

В свою очередь эти методы подразделяются на дополнительные технологические операции, к которым относятся – рассверливание, цекование и зенкование.

### Методы обработки отверстий

Процесс обработки отверстий предусматривает использование двух технологических методов: последовательный и параллельный.

Параллельной – каждым инструментом обрабатываются отверстия с одним диаметром, затем инструмент меняют и цикл повторяется.

Последовательной – каждое отверстие обрабатывают всеми инструментами, затем обрабатывают следующее отверстие.

Выбор метода связан с минимизацией холостых ходов. Исключения бывают, если метод определяется технологическими условиями обработки, например, при обработке отверстий 7-9-го квалитетов с жесткими межцентровыми расстояниями (менее 0,2 мм), здесь целесообразно первые переходы (центрирование, сверление, зенкование) выполнять параллельно, а заключительные – последовательно.

Для решения задачи минимизации времени холостых ходов получим требуемые зависимости:

(1)

T

где  $T$  – время на смену инструмента;  $\theta_t$  – время на перемещение при позиционировании.

При параллельном методе каждый инструмент меняют один раз:

$$\sum T = m \cdot T, \quad (2)$$

где  $m$  – число инструментов;  $T$  – среднее время смены одного инструмента.

Время обхода отверстия одним набором инструментов:

$$\sum \theta = m \cdot \theta, \quad (3)$$

где  $\theta$  – время обхода всех отверстий одним инструментом

Таким образом общее время при параллельном методе:

(4)

При последовательном переходе каждый инструмент меняют столько раз, сколько всего отверстий (n) в группе:

(5)

а время обхода комплектом инструментов всех отверстий будет:

$$\sum \theta = \theta$$

т.к. обход осуществляется один раз

Введем коэффициент:

(6)

Если  $k > 1$  – то предпочтение отдается параллельному методу,  $k < 1$  – последовательному.

### Расчетная часть методов обработки отверстий

Рассмотрим деталь типа «оправка», которая имеет 12 отверстий.

*020 Фрезерная с ЧПУ*

*Вертикально-фрезерный станок с ЧПУ 6Р13Ф3*

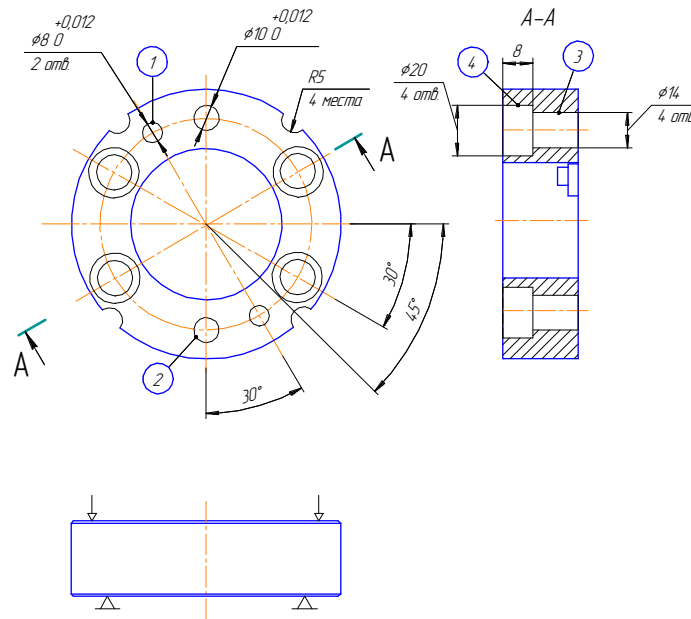


Рис.2. Фрагмент маршрута обработки детали

В результате вычислений получаем период для последовательного и параллельного метода:

$$\text{Вычислим коэффициент: } K = \frac{5,9}{2,5} = 2,36$$

$K > 1$ , из этого следует что более предпочтительный параллельный метод обработки.

При параллельной обработке цикл холостых ходов сокращается в почти 2,5 раза. Следовательно, обработка отверстий почти в 2,5 раза быстрее.

### Список литературы

[1]. *Безъязычный В.Ф.* Основы технологии машиностроения – учебник для вузов. –М.: Машиностроение, 2013. — 567 с.

[2]. *Гузев В.И.* Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением:



справочник /Гузеев В.И., Батуев В.А., Сурков И.В. под ред. В.И. Гузеева. - М.:Машиностроение, 2007.— Т.1, п.6. —155 с.

[3]. *Шандров Б.В.* Технические средства автоматизации—учебник для студентов высших учебных заведений / Б.В. Шандров, А.Д. Цудаков. – М.: Издательский центр «Академия» 2010. — 195 с.

**Телтова Елена Сергеевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: elenateltova@yandex.ru

**Научный руководитель: Бысов Сергей Александрович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: bysov.s@yandex.ru

И.В. Федоров

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЯ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

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

Уже много десятилетий большой популярностью для изготовления различных изделий пользуется обработка цветных металлов.

Цветные металлы — большая категория мягких и пластичных металлов. Сюда входят олово, цинк, медь, никель, алюминий, магний и т.п. Они представляют 75 % всех химических элементов периодической системы Д.И. Менделеева. В отличие от черных металлов, цветные имеют характерный оттенок и не содержат в своем составе железа и его сплавы.

Ковкость и немагнитность, теплопроводность и термостойкость, прочность и коррозионная устойчивость — главные характеристики цветных металлов. Благодаря этим свойствам они нашли применение в различных отраслях промышленности таких как: электроника, энергетика, авиационное и машиностроение, космонавтика и т.д. Большинство промышленных изделий изготавливается из алюминия, меди и цинка.

Технологии и современные методы производства изделий из цветных металлов позволяют ускорить сам процесс, а также повысить качество конечного продукта.

Выбор группы используемых в производстве цветных металлов зависит от желаемых свойств конечного изделия.

### **Алюминий и его сплавы**

Алюминий — лёгкий, пластичный металл, использование которого широко распространено в таких промышленных отраслях, как: автомобилестроение, строительство, авиация и космос, товары массового потребления, транспорт, упаковка продукции.

Алюминиевые сплавы являются одним из самых распространённых конструктивных материалов в различных отраслях производства. Из него изготавливают различные изделия, начиная с домашней утвари, заканчивая фюзеляжами космических аппаратов. Обработка резанием является неотъемлемой частью любого технологического процесса создания изделия из алюминия.

### **Механическая обработка**

Токарная обработка, фрезерование, строгание, сверление и все подобные методы являются процессами механической обработки. Алюминий и его сплавы достаточно просто обрабатываются резанием. Однако от вида сплава, от его физических и химических свойств, характеристика обрабатываемости будет меняться.

Термин обрабатываемость включает все критерии, которые имеют отношение к процессу механической обработки:

- износ режущего инструмента;

- необходимая сила резания;
- форма стружки;
- качество поверхности после механической обработки.

Обрабатываемость резанием, как свойство материала, невозможно определить одним характерным параметром. Она является комплексным технологическим термином. Обрабатываемость зависит от: физических и химических свойств материала; производственного процесса, который применялся при изготовлении изделия; кинематического взаимодействия инструмента и детали в процессе обработки.

Таким образом, термин «обрабатываемость» должен определяться отдельно для каждого отдельного процесса резания (токарной обработки, сверления и т.д.).

### **Форма стружки**

Форма стружки является важным критерием механической обработке алюминия. Обычно стараются получить короткую цилиндрически свитую стружку, спирально свитую стружку или просто спиральную стружку.

Так чистый алюминий и мягкие его сплавы дают очень длинную стружку, для которой приходится принимать специальные меры, например, использовать стружколоматель. А вот высокопрочные алюминиевые сплавы, такие как AlMg5, AlMgSi1, не вызывают таких проблем. Так же доэвтектические литейные алюминиевые сплавы AlSi8Cu3, AlSi10Mg дают короткую, кольцевую или спиральную стружку.

На образование стружки также влияют геометрия режущего клина инструмента, при уменьшении переднего угла при обработке сплавов стружка образуется более короткой, за счет ее сжатия.

### **Качество обрабатываемой поверхности**

Оно зависит от нескольких параметров:

1. Теоретическая высота гребешка микронеровностей - теоретическое значение определяемое на основе движения инструмента и детали.
2. Характер поведения материала при его разделении (особенности микроструктуры).
3. Внешние факторы (острота режущих кромок, виброустойчивость системы и другое).

Для алюминия и его сплавов соотношение этих параметров складываются в определенную закономерность - чем выше твердость и прочность сплава алюминия, тем более высокое качество поверхности мы можем получить (за исключением литейных сплавов, чья шероховатость зависит от микроструктуры сплава).

### **Скорость резания**

Скорость резания является важным параметром механической обработки, который оказывает влияние на качество поверхности. Обычно величина шероховатости является обратно пропорциональной скорости резания. При низких скоростях резания шероховатость поверхности очень резко возрастает из-за повышенного налипания на режущей кромке. При ме-

ханической обработке большей части цветных металлов области низких скоростей резания, как правило, избегают.

Так скорость резания влияющая на шероховатость обработанной поверхности чистого алюминия разделяет качество механической обработки на 4 секции(рис.1).

- 1 секция – Качество поверхности неудовлетворительное из-за образования нароста, материал не режется, а разрывается.
- 2 секция – Шероховатость уменьшается с увеличением скорости резания.
- 3 секция – Увеличение влияния внешних факторов
- 4 секция – Стружка собирается на заготовки и приваривается к инструменту.



Рис.1 Налипание алюминия на режущую кромку при низкой скорости резания

### **Сравнительный анализ обрабатываемости алюминиевых сплавов по отношению к другим материалам**

Из-за малых усилий резания при обработке алюминия (30% от усилий при обработке стали) и его сплавы легче поддаются механической обработке, чем стали, чугуны, латуни или бронзы. Так при одинаковых параметрах резания скорость резания алюминия превышает в три раза скорость резания бронзы и в 5 скорость резания сталей.

Хотя алюминия и его сплавы обрабатываются легче, чем стали, возникают трудности при достижении точности и экономичности производства, которые необходимо учитывать. В основном эти трудности: налипание стружки, длина и форма стружки и износ инструмента.

При обработке алюминия необходимо учитывать параметры, и критерии резания, так же есть частные проблемы при обработки определенных сплавов.

Данные закономерности справедливы к большинству механически обрабатываемых сплавов алюминия: чем больше скорость резания, тем ниже шероховатость; чем больше процент кремния в сплаве алюминия, тем быстрее инструмент будет изнашиваться; чем пластичнее сплав, тем стружка будет длиннее; чем больше передний угол режущего инструмента, тем стружка меньше.

### Список литературы

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

[2] Альтман М.Б. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов. / М.Б. Альтман, И.П. Стромская М.: Металлургия, 1984. 128 с.

[3] Обработка цветных металлов [Электронный ресурс] //Promzin. URL: <https://promzn.ru/obrabotka-metalla/sovremennye-sposoby.html>

[4] Механическая обработка алюминия [Электронный ресурс] //АЛЮМИНИЕВЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОРТАЛ

URL: <http://aluminium-guide.ru/mexanicheskaya-obrabotka-alyuminiya/>

[5] Галевский Г.В., Руднев В.В. Производство цветных металлов: Учебное пособие // Издательство "ФЛИНТА" – 2017. – No2. – С. 135-141.

**Федоров Илья Витальевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: [ilya.fedorov208@gmail.com](mailto:ilya.fedorov208@gmail.com)

**Научный руководитель: Попков Вячеслав Михайлович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [slaviclinde@yandex.ru](mailto:slaviclinde@yandex.ru)

М.В.Куркин

## **КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

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

Отклонения формы и расположения поверхностей снижают эксплуатационные и технологические показатели изделия. Они существенно влияют на точность и трудоёмкость сборки и повышают объем пригоночных операций, снижают точность измерения размеров, влияют на точность базирования детали при изготовлении и контроле.

Отклонением формы называется наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до прилегающей, измеренное по нормали к прилегающей поверхности, в пределах нормируемого участка. При оценке отклонений расположения поверхностей исключаются из рассмотрения отклонения формы контролируемых поверхностей, а реальные поверхности заменяются прилегающими [1].

Точность формы отверстий оценивается отклонением от круглости только в поперечном сечении или отклонением от цилиндричности, которое одновременно характеризует отклонения формы в поперечном и продольном сечении отверстия.

При контроле точности расположения отверстий в корпусных деталях оцениваются отклонения соосности, параллельности осей, перпендикулярности оси относительно базовой плоскости, а также позиционное отклонение — расстояние между реальным расположением элемента и его расположением согласно чертежу.

Для проверки круглости исследуемой поверхности применяют специальные измерительные приборы — кругломеры, или более универсальные контрольно-измерительные машины. Для каждого сечения определяются координаты множества точек его контура, подбирается наименьшая прилегающая охватывающая окружность. Максимальное отклонение радиуса прилегающей окружности от контура сечения будет являться отклонением от круглости в исследуемом сечении [2]. На практике редко оценивают круглость цилиндрических поверхностей деталей в силу дороговизны и узкой специализации оборудования.

Для контроля точности расположения отверстий могут использоваться универсальные контрольно-измерительные машины [3], а также специальные измерительные средства — калибры.

Калибр — это деталь, сопрягаемая с исследуемой, и предназначенная для качественной оценки контролируемого параметра. Изделие считают годным, если калибр с ним соединяется по контролируемым поверхностям и негодным, если соединения не происходит [4]. Существуют калибры для

контроля допусков соосности, перпендикулярности, параллельности осей, а также позиционного допуска. Калибр проектируется в соответствии с СТ СЭВ 1314-78 индивидуально, в зависимости от требований по точности расположения поверхностей, предъявляемых к детали.

Требуется выбрать метод контроля и спроектировать приспособление для контроля точности расположения отверстия □ (17) (рис. 1) в детали «Корпус барабана».

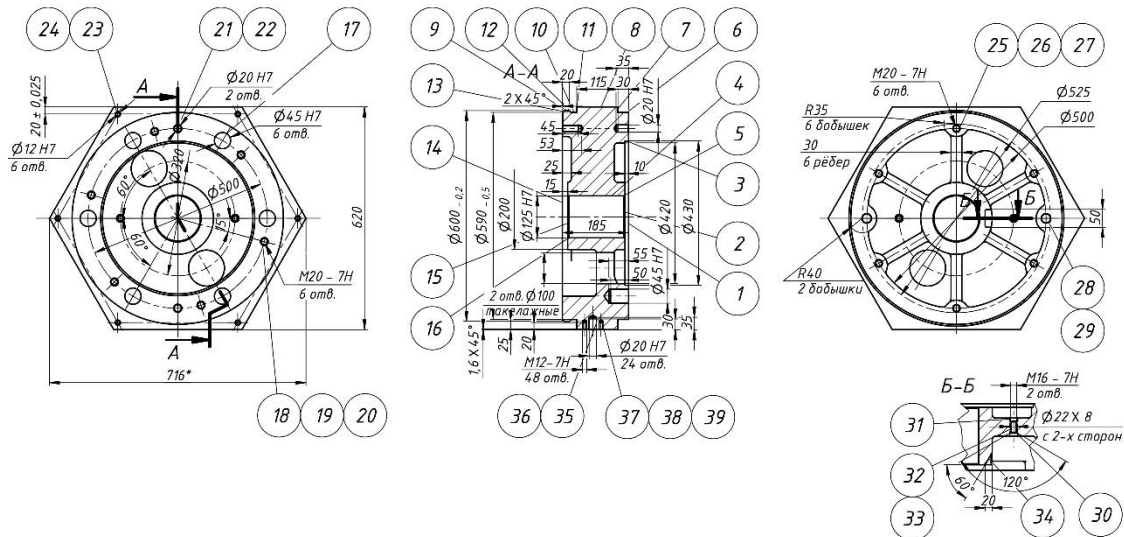


Рис. 1. Чертёж контролируемой детали

С учётом серийности производства и конфигурации контролируемых поверхностей выбран метод контроля — комплексный калибр для контроля позиционного допуска расположения отверстий. Спроектирован калибр. Он представляет собой диск с базовым элементом с установленными в нём пробками для контроля расположения системы отверстий относительно базового отверстия (рис. 2). По методике ГОСТа [5] рассчитаны предельные размеры пробок калибра.

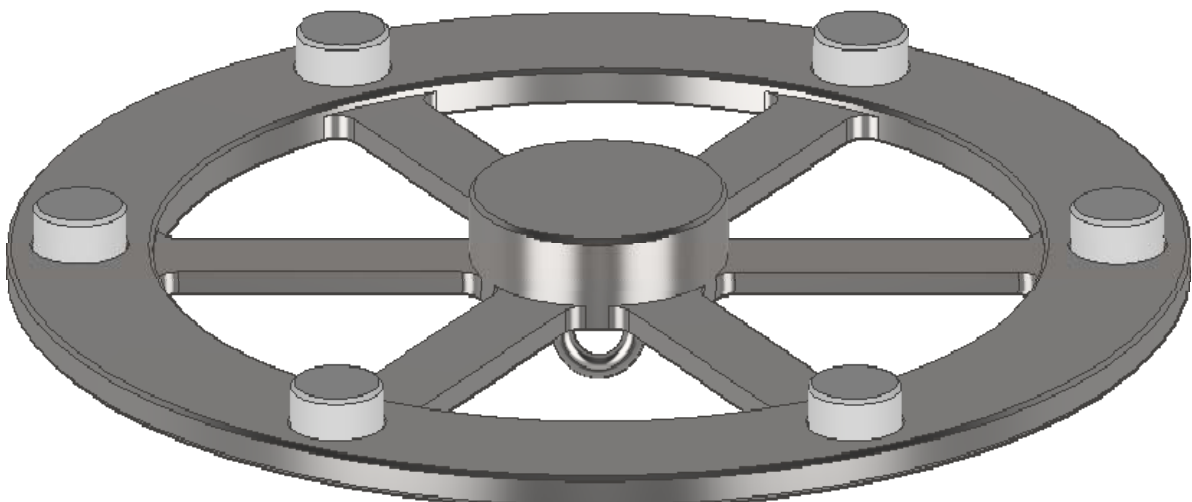


Рис.2. Калибр

### Список литературы

[1] *Николаев М. И.* Метрология, стандартизация, сертификация и управление качеством / 2-е изд., испр. — М.: Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016. — 116 с.: ил. — URL: <https://lib.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=429090> (дата обр. 22.03.2019). — Режим доступа.

[2] *Авдулов, А. Н.* Контроль и оценка круглости деталей машин / М.: Издательство стандартов, 1974. — 176 с.: ил.

[3] *Женатова, М. Д., Маркосян, Е. С.* Измерения на координатно-измерительных машинах // Проблемы современной науки и образования. Электрон. дан., 2014. № 2. С. 13—15. Режим доступа URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/297127> (дата обращения 20.03.2019).

[4] *Палей, М. А.* Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении: справочник. В 2-х т. Т2: Контроль деталей / М. А. Палей, В. С. Лукьянов, Б. А. Тайц. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство стандартов, 1989. — 263 с.: ил.

[5] *ГОСТ 16085-80* Калибры для контроля расположения поверхностей. Допуски.

**Куркин Михаил Владимирович** – студент КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана. E-mail: [mk@fall.su](mailto:mk@fall.su)

**Научный руководитель: Попков Вячеслав Михайлович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [slaviclinde@yandex.ru](mailto:slaviclinde@yandex.ru)



Д.И. Кузнецов

## **МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ**

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

Инструментальная углеродистая сталь — сталь с содержанием углерода от 0,7 % и выше. Эта сталь отличается высокой твердостью и прочностью (после окончательной термообработки).

Инструментальная сталь должна обладать высокой твердостью, износостойкостью, достаточной прочностью и вязкостью (для инструментов ударного действия).

Режущие кромки могут нагреваться до температуры 500...900°C, поэтому важным свойством является теплостойкость, т. е., способность сохранять высокую твердость и режущую способность при продолжительном нагреве (красностойкость).

Выбор материала режущего инструмента – важный фактор при планировании операции металлообработки. Базовые знания о характеристиках каждого инструментального материала позволяют сделать правильный выбор для любой области применения.

Идеальный инструментальный материал должен быть:

- твердым, для обеспечения стойкости к износу по задней поверхности и деформации;
- прочным, во избежание поломки режущей кромки;
- химически инертным к материалу заготовки;
- химически устойчивым к окислению и диффузии;
- устойчивым к резким изменениям температуры.

В настоящее время для производства режущих инструментов широко используются твердые сплавы. Они состоят из карбидов вольфрама, титана, тантала, цементированных небольшим количеством кобальта. Карбиды вольфрама, титана и тантала обладают высокой твердостью, износостойкостью. Твердосплавные инструменты пригодны для обработки закаленных сталей и таких неметаллических материалов, как стекло, фарфор и т. п.

Также применяются абразивные материалы. Режущими элементами этих инструментов служат твердые и теплоустойчивые зерна абразивного материала с острыми кромками. Наиболее распространенными искусственными абразивными материалами являются электрокорунды, карбиды кремния и бора. К искусственным абразивным материалам относятся также полировально-доводочные порошки – оксиды хрома и железа. Особую группу искусственных абразивных материалов составляют синтетические алмазы и кубический нитрид бора.

Для обработки материалов повышенной твердости наряду с композициями на основе кубического нитрида бора (CBN) все большее применение получают инструменты, изготовленные из режущей керамики, особенно керамики смешанного типа, к которой (в соответствии со стандартами ISO 513) относят оксидную режущую керамику, легированную карбидом титана  $Al_2O_3-TiC$ .

В подавляющем большинстве случаев химико-термическую обработку проводят с целью обогащения поверхностных слоев изделий определенными элементами. В результате ХТО формируется диффузионный слой, т.е. изменяется химический состав, фазовый состав, структура и свойства поверхностных слоев. Изменение химического состава обуславливает изменения структуры и свойств диффузионного слоя

Вакуумная цементация и нитроцементация гарантируют высокие эксплуатационные свойства диффузионных слоев, оптимальное соотношение цены и качества обработки. При этом известные преимущества имеет совместное насыщение поверхности углеродом и азотом.

Для любой стали можно разработать технологию термической или химико-термической обработки в вакууме, с тем, чтобы все потенциальные возможности данного материала раскрылись в полном объеме, при этом оптимальный вариант технологического режима обработки определяют экспериментальным или расчетным методом. Применение математического моделирования дает возможность максимально интенсифицировать проектирование технологических режимов.

Исследования процесса химико-термической обработки с использованием термоциклирования показывают, что при терморегулировании при продолжительности каждого цикла до 2-х часов не происходит роста зерна ни в диффузионном слое, ни в сердцевине цементуемых сталей. Поэтому термоциклическая обработка позволяет совместить цементацию (или нитроцементацию) деталей из любых сталей с нагревом под закалку, что делает такую обработку весьма экономичной, так как позволяет сократить время обработки деталей и расход энергии на их нагрев.

Таким образом, совмещение химико-термической обработки стали с термоциклированием позволяет сократить время обработки, получить большее насыщение диффузионных слоев углеродом и азотом по сравнению с изотермическими процессами, а также производить закалку цементованных изделий непосредственно с цементационного нагрева.

### Список литературы

[1] *Богодухов С.И.* Методы повышения эксплуатационных свойств твердосплавного режущего инструмента / С.И. Богодухов, В.С. Гарипов, Е.В. Калмыков, Б.М. Шейнин ; ГОУ ОГУ. – Оренбург, 2004. – 27 с. Деп. в ВИНТИ 11.10.04 №1583\_V2004.

[2] *Панов В.С.* Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них / В.С. Панов, А.М. Чувилин. М.: МИСИС, 2001. 428 с.

[3] *Осколкова Т.Н.* О термической обработке карбидо-вольфрамовых твердых сплавов. Вестн. гор.металлург, секции РАЕН. Отделение металлургии. 2008, №22 — 316 с.

[4] *Федюкин В.К., Смагоринский М.Е.* Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.

[5] *Румянцева К.Е.* Термическая и химико-термическая обработка [Электронный ресурс] : учебное пособие / К.Е. Румянцева. — Электрон. дан. — Иваново : ИГХТУ, 2012. — 103 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/4540>.

[6] *Елагина О.Ю.* Технологические методы повышения износостойкости деталей машин : учебное пособие / О.Ю. Елагина. - Москва : Логос, 2009. - 488 с. - (Новая университетская библиотека). - ISBN 978-5-98704-450-6 ; То же [Электронный ресурс]. -

URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=84921>

**Кузнецов Даниил Игоревич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: MrSkynet09@yandex.ru.

**Научный руководитель: Малышев Евгений Николаевич.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Mk.kf@yandex.ru

А.В. Харитоненко, А.Ю. Крылов, Т.А. Журавлева

## **НОРМИРОВАНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

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

Одним из основных критериев эффективного функционирования машиностроительного предприятия является налаженная работа инструментальных цехов. Инструментальное производство решает широкий круг производственных задач [1] таких, как изготовление режущего, мерительного и вспомогательного инструмента, штампов [2], пресс-форм и другой технологической оснастки [3].

В современных экономических условиях требования, предъявляемые к качеству оснастки постоянно повышаются при том, что затраты на ее производство необходимо минимизировать для снижения стоимости производимого изделия в целом, и, как следствие, обеспечения конкурентоспособности продукции. Основная сложность реализации этой концепции заключается в том, что в отличие от серийного и массового производств инструментальное характеризуется широким разнообразием номенклатуры оснастки и ее уникальностью. Следует отметить, что стоимость технологической оснастки зачастую является высокой и возникает необходимость определения ее стоимости еще до начала ее проектирования. Для решения этой задачи необходимо обладать следующими данными: прогнозной трудоемкостью ее конструирования и изготовления, затраты на инструменты и материалы, а также объем затрачиваемых энергоресурсов. Особенно остро такой вопрос возникает при оценке стоимости изготовления основных оригинальных формообразующих элементов деталей штампов, пресс-форм и сложной технологической оснастки в отличие от производства стандартизованных инструментов и оснастки.

Основные сложности возникают при определении прогнозной трудоемкости изготовления технологической оснастки из-за отсутствия типовых технологических процессов, и разработка их нецелесообразна, поэтому практически всегда их заменяют маршрутными технологиями [4, 5], которые могут быть существенно изменены в процессе изготовления деталей, что не позволяет с высокой точностью произвести нормирование, а предполагает использование укрупненных методов нормирования и применение специальных методик.

В настоящее время наибольшее распространение получили методы нормирования, основанные на расчетных аналитических, регрессионных и расчетно-статистических моделях [6].

Использование аналитических моделей предполагает представление технологического процесса изготовления деталей в виде системы, где каждая деталь которой может быть разделена на отдельные подсистемы, представляющие собой ее части, определяемые совокупностью поверхностей, имеющих характерное функциональное назначение. К тому же, каждая поверхность предполагает наличие индивидуального технологического маршрута обработки и в определении трудоемкости учитываются наиболее значимые для определения штучного времени факторы.

Применение регрессионных моделей основано на использовании данных о трудоемкости изготовления деталей, полученной в результате анализа типовых технологических процессов и расчетных норм времени с использованием статистических материалов. Трудоемкость изделия рассматривается как статистически определяемая функция, зависящая от ее конструктивной сложности.

Расчетно-статистические модели предполагают укрупненную оценку трудоемкости с использованием обобщенного показателя сложности, связанного с ней корреляционной зависимостью, что позволяет использовать его в различных производственных условиях. Коэффициенты, составляющие структуру показателя, определяются как с помощью аналитически сформированных, так и статистически определенных функций. Основанный на исследовании этого показателя метод, назван методом оценки сложности.

Каждый из приведенных выше методов не является универсальным и имеет как свои преимущества, так и недостатки. Использование каждого метода на различных инструментальных предприятиях будет давать различные результаты, зависящие от номенклатуры выпускаемой продукции, её объемов, используемого оборудования и технологий, масштабом самого предприятия, опыта и ряда других факторов. Причем, следует отметить, что самой важной особенностью рассмотренных методов является то, что с их помощью можно получить лишь "временные" затраты на производство технологической оснастки, не имея при этом абсолютно никаких материальных эквивалентов полученным расчётам. Иными словами, получаем количество нормо-часов, необходимых для производства оснастки, которое, как было отмечено, на каждом предприятии будет индивидуальное, присущее конкретному предприятию, и может значительно отличаться от расчетов на других предприятиях, а при переводе их в материальные затраты получим ещё более разнящиеся между собой результаты т.к. стоимость нормо-часа на различных инструментальных предприятиях может отличаться в несколько раз.

На настоящий момент среди потребителей технологической оснастки в основном существует степень оценки соответствия реальной стоимости технологической оснастки и ее рыночной стоимости лишь на уровне – «высокая стоимость», «низкая стоимость» и «приемлемая стоимость». Поэтому, в рамках одного предприятия или группы предприятий, и даже инструментальной отрасли актуален вопрос создания универсальной адапти-

рованной методики нормирования изготовления технологической оснастки в инструментальном производстве в виде рабочих, методических или справочных материалов и рекомендаций, позволяющих с достаточной точностью определять стоимость оснастки с учетом ее технологических и конструктивных особенностей, а также с учетом материальных и прогнозируемых трудовых затрат [7] на ее изготовление.

### Список литературы

[1] ГОСТ 31.0000.01-90 Межгосударственный стандарт. Технологическая оснастка. Основные положения. М.: Издательство стандартов, 1991.

[2] ГОСТ 15830-84 Государственный стандарт СОЮЗА ССР. Обработка металлов давлением. Штампы. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1984.

[3] ГОСТ 3.1109-82 Межгосударственный стандарт. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. М.: Стандартинформ, 2012

[4] Справочник нормировщика под ред. Ахумова А. В. — Л.:Машиностроение, 1986.— 458 с.

[5] Технологичность конструкции изделия: Справочник / Амиров Ю.Д., Алферова Т.К., Волков П.Н. и др.; под общей ред. Амирова Ю.Д. - 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1990. — 768с.

[6] Домбрачев А. Н. Разработка автоматизированной системы определения сложности и прогнозной трудоемкости изготовления деталей инструментального производства. Дис. канд. техн. наук. Ижевск: ИжГТУ, 2005. 128 с

[7] Генкин Б. М. Организация, нормирование и оплата труда на промышленных предприятиях: Учебник для вузов. - М.: Издательство НОР-МА, 2003. - 400с.

**Харитоненко Антон Владимирович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ant40192498@yandex.ru

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

**Журавлева Татьяна Александровна** – к.т.н., доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: 1m-kf.mgtu@inbox.ru

**Научный руководитель: Малышев Александр Николаевич.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: amalyshev@mpk-kaluga.ru

И.Р. Насевич, О.А. Прокофьева

## **ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ПРИНТЕРОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

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

В специальной литературе, на протяжении более полувека, описывая перспективы развития машиностроения, показывают, что технологии будущего будут использовать процессы «выращивания» деталей. Одной из первых таких технологий стала порошковая металлургия. Она позволила как получать новые материалы, так и придавать известным материалам дополнительные свойства. Подобного рода технологии называют аддитивными, т.е. они позволяют изготавливать любое изделие послойно на основе компьютерной 3D-модели [6].

На сегодняшний день применение аддитивных технологий в машиностроении растет в геометрической прогрессии. Применение 3D-принтеров для печати деталей машин в ряде областей успешно заменяет традиционное резание. 3D-принтер представляет собой аналог станка с числовым программным управлением, послойно «выращивающий» детали.

С помощью 3D-принтеров можно получить корпусные детали сложных сечений. Такие технологии успешно применяются в литейном производстве для печати литейных форм. А также существует много разновидностей материалов, из которых можно создать изделие [1].

В производстве 3D печать часто применяется для создания различных образцов или макетов продукции, комплектующих, оружия и прочее.

Для производства деталей на 3D-принтере применяются такие материалы, как ABS-пластик<sup>1</sup>, ПЛА-пластик<sup>2</sup>, PET-пластик<sup>3</sup>, Нейлон<sup>4</sup>, Бетон, Металл и другие [1].

3D печать имеет широкое распространение в строительстве и производстве.

В строительстве 3D печать достигла такого уровня, что можно строить современные многоэтажные дома. В качестве материала используется специальная бетонная смесь. Затрата времени на возведения такого дома существенно меньше, чем при традиционном строительстве и в будущем намного ускорится и упростится процесс возведения зданий [2].

---

<sup>1</sup>ABS-пластик - ударопрочная техническая термопластическая смола

<sup>2</sup> ПЛА-пластик - это полностью биоразлагаемый, безопасный, экологически чистый продукт, полученный из кукурузы или сахарной свеклы

<sup>3</sup> PET-пластик - применяется для изготовления деталей механизмов, корпусов, изделий медицинского назначения, тары

<sup>4</sup>Нейлон - синтетическая ткань

Например, КомпанияHuaShangTengдаза45 дней возвела особняк с общей площадью 400 квадратных метров (рис.1). Было использовано 20 тонн бетонной смеси для возведения несущих конструкций, из которых сделали опалубку толщиной 250 мм. Было доказано, что здание способно выдерживать подземные толчки силой восемь баллов по шкале Рихтера [3].



Рис. 1. Напечатанный на 3D принтере дом

В производстве заготовок для машиностроения применяются промышленные 3D-принтеры, которые используют специальные порошки. Их можно разделить на 2 группы: к первой относятся модели, использующие более пластичные металлы, а ко второй - металлические порошки со специальным клеящим веществом. После термической обработки порошок приобретает высокую прочность. При этом интервал допуска на деталь составляет 0,025 мм. Жаростойкость очень высокая, что позволяет использовать полученные детали в различных отраслях. Если деталь изнашивается, либо при производстве образуется брак, то ее можно переработать во вторичное производство. В технологии машиностроения часто применяют титан, нержавеющую сталь и алюминий [7-8].

В США был создан вертолет «Араче», напечатанный на 3D принтере. Производство такого вертолета по стандартной технологии стоит 35 миллионов долларов, а с помощью 3D печати гораздо дешевле и экономнее по времени [4].



Рис. 2. Вертолет «Араче» сделанный на 3D принтере

На авиашоу, проходящем в Дубае, крупнейшая авиакомпания «AuroraFlightSciences» и лидер в области 3D-печати «Stratasys» представили первый в мире беспилотник с реактивным двигателем, напечатанным на 3D-принтере (Рис-3). Для печати была использована технология «FusedDepositionModeling», которая позволила создавать большие детали с



относительно маленьким весом. Трехметровый размах крыла при массе дрона в 15 килограмм, позволяет развить скорость 240 километров в час. Фюзеляж сделан из нейлона, а части двигателя из жаропрочного сплава. Восемьдесят процентов всех напечатанных деталей было использовано в конструкции беспилотника, что позволило увеличить производительность в два раза и сократить время на сборку. На изготовление отдельных частей ушло несколько дней. На производство и сборку первой модели ушел один месяц и теперь, автоматизировав процесс, разработчики утверждают, что потребуется всего лишь две недели[5].



Рис. 3. Беспилотный летательный аппарат, напечатанный на 3D-принтере

Вывод: В силу многократной экономии, у данной технологии хорошие перспективы к повсеместному внедрению. В будущем, при понижении стоимости самих принтеров, они получат широкое распространение в быту и на производстве. Стоимость деталей понизится из-за удешевления материалов. Например, в медицине, данная технология будет чаще применяться в развитии протезов и имплантатов, подобных строению тела человека, а также в выращивании искусственных органов и клеток.

### Список литературы

[1]. *Виндигов С.* Материалы для 3D-принтера: обзор, характеристики и применение [Электронный ресурс] URL: <https://www.syl.ru/article/346104/materialyi-dlya-d-printera-obzor-harakteristiki-i-primeneniye>(дата обращения 13.01.2018)

[2]. *Лунева Д., Кожевникова Е., Калошина С.* Применение 3d-печати в строительстве и перспективы ее развития [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-3d-pechati-v-stroitelstve-i-perspektivy-ee-razvitiya>(дата обращения 13.01.2018)

[3]. *Дружинин С.* В Пекине с помощью 3D-печати построили виллу площадью 400 м<sup>2</sup>[Электронный ресурс] URL: <http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/in-beijing-there-was-a-3dprinted-villa-of-400-m2-/#comments> (дата обращения 13.01.2018)

[4]. *Ведмеденко И.* Совершил первый полет новый вертолет Apache [Электронный ресурс] URL: <https://naked-science.ru/article/tech/sovershil-pervyy-polet-novyy-vertolet> (дата обращения 13.01.2018)

[5]. *Вудсайнд П.* AuroraFlightSciences выпускает "Орион" UAS [Электронный ресурс] URL: [http://www.auroa.aero/wp-content/uploads/2017/10/apr-266\\_orion-rollout-press-release.pdf](http://www.auroa.aero/wp-content/uploads/2017/10/apr-266_orion-rollout-press-release.pdf) (дата обращения 13.01.2018)

[6]. *Михайлов Ю.* Перспективы использования аддитивных [Электронный ресурс] [http://3d.globatek.ru/world3d/additive\\_tech/](http://3d.globatek.ru/world3d/additive_tech/) (дата обращения 13.01.2018)

[7]. *Меренков К.* Пять особенностей металлических порошков для 3D-печати [Электронный ресурс] URL:<http://blog.iqb-tech.ru/metals-for-3d-printing/>(дата обращения 13.01.2018)

[8]. *KalmykovV.V., MusokhranovM.V., LogutenkovaE.V., MalyshevE.N., GorbunovA.K.* Generation of surface energy in metals using row-by-row microdeformation // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 24. С. 15621-15626

**Насевич Илья Русланович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: [nasevich98@mail.ru](mailto:nasevich98@mail.ru)

**Прокофьева Ольга Андреевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: [prokofevaolya2016@yandex.ru](mailto:prokofevaolya2016@yandex.ru)

**Научный руководитель: Калмыков Вадим Владимирович.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [kalmykovvv@bmstu.ru](mailto:kalmykovvv@bmstu.ru)

Д.А. Корневский

## ОБРАБОТКА ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА

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

Обработка отверстий занимает значимое место в машиностроительном производстве и по объему не уступает процессам обработки наружных поверхностей. Кроме того, обработка точных, ответственных отверстий относится к числу наиболее трудоемких и сложных процессов, что объясняется более тяжелыми условиями протекания процесса, меньшей жесткостью режущих инструментов. При этом необходимо обеспечивать точность положения оси обрабатываемого отверстия относительно наружной поверхности, а не только точность размера и формы отверстия.

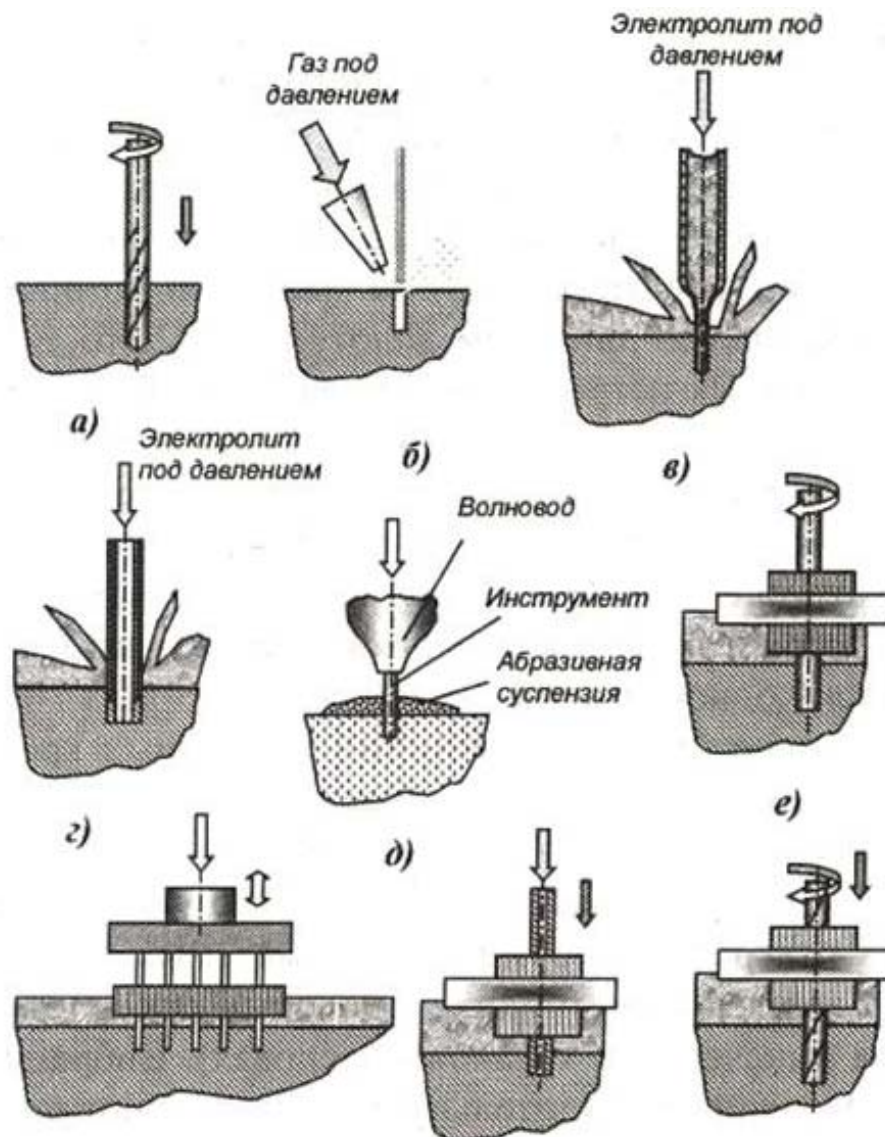


Рис.1. Методы получения отверстий малого диаметра

Отверстия малого диаметра получают различными способами (рис.1): *a* – сверление, *б* – лазерное сверление, *в* – электрохимическая струйная обработка, *г* – электрохимическая обработка проводящим электродом, *д* – ультразвуковая обработка, *е* – электроэрозионная обработка вращающимся электродом, *ж* – электроэрозионная обработка сборным электродом, *з* – электроэрозионная обработка полым электродом, *и* – электроэрозионная обработка шнековым электродом.

При изготовлении точных ответственных деталей (роторы и валы турбин, цилиндры, плунжерные пары и др.) большой трудностью является обработка глубоких отверстий. Глубина отверстия характеризуется отношением  $l/d \geq 5$ , где *l* – длина отверстия, мм, а *d* – его диаметр, мм. Точные глубокие отверстия обрабатываются за несколько операций, которые подразделяются на две группы: черновые операции (операции сверления и чернового растачивания, основной задачей которых является обеспечение требований по расположению оси отверстия и ее прямолинейности), и операции чистовые и отделочные (растачивание, шлифование, хонингование, основной задачей которых является обеспечение требуемой точности диаметральных размеров, формы и шероховатости поверхности).

К основным особенностям способов глубокого сверления и чернового растачивания можно отнести:

- 1) принудительный, постоянный и бесперебойный отвод стружки из отверстия посредством СОТС;
- 2) базирование рабочей части инструмента во время работы по поверхности обработанной части отверстия;
- 3) очень невысокая жесткость технологической системы.

Глубокое сверление в зависимости от схемы снятия припуска принято подразделять на две разновидности: сплошное и кольцевое.

В зависимости от способа отвода стружки различают следующие разновидности глубокого сверления: 1) с внутренним отводом стружки – обработка, при которой применяется наружный подвод СОТС; 2) глубокое сверление с наружным отводом стружки, при котором используют внутренний подвод СОТС. Так же можно выделить 3 разновидности сверления в зависимости от кинематической схемы:

- 1) вращение заготовки и поступательное движение инструмента;
- 2) заготовка вращается, а инструменту одновременно сообщается вращение (встречное) и поступательное движение подачи;
- 3) инструменту одновременно сообщается вращение и поступательное движение подачи. Заготовка же остается неподвижной.

На черновых операциях (глубокого сверления и чернового растачивания) образуются различные дефекты, проявляющиеся лишь при обработке глубоких отверстий. Это такие дефекты, как увод и непрямолинейность оси отверстия, огранка отверстия и волнистость профиля продольного сечения.

При обработке глубоких отверстий малых диаметров применяются следующие способы управления уводом и непрямолинейностью оси:

1) наложение на инструмент вынужденных поперечных колебаний с частотой вращения заготовки;

2) наложение на заготовку вынужденных поперечных колебаний с частотой вращения заготовки;

3) тщательная балансировка заготовки с установкой люнетов, поддерживающих заготовку, и исключение поперечных колебаний заготовки с частотой ее вращения.

При сверлении с вращением заготовки и инструмента целесообразно применять режимы резания с большим отношением частоты вращения инструмента к частоте вращения заготовки.

[1]. ~~Безъязычный В.Ф., Сидоров В.В., Корневский Ю.К., Шилков Е.В.~~ Технологические процессы механической и физико-химической обработки в машиностроении: Учебное пособие. – 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2017. – 432с.

[2]. Должиков В.П. Разработка технологических процессов механообработки в мелкосерийном производстве: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 324 с

[3]. Вивденко Ю.Н. Технологические системы производства деталей наукоемкой техники: Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 2006. – 559 с.

**Корневский Денис Александрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: korenevsky.den@yandex.ru

**Научный руководитель: Зенкин Николай Васильевич.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

Р.Ю. Кривов

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

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

Оптимизация технологических процессов и режимов обработки резанием основывается на построении математических моделей. Процесс оптимизации основывается на установлении критерия оптимизации (целевой функции) и системы ограничений, действующие в процессе обработки [1].

Ниже представлена формула объемной производительности электроэрозионной обработки (ЭЭО) [2].

$$Q = \frac{k \cdot A_u}{q \cdot \tau_u}, \quad (1)$$

где

$$A_u = U \cdot I_{cp} \cdot \tau_u, \quad (2)$$

$$q = \frac{\tau_u + \tau_n}{\tau_u}. \quad (3)$$

Подставим выражения (2) и (3) в (1) и получим вид:

$$Q = \frac{k \cdot U \cdot I_{cp} \cdot \tau_u}{q \cdot \frac{\tau_u + \tau_n}{\tau_u}} = \frac{U \cdot I_{cp} \cdot \tau_u \cdot k}{T}, \quad (4)$$

где  $q$  – скважность;  $\tau_u$  – длительность импульса;  $A_u$  – энергия импульса;  $k$  – коэффициент, зависящий от вида и состояния рабочей среды;  $U$  – среднее значение напряжения;  $I_{cp}$  – среднее значение силы тока;  $\tau_n$  – длительность перерыва;  $T$  – период.

Так как выражение (4) нелинейно, для приведения его к линейному виду используем логарифмирование.

$$\ln Q = \ln \frac{U \cdot I_{cp} \cdot \tau_u \cdot k}{T}. \quad (5)$$

$$f_0 = \ln I_{cp} + \ln \tau_u + \ln \frac{U \cdot k}{T}. \quad (6)$$

Введем обозначения:

$$x_1 = \ln I_{cp}. \quad (7)$$

$$x_2 = \ln \tau_u. \quad (8)$$

$$b_1 = \ln \frac{U \cdot k}{T}. \quad (9)$$

В окончательном виде целевая функция принимает вид:

$$f_0 = x_1 + x_2 + b_1. \quad (10)$$

В процессе электроэрозии действует ряд ограничений ограничениями являются: сила тока, длительность импульса и минимальное значение шероховатости.

$x_1$

Ограничение 1. зависит от площади обработки. При площади 650 мм<sup>2</sup> значение силы тока  $I_{cp} = 21 - 52(A)$ . Тогда

$$x_1 \leq \ln 21 \leq 3,05, \quad (11)$$

$$x_2 \leq \ln 52 \leq 3,95. \quad (12)$$

Ограничение 2. Оптимально допустимое значение длительности импульса  $\tau_u = 150 - 210$  (мкс).

$$x_3 \leq \ln 150 \leq 4,7, \quad (13)$$

$$x_4 \leq \ln 210 \leq 5,35. \quad (14)$$

Ограничение 3. Значение шероховатости не должно быть больше  $R_z \leq 12,5$ .

$$R_z = \frac{\beta^2}{3} \cdot k_4 \cdot \sqrt[3]{A_u}, \quad (15)$$

$$12,5 = \frac{1,5^2}{3} \cdot 5,5 \cdot \sqrt[3]{5,5 \cdot 22 \cdot I_{cp} \cdot \tau_u}, \quad (16)$$

$$I_{cp}^{0,33} \cdot \tau_u^{0,33} = \ln 1,2. \quad (17)$$

После приведения к линейному виду выражение (2) получим:

$$0,33x_1 + 0,33x_2 = 0,18. \quad (18)$$

Построим график:

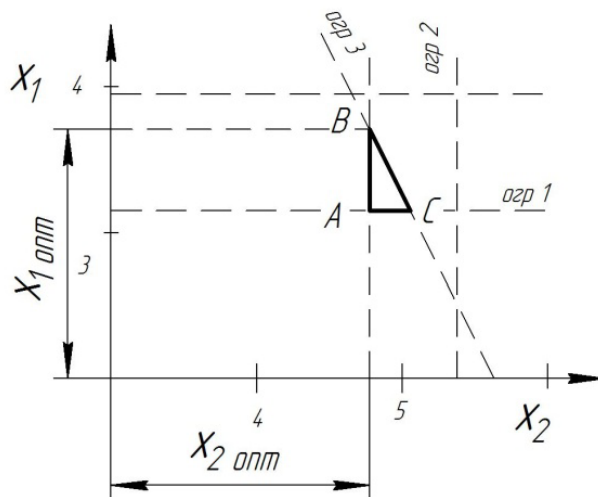


Рис. 1. Графическое построение математической модели

Граничные прямые, пересекаясь, образуют многоугольник решений  $ABC$  (рис.1), внутри которого любая точка удовлетворяет всем без исключений неравенствам. Координаты точки  $B$  являются оптимальными значениями  $x_{1opt}$  и  $x_{2opt}$ , они определяются графически с учетом масштаба  $x_{1opt} = 3,66$  и  $x_{2opt} = 4,7$ .

Численные значения вычисляются по следующим зависимостям:

$$x_{1opt} = e^{3,66} = 38,9(A), \quad (19)$$

$$x_{2opt} = e^{4,7} = 150(\text{мкс}). \quad (20)$$

### Список литературы

- [1]. *Аверченков В.И.* Металлорежущие станки и инструменты / В.И. Аверченков. – М.: Машиностроение, 1988.-192 с.
- [2]. *Левинсон Е. М.* Электроэрозионная обработка: Справочное пособие по электротехнологии / Е.М. Левинсон, В. С. Лев. – Л.: Лениздат, 1972. – 326 с.
- [3]. *Мешков А.Н., Кононов А.И., Скворцов А.Ф.* Тиратронный генератор с самосжатием импульсов в волновой системе // В сборнике: Итоги научных исследований. Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2015. С. 12-14.
- [4]. *Немилов, Е. Ф.* Электроэрозионная обработка материалов / Е. Ф. Немилов. – Д.: Машиностроение, 1983, - 160с.
- [5]. *Мальшев Е.Н., Зенкин Н.В., Мусохранов М.В., Калмыков В.В.* Нормирование затрат времени на выполнение технологической операции // Методические указания / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Калуга, 2015.
- [6]. *Фотеев Н.К.* Технология электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1980, 184 с.



**Кривов Роман Юрьевич** – инженер-технолог. E-mail: roma-  
gf@yandex.ru

**Научный руководитель: Попков Вячеслав Михайлович.** КФ  
МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

А.А. Бурмистров

## **ОСОБЕННОСТИ И ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ХОЛОДНОЙ ОСАДКИ НА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕССАХ**

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

Производство деталей холодной объемной штамповкой в зависимости от типа оборудования осуществляется двумя основными способами: одно- и многопозиционной штамповкой на прессах, штамповкой на одно- и многопозиционных прессах-автоматах. Для однопозиционной штамповки применяют механические и гидравлические прессы. Для штамповки деталей относительно небольшой высоты ( $H/D \ll 0,5$ ), т. е. для плоскостной и объемной калибровки, открытой и закрытой формовки и других операций применяют чеканочные прессы [1].

Наиболее универсальными и маневренными по номенклатуре штампуемых деталей, размерам в плане и по длине, особенностям нагрузочных графиков по длине хода являются гидравлические прессы, характеризующиеся сравнительно низкими скоростями деформирования. Значительным преимуществом гидравлического пресса является независимость допустимого усилия от положения пуансона [2]. Это позволяет применять гидравлические прессы для выдавливания удлиненных деталей. Характерным также является жесткость прессы, простота наладки штампа, надежность и простота ограничения хода ползуна по заданным величинам допустимых усилий и высотных размеров прессостатка (перемычки и т. п.).

К недостаткам гидравлических прессов можно отнести невысокую производительность и низкую точность поковок. Большой вклад в изучение вопросов повышения точности высотных и диаметральных поковок, полученных осадкой и выдавливанием, внесли Антонюк Ф.И. в работе и Вяткин А.Г. в своих диссертациях [3], которые имеют большую ценность в области обработки материалов давлением. Однако, из-за большого количества факторов, влияющих на точность холодной объемной штамповки и видов заготовок, получаемых различными операциями ХОШ, вопросы повышения точности поковок остаются актуальными и продолжают изучаться в настоящее время.

Осадкой называют формоизменяющую операцию, в процессе которой производится уменьшение высоты заготовки при увеличении площади ее поперечного сечения [4]. Осадку применяют, когда необходимо: получить поковку или участок с поперечным сечением большим, чем сечение заготовки или слитка; увеличить уковку; уменьшить анизотропию механических свойств и улучшить эти свойства в осевом и поперечных направлениях поковки; более равномерно распределить и измельчить карбиды в ста-

лях карбидного класса; выровнять торцовые поверхности заготовки и увеличить поперечное сечение перед прошивкой.

Характерным параметром холодной осадки является степень деформации (%):

где — соответственно исходная и конечная высоты заготовки.

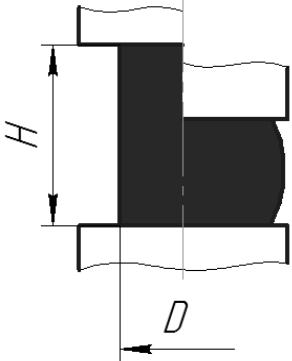
В зависимости от степени деформации выделяют калибровку ( $\epsilon < 0,1 \dots 0,15$ ) и собственно осадку ( $\epsilon > 0,1 \dots 0,15$ ).

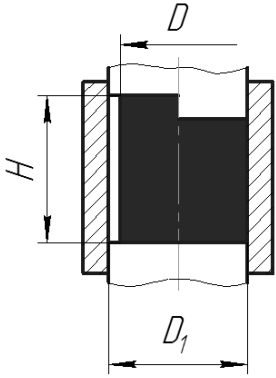
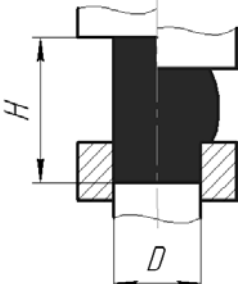
В обычных условиях осадки в результате неравномерности деформации заготовка приобретает бочкообразную форму. Повышению равномерности осадки способствуют: уменьшение трения на поверхности контакта металла с инструментом путем повышения качества его обработки и применения смазочных материалов (сухие древесные опилки, графит с машинным маслом); использование нагретых прокладок толщиной 15—20 мм между инструментом и торцами заготовки из низкоуглеродистой стали; применение плоских выточек для удержания смазочных материалов на торцах заготовки глубиной 1—3 мм при ширине 1—2 мм [5].

Исходя из кинематики относительного движения металла и инструмента, выделяют следующие схемы холодной осадки (табл. 1):

Таблица 1.

Классификация процессов осадки [6]

Наименование процесса. Схема процесса	Особенности формоизменения и технологическая характеристика	Назначение (область применения)
1. Осадка свободная (открытая) сплошного стержня 	Сжатие металла между плоскопараллельными элементами штампа. Сопровождается свободным радиальным истечением, заторможенным только контактным трением. Отсутствие жесткого направления элементов штампа вдоль оси заготовки и перпендикулярность торцов заготовки главной оси вызывают относительное смещение торцов, искривление волокна и боковой поверхности. $H/D < 2$ . Фасонное сечение по мере осадки стремится к кругу	Калибровка по высоте. Получение параллельных торцов заготовки (при низкой степени деформации). Уменьшение отношения $H/D$ . Плоскостная калибровка детали
2. Осадка закрытая сплошного стержня	При $H/D < 2$ открытая осадка до соприкосновения выпуклой части (бочки) боковой поверхности заготовки со стенками инструмента. Затем осуществляется закрытая осадка: сжатие металла между плоскопараллельными элементами штампа, сопровождаемое радиальным истечением в клино-	Калибровка по высоте и диаметру (поперечному сечению). Получение параллельных торцов, перпендикулярных основной оси заготовки. Уменьшение отношения $H/D$

	<p>вую щель по периметру. При <math>H/D &gt; 2</math> осадка сопровождается пластическим изгибом: складок не образуется, но волокно искривляется, что вызывает уменьшение продольной устойчивости при последующих операциях осадки и высадки и вредно отражается на работе пуансона при выдавливании полости</p>	
<p>3. Высадка свободная (открытая) сплошного стержня</p> 	<p>Осадка (свободная) открытая части длины заготовки <math>H/D &lt; 2,5</math></p>	<p>Образование местных утолщений. Набор металла для последующей штамповки. Производство крепежных и других ступенчатых деталей. Калибровка заготовок</p>

### Список литературы

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

[2]. Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Выбор прессы для холодной объемной штамповки по критерию точности поковок // Вестник МГТУ. Машиностроение. — 2000. — № 4. — С. 25–29.

[3]. Антонюк Ф. И. Анализ и обеспечение высокой точности холодной объемной штамповки на прессах научно обоснованным выбором жесткости элементов технологической системы: Дис. д-ра техн. наук: 05.03.05: Москва, 2004 356 с. РГБ ОД, 71:05-5/311.

[4]. Ланской Е.Н., Антонюк Ф.И., Вяткин А.Г. Точность поковок, изготавливаемых холодной объемной штамповкой на кривошипных и гидравлических прессах // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. — 2002. — № 1. — С. 25–29

[5]. Богданов Э.Ф. Повышение стабильности и эффективности процессов штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. — 1995. №4.

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

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

**Научный руководитель: Вяткин Андрей Геннадьевич. КФ МГТУ**  
им. Н.Э. Баумана. E-mail: and-vyatkin@mail.ru

П.А. Пулин, В.Р. Куликова

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ**

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

Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ)—сложные многокомпонентные системы, предназначенные в основном для смазки и охлаждения металлообрабатывающих инструментов и деталей. Использование СОЖ способствует снижению износа инструментов, а также повышению точности обработанных деталей. В процессе обработки материалов смазочно-охлаждающие жидкости выполняют и ряд других функций: вымывание абразивной пыли и стружки, защита обработанных деталей и инструментов от коррозии[1].

### **Параметры классификации СОЖ**

—По происхождению компонентов выпускаются масляные смазочно-охлаждающие жидкости, основу которых составляют нефтяные масла, животные или растительные жиры.

—По отрасли применения производятся различные виды СОЖ для разных рабочих условий применения. Синтетическая смазочно-охлаждающая жидкость для операций пластического деформирования, СОЖ для токарных или фрезерных станков.

—По физико-механическим показателям — вязкости, кислотному числу, температуре вспышки [2].

### **Классификация смазочно-охлаждающих жидкостей по составу**

По составу различают СОЖ следующих видов:

—Масляные —компоненты которых не смешиваются с водой. Основой масляных СОЖ являются парафиновые, минеральные или нефтяные масла. Они обладают особыми смазывающими свойствами и используются при обработке мягких металлов.

—Минеральные — производится методом каталитического гидрирования из нефти. Эти составы применяются при таких видах металлообработки, как: резание стали, алюминия, латуни, резьбонарезные и фрезерные работы.

—Водосмешиваемые — эти составы обладают отличными охлаждающими свойствами, основу которых составляет водный раствор на минеральной основе, а такжеобладают низкой токсичностью и невысокими смазочными характеристиками. Применяются при фрезеровании и сверлении всех видов цветных металлов, шлифовании и штамповке стали.

—Синтетические и полусинтетические — смесь воды, поверхностно-активных веществ, водорастворимых полимеров. Для увеличения смазывающих свойств в синтетические составы также вводят противоизносные присадки.

–Эмульсии – составы с повышенной концентрацией дисперсных частиц. Характерной особенностью данного вида является снижение степени износа инструмента и оборудования[3].

### **Структура и механизм действия СОЖ**

Применение смазочно-охлаждающих жидкостей во всех областях машиностроения вызвано такими основными свойствами, как: снижение температуры заготовки и инструмента, а также уменьшение трения их поверхностей. Синтетические масла и животные жиры являются основными составляющими СОЖ, а для улучшения таких качеств, как: коррозионная стойкость, стойкость к разрушению и повышение смачиваемости поверхности, используют различные добавки, присадки и компоненты[4].

### **Применение смазочно-охлаждающих жидкостей**

Положительные свойства СОЖ характеризуются понижением износа инструмента, вследствие уменьшения силы трения между кромкой режущего инструмента и поверхности заготовки, улучшением качества продукции и увеличением интенсивности технологического процесса. Таким образом, СОЖ «помогает» рабочему инструменту срезать слой от основного металла [5].

### **Список литературы**

[1]. Маскаев А.К., Лебедев Е.В., Дубровский Ю.С. Базовый ассортимент смазочно-охлаждающих технологических сред для обработки материалов резанием – М.: Наука, 1986. – 52 с.

[2]. Худобин Л.В., Бердичевский Е.Г. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке – М.: Машиностроение 1977.- 189 с.

[3]. Бердичевский Е.Г. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки материалов – М.: Машиностроение, 2011. — 224 с.

[4]. Гольдхан Ф., Ельсуков В.П., Ксеневич П.И. Смазочно-охлаждающие жидкости в металлообрабатывающей промышленности.-Минск: издательство, 2003. — 100 с.

[5]. Киселев Е.С., Ковальногов В.Н. Научные основы и технология применения смазочно-охлаждающих технологических средств при механической обработке– Ульяновск: УлГТУ, 2011. - 57 с.

**Пулин Павел Алексеевич**– студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: pulin.99@inbox.ru

**Куликова Виктория Романовна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vkulikova2000@yandex.ru

**Научный руководитель: Калмыков Вадим Владимирович.**  
Преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Kalmykovv@bmstu.ru

М.М. Петрухин, И.Д. Соколова

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

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

Аддитивные технологии (3D–печать) – это группа технологических методов производства изделий и прототипов, основанная на поэтапном добавлении материала на основу в виде плоской платформы или осевой заготовки[1]. Наиболее прогрессивной технологией 3D–печати металлами является – селективное лазерное плавление (SLM - SelectiveLaserMelting). Сущность данного метода заключается в последовательном послойном сплавлении металлических порошков при помощи высокоэнергетического излучения иттербиевого лазера [1].

SLM–печать нашла широкое применение в машиностроительной области, так как обладает рядом преимуществ над уже известными методами обработки металлов.

Достоинства данного метода:

1. Высокие показатели плотности (в 1,5 раза выше, чем при литье);
2. Возможность создания миниатюрных и геометрически сложных объектов;
3. Отсутствие напряженности металла;
4. Широкий выбор металлических сплавов, как стандартных, так и специальных;
5. Сокращения циклов производства и ускорение выхода готовой продукции;
6. Возможность построения сложных изделий без изготовления дорогостоящей оснастки;
7. Экономия материала при производстве[1].

Оборудованием для SLM – печати служат 3D – принтеры таких марок как SLMsolutions и Realizer. Некоторые модели принтеров: SLM 100; SLM 125HL; ProX 400 [3].

В настоящее время существует около двадцати протестированных и готовых к эксплуатации материалов. Среди них присутствуют и инструментальные сплавы. Это делает возможным изготовление металлообрабатывающего инструмента с помощью SLM–печати. Материалом для данного инструмента могут выступать такие сплавы как: 1.2343; 1.2367; 1.2709; 1.3343; 1.4404(316L); 1.2344(H13); 1.4540(15 – 5PH); 1.4542(17 – 4PH)[2]. Данные материалы обладают довольно высокой твердостью и прочностью. Многие из них применяются для изготовления пресс-форм и формообразующей оснастки.



3D – печать позволяет получить ту геометрию форм, которую не может обеспечить не один из ранее известных методов. Это даёт возможность не только облегчить производство самих пресс – форм, но и изменить технологический подход к изготовлению сложных прецизионных деталей.

Использование сплава 1.3343, российским аналогом которого является быстрорежущая сталь Р6М5, позволяет изготавливать SLM методом металлорежущие пластины и инструменты, а также модифицировать уже имеющийся инструмент. Например, создавать каналы любой конфигурации для подачи СОТС в концевых и торцевых фрезах, которые невозможно получить другими методами производства. Если речь идет о металлорежущих пластинах, то тут 3D – печать позволяет получить любую фасонную поверхность, облегчая и удешевляя этап производства, а также этап проектирования данной пластины используя для реверс инжиниринга современные 3D–сканеры.

Производительность изготовления металлообрабатывающего инструмента SLMметодом зависит от применяемого оборудования для лазерного плавления. В среднем этот показатель составляет  $10 \text{ см}^3/\text{час}$ , что соответствует плотности материала  $7700 - 7900 \text{ кг/м}^3$  объему производства менее  $80 \text{ г/час}$ . Максимально доступный объем производства на сегодняшний день  $50 \text{ см}^3/\text{час}$  [2].

В настоящее время некоторые крупные российские предприятия активно используют аддитивные технологии в своем производстве.

Например, такие как:

1. НПО «Энергомаш»;
2. Тихвинский вагоностроительный завод;
3. Уралвагонзавод;
4. Воронежсельмаш;
5. Тушинский машиностроительный завод.

Таким образом 3D–принтеры вскоре найдут своё применение в производстве металлообрабатывающего инструмента, что будет являться большим шагом в данной области машиностроения.

### Список литературы

[1]. Баева, Л.С. Современные технологии аддитивного изготовления объектов // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2016. — № 1. — С. 7-12.

[2]. [Электронный ресурс] Сталь для изготовления оснастки. Режим доступа: [http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n\\_id=2702/](http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=2702/) (дата обращения 19.03.2019)

[3]. [Электронный ресурс] 3D – печать металлами. Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/top3dshop/3d-printing-metals/> (дата обращения 25.03.2019)

**Петрухин Максим Михайлович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: max200915@yandex.ru

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

**Научный руководитель: Соколова Ирина Дмитриевна.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sokolovairinadm@rambler.ru

А.В. Мерзлов

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ НАКЛАДОК В ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ТИСКАХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВАЛОВ**

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

Вал — деталь машины, предназначенная для передачи крутящего момента и восприятия действующих сил со стороны расположенных на нём деталей и опор[1]. Значение валов в машиностроении сложно переоценить. Одной из проблем изготовления и составления технологических процессов валов является зажатость относительно чистоты обрабатываемой поверхности, то есть, операции связанные с зажимом заготовки в тисках и патронах должны обязательно располагаться до шлифовки и полировки, так как на шлифованной поверхности могут остаться следы от губок или кулачков.

При зажиме в тисках и патронах валов из мягких металлов и сплавов может наблюдаться значительная деформация, влияющая на удобство дальнейшей обработки или даже технологичность самой детали. Для лучшего контакта и уменьшения негативных последствий зажима в тисках деталей круглого поперечного сечения применяются специальные тиски с призматическими губками, однако, и этого бывает недостаточно. Вал зажатый в тисках с призматическими губками может иметь остаточные деформации или поцарапаться при неаккуратном обращении.

Применение накладных призматических губок из плотной резины позволит избежать остаточной деформации, упростит установку детали в тисках и значительно снизит риск поцарапать деталь при неаккуратном обращении.

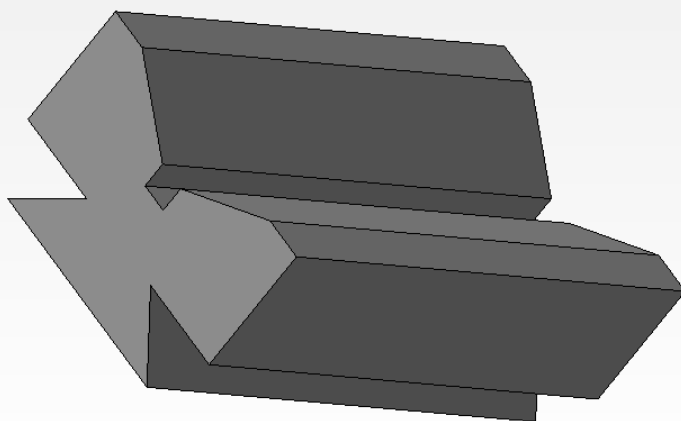


Рис. 1 Призматическая резиновая накладка

Установка губок в тиски возможна с использованием паза «ласточкин хвост», что значительно упрощает смену губок с резиновых на металлические. Также, при применении накладных губок из плотной резины, воз-

можно избежать строгой последовательности обработки относительно чистоты обработанной поверхности, становится возможным зажимать уже шлифованный вал для дальнейших операций.

Выбор оптимальных геометрических параметров для данного приспособления является более практической задачей, так как определить теоретически оптимальные геометрические параметры, в данном случае, неоправданно сложно из-за трудностей прочностного расчёта изделий из упругих материалов.

Применение резиновых накладных губок может повлечь за собой возникновение некоторых колебаний детали во время механической обработки. Это явление будет происходить из-за упругости материала губок. Решением этой проблемы является повышение жесткости технологической системы и повышение точности наладки станка. При точной установке детали относительно инструмента колебания можно будет свести к минимуму. Погрешности, вызванные этими колебаниями, позволят детали остаться в поле допуска, ими можно будет пренебречь.

Выбор полимерного материала следует производить из условий эксплуатации изделия. В данном случае изделие будет служить опорой для обрабатываемой детали, поэтому материал должен быть максимально жестким. По своим характеристикам подойдет резина марки ТМКЩ-Т-3 ГОСТ 7338-90 [2].

Таким образом, можно сделать вывод, что при применении накладных резиновых губок решена проблема в строгой последовательности технологического процесса относительно обработанной поверхности, возможна обработка изделия после шлифовки, используя шлифованные поверхности как базовые. Данное устройство не является технологическим сложным, а как следствие и дешевым. Упрощение требований к установке изделия позволит ускорить и удешевить процесс изготовления.

### Список литературы

[1] *Вал* (деталь машин) [Электронный ресурс] // Интернет-энциклопедия “Википедия”: сайт - Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вал\\_\(деталь\\_машин\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вал_(деталь_машин)) (Дата обращения 05.04.2018)

[2] *ГОСТ 7338-90* Пластины резиновые и резинотканевые. [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовой нормативно-технической документации “Техэксперт”: сайт - Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200005719> (Дата обращения 23.01.2019)

**Мерзлов Артём Витальевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: merzlovartom101296@yandex.ru

**Научный руководитель: Волков Александр Владимирович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: volkovkfmgtu@yandex.ru

Молчанова Е.М.

## **РОЛЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ**

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

Современный мир не стоит на месте. Потребности человечества возрастают с каждым днем, для их удовлетворения происходит интенсивное развитие машиностроения. Для снижения себестоимости и увеличения объемов производства необходима замена действующего оборудования на новое, автоматизированное, более производительное. Большое значение отводится развитию науки и внедрению новейших разработок в производство. На современном этапе автоматизация производства в машиностроении включает в себя весь комплекс мер: оснащение производственных линий современным роботизированным оборудованием, внедрение автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), автоматизация управления.

Внедрение промышленных роботов в современном машиностроительном производстве позволяет осуществить полную комплексную автоматизацию, повысить эффективность использования трудовых ресурсов, обеспечить последовательное сокращение применения и даже исключение ручного, тяжелого и неквалифицированного труда. По своим функционально-структурным возможностям и целевому назначению промышленные роботы делятся на:

- автоматические,
- биотехнические,
- интерактивные манипуляционные.

Лазерные технологии уже давно перешагнули стены лабораторий и вышли на промышленные просторы. С помощью лазера выполняются такие работы, как резка и сварка металла, сверление и гравировка, окрашивание и термообработка различных поверхностей.

Основополагающим фактором автоматизации технологических процессов и производств в машиностроении является внедрение АСУ ТП, когда управление осуществляется без непосредственного участия человека. В систему входят автоматизация непрерывных, отдельных и смешанных технологических процессов.

### **Список литературы**

[1] [Электронный ресурс] <https://www.ngpedia.ru/id512193p1.html> (дата обращения: 10.03.2019).

[2] [Электронный ресурс] <https://www.pkf4.ru/tehnologii/sovremjennyje-tjekhnologii-mashinostrojenija> (дата обращения: 24.03.2019).

[3] [Электронный ресурс] <https://infopedia.su/3x24c3.html> (дата обращения: 21.03.2019).

[4] [Электронный ресурс] <https://promzn.ru/voprosy-otvety/novye-tehnologii-mashinostroeniya.html> (дата обращения: 20.03.2019).

[5] [Электронный ресурс] <http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/razvitiye-mashinostroeniya.html#a1> (дата обращения: 18.03.2019).

[6] [Электронный ресурс] [http://www.i-mash.ru/materials/economy/55-k\\_tekhnologijam\\_mashinostroitelnykh\\_proivodstv\\_xxi.html](http://www.i-mash.ru/materials/economy/55-k_tekhnologijam_mashinostroitelnykh_proivodstv_xxi.html) (дата обращения: 20.03.2019).

[7] [Электронный ресурс] <https://nauchforum.ru/studconf/tech/xii/3551> (дата обращения: 24.03.2019).

[8] [Электронный ресурс] [https://ozlib.com/830955/tehnika/napravleniya\\_razvitiya\\_tehnologii\\_mashinostroeniya\\_veke](https://ozlib.com/830955/tehnika/napravleniya_razvitiya_tehnologii_mashinostroeniya_veke) (дата обращения: 10.03.2019).

[9] [Электронный ресурс] <https://progress.online/tehnologii/3325-3-izobreteniya-kotorye-obespechili-sovremennye-tehnologii-mashinostroeniya> (дата обращения: 21.03.2019).

[10] [Электронный ресурс] [https://m.studme.org/36425/tovarovedenie/primenenie\\_promyshlennyh\\_robotov](https://m.studme.org/36425/tovarovedenie/primenenie_promyshlennyh_robotov) (дата обращения: 23.03.2019).

[11] [Электронный ресурс] <http://лазер.рф/2017/07/26/4914/> (дата обращения: 20.03.2019).

[12] [Электронный ресурс] <https://msd.com.ua/doklady-o-budushhix-i-sovremennykh-tehnologiyax/lazery-i-ix-primenenie-v-mashinostroenii/> (дата обращения: 20.03.2019).

[13] [Электронный ресурс] <http://тдрцл.рф/articles/4718> (дата обращения: 18.03.2019).

[14] [Электронный ресурс] [http://www.rekord-eng.com/avtomatizaciya/v\\_mashinostroenii/](http://www.rekord-eng.com/avtomatizaciya/v_mashinostroenii/) (дата обращения: 20.03.2019).

**Молчанова Екатерина Михайловна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [ekaterinamolcanova01755@gmail.com](mailto:ekaterinamolcanova01755@gmail.com)

**Научный руководитель – Калмыков Вадим Владимирович.**  
Преподаватель кафедры «Машиностроительные технологии» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [kalmykovvv@bmstu.ru](mailto:kalmykovvv@bmstu.ru)

Э.С. Анкуда, В.П. Сорокин

## **СОВРЕМЕННЫЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ И СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

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

Ввиду непрерывного повышения требований к инструменту необходима разработка новых способов его улучшения. В большинстве случаев выход инструмента из строя связан не с его поломкой, а с преждевременным износом [1]. В современной науке и промышленности широко исследуются различные методы нанесения износостойких покрытий. Использование таких покрытий на режущем инструменте с учетом экономической целесообразности позволяет интенсифицировать режимы резания посредством повышения производительности технологических систем, увеличения стойкости инструмента и уменьшения сил резания.

Применение самых первых, примитивных по современным меркам, износостойких однослойных покрытий на основе карбида титана повысило производительность неперетачиваемых сменных твердосплавных пластин примерно на 50% [2]. В настоящее время происходит совершенствование состава покрытий, технологии и методов их нанесения.

Хрупкость сверхтвердых материалов в некоторых случаях влечет за собой разрушение инструмента. PVD-покрытие позволяет улучшить эксплуатационные характеристики таких материалов не только за счет повышенных свойств модифицированного поверхностного слоя, но и за счет синергетического эффекта, заключающегося в объединении свойств нескольких материалов, ведущем к образованию новых свойств, которыми материалы по отдельности не обладают [1].

Однако и само покрытие может когезионно или адгезионно разрушаться под действием эксплуатационных или остаточных напряжений. Уменьшить это разрушение позволяет прерывистая топография поверхности, то есть формирование дискретных покрытий (Рисунок 1.), которые уменьшают контактную поверхность инструмента и материала заготовки и изменяют их адгезионное взаимодействие, а также снижают уровень напряжений на поверхности основного материала режущей части инструмента, что приводит к уменьшению сил резания. Монолитным покрытиям, в отличие от дискретных, характерны такие виды разрушения, как растрескивание, отслоение и вспучивание [1].

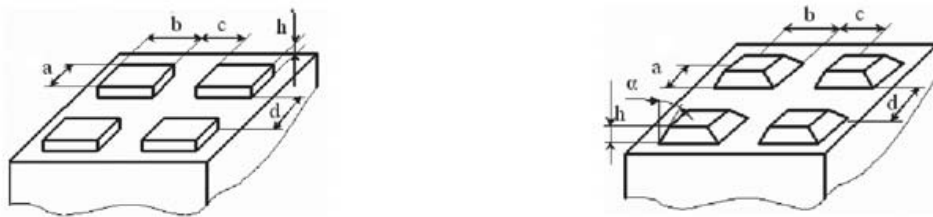
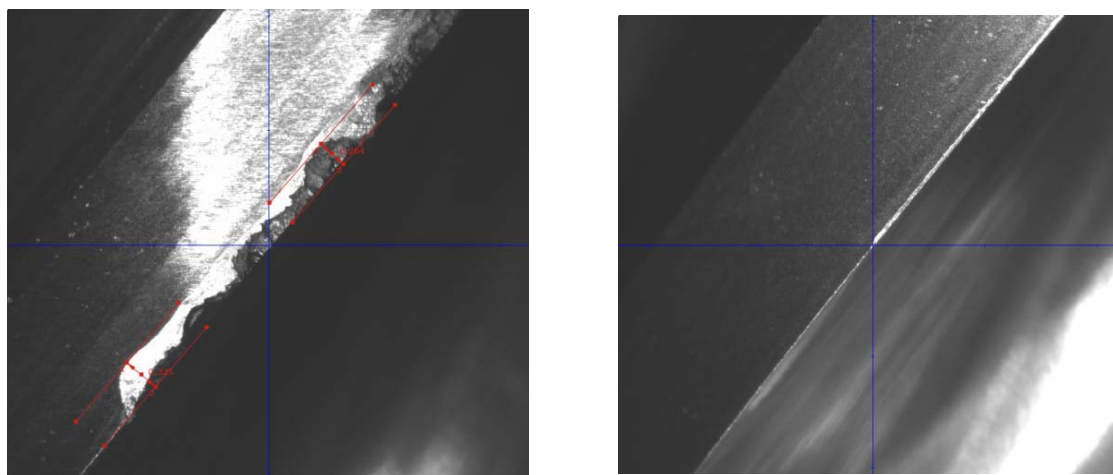


Рис.1. Конфигурация дискретных износостойких покрытий

Одним из эффективных способов повышения свойств режущей части инструмента является нанесение многослойных нано дисперсных покрытий методом физического (PVD) или химического (CVD) осаждения. Например, такое покрытие позволило повысить стойкость монокристаллических твердосплавных концевых фрез при обработке конструкционных углеродистых сталей в СОЖ примерно в 6 раз. На рисунке 2 показан результат работы фрезы без покрытия в течение 33 минут и фрезы с покрытием в течение 180 минут[3].



а) Фреза без покрытия

б) Фреза с покрытием

Рис.2. Фаска износа по задней поверхности фрезы

Одной из причин разрушения износостойких покрытий является разница между температурными коэффициентами линейного расширения материала подложки и материала покрытия: твердосплавная пластина при остывании сжимается меньше покрытия, что приводит к его усталостному разрушению и образованию трещин, которому также способствуют растягивающие напряжения, распределенные в материале покрытия. Борьба с этой проблемой позволяет особая отделка поверхности режущей части инструмента после нанесения покрытия: верхний слой покрытия делается несколько толще запланированного, и излишек толщины снимается путем абразивного полирования, что уменьшает остаточные напряжения в покрытии примерно на 80%. Снятие 2...3мкм от общей толщины износостойкого покрытия позволяет уменьшить внутренние растягивающие напряжения в 2 раза и устранить большую часть зародышей микротрещин [2]. В результате



такой обработки из-за полировки уменьшается схватывание материалов режущей части инструмента и заготовки, повышается износостойкость, стойкость к выкрашиванию главного лезвия, усталостному разрушению, пластическим деформациям, термическим трещинам и повышается стабильность работы инструмента [2].

Использование смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) характеризуется значительными недостатками: загрязнением окружающей среды, влиянием на здоровье работников, увеличением стоимости механической обработки. При применении инструмента с износостойким покрытием позволительно не использовать или использовать в малых количествах СОТС. Для этого разработаны так называемые сетчатые специальные покрытия с ультрадисперсной структурой и повышенной усталостной прочностью. Износостойкость инструмента с наноструктурированным покрытием для сухого чистого точения превышает его износостойкость при использовании СОТС в 2 раза [4]. Помимо этого, образующаяся в этом случае стружка дисперсной структуры безопасна для рабочего.

### Список литературы

[1] *Яцун Е.И., Астанов А.Н.* Повышение стойкости инструмента с PVD покрытием // В сборнике: Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации материалы X-ой Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор: А.А.Горохов. 2013. С. 298-302.

[2] *Маношин Д.В., Насад Т.Г.* Метод повышения стойкости режущих твердосплавных пластин для обработки труднообрабатываемых сплавов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 3. № 2 (58). С. 92-95.

[3] *Гордовенко М.А., Михнёв М.М.* Исследование повышения стойкости монолитных твердосплавных концевых фрез производства АО "ИСС" с износостойким покрытием. // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. № 21. С. 485-487.

[4] *Чекалова Е.А., Чекалов П.Д.* Повышение износостойкости режущего инструмента путем нанесения сетчатого покрытия // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2014. Т. 2. № 1 (19). С. 228-230.

[5] *Ankuda E.S., Kalmykov V.V., Musokhranov M.V., Ustinov I.K.* Protecting surfaces of parts with wear-resistant vibration-damping coatings // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 483 (2019) 012039 doi: 10.1088/1757-899X/483/1/012039.

[6] *Kalmykov V.V., Musokhranov M.V., Logutenkova E.V., Malyshev E.N., Gorbunov A.K.* Generation of surface energy in metals using row-by-row microdeformation // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 24. С. 15621-15626.

[7] *Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N.* Experimental research of variability of surface energy value of Fe37-3FN, c45 and 41Cr4 steels // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 17. С. 6428-6433.

[8] *Kalmykov V.V., Musokhranov M.V., Logutenkova E.V.* Dependence of physical and mechanical properties of metal surfaces on microgeometric parameters // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 483 (2019) 012045 doi:10.1088/1757-899X/483/1/012045

**Анкуда Эвелина Сергеевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: e.ankuda@mail.ru

**Сорокин Владимир Павлович** – учащийся МБОУ Школа №13. E-mail: vladimir.pav@icloud.com

**Научный руководитель: Калмыков Вадим Владимирович.**  
Преподаватель кафедры «Машиностроительные технологии» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kalmykovvv@bmstu.ru

И.Е. Аржанков

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЗАСАЛИВАНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

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

Существует такая проблема, как износ шлифовального круга при обработке цветных металлов. Есть несколько видов определения засаливаемости шлифовального круга. Рассмотрим наиболее распространённые:

При многоходовом шлифовании стол станка совершает возвратно-поступательное движение, а подача шлифовального круга на глубину осуществляется на каждый одинарный или двойной ход стола. В конце обработки выключаются вращение круга и продольная подача стола. Затем производится измерение высоты  $h_1$  расположения обработанной поверхности образца, от базовой поверхности стола и также высоты  $H_1$ , от наружной поверхности кольца до дополнительной базовой поверхности.

Предложенный способ позволяет измерить радиус шлифовального круга косвенным путем без непосредственного контактирования измерительного средства с его абразивной рабочей поверхностью.

$$R = H - \frac{d}{2} - h$$

где  $H$  - расстояние от базовой поверхности кольца до дополнительной базовой поверхности до шлифования при контактировании круга с поверхностью образца;  $d$  - диаметр кольца;  $h$  - высота образца до шлифования.

Радиус изношенного круга определяется аналогичным образом

$$R_1 = H_1 - \frac{d}{2} - h_1$$

где  $H_1$  - расстояние от базовой поверхности кольца до дополнительной базы после шлифования;  $h_1$  - высота образца 3 после шлифования.

Для случая многоходового шлифования формула для определения удельного износа шлифовального круга без учета влияния упругих деформаций станка будет иметь вид:

$$q = \frac{\pi \cdot \left[ \left( H - \frac{d}{2} - h \right)^2 - \left( H_1 - \frac{d}{2} - h_1 \right)^2 \right]}{L \cdot [h - h_1]}$$

где  $q$  - удельный износ шлифовального круга.

Или используется графико-аналитический, который используется, для учёта большего количества переменных:

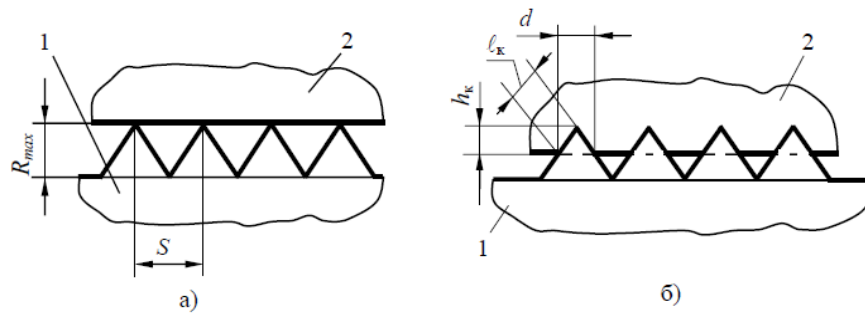


Рис. 1 Расчетная схема образования физического контакта:  
 а – исходное положение; б – в процессе шлифования;  
 1 – АЗ; 2 – заготовка

Математические модели для расчета характеристик контакта гладкой и шероховатой поверхностей диаметр пятен фактического контакта  $d_k$  можно рассчитать по зависимости:

$$d_k = \frac{2\sqrt{2r}}{\sqrt{\nu}} \cdot \Delta^{1/2} \cdot \left( \frac{p_c}{c \cdot \sigma_T} \right)^{1/2\nu},$$

где  $r$  – радиус сферы, охватывающей выступ микрорельефа, м;  $\nu$  – параметр степенной аппроксимации кривой опорной поверхности;  $\Delta$  – безразмерный комплекс, характеризующий микрорельеф АЗ;  $p_c$  – контурное давление, Па;  $\sigma_T$  – предел текучести материала заготовки, Па;  $c$  – коэффициент, зависящий от формы выступов и упрочнения материала заготовки.

Полученная в результате несложных вычислений зависимость для расчета радиуса  $r$  сферической поверхности, охватывающей выступ микрорельефа в виде конуса, имеет следующий вид:

$$r = \frac{4 \cdot R_{\max}^2 + S^2}{8 \cdot R_{\max}}$$

При выборе аналитического метода определения засаливаемости круга был выбран второй вариант, так как в нём рассматривается наибольшее количество важных для исследования факторов.

### Список литературы

- [1] *Минимизация Засаливания Шлифовальных кругов* / Л. В. Худобин, А. Н. Унянин; под. Ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. -298 с
- [2] *Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник* / Под. Ред. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. -391 с.
- [3] *Богомолов Н.И.* Исследование деформации металла при абразивных процессах под действием абразивного зерна // Труды ВНИИАШ. – 1968. - № 7. – С. 74 - 78
- [4] *Гордон М. Б.* Физическая природа трения при обработке металлов резанием // Физико-химическая механика контактного взаимодействия в

процессе резания металлов. – Чебоксары: Изд-во Чувашск. ун-та, 1984. – С. 10 – 16.

[5] *Теория* и практика повышения эффективности шлифования / Зубарев Ю.М., Приемышев. - Издательство "Лань", 2010. - 1-е изд. – 304 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://e.lanbook.com/book/153>

**Аржанков Иван Евгеньевич**– студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: arjankov.ivan@yandex.ru

**Научный руководитель: Мусохранов Марсель Владимирович.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: marls77@yandex.ru

Е.Н. Малышев, М.П. Карпов

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПАРОНИТА**

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

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

В настоящее время широко используются детали из паронита в машиностроении (в двигателях внутреннего сгорания), электротехнике (изоляторы), металлургии (в трубопроводах), химической и нефтяной промышленности (в компрессорах), - паронит используется во многих промышленных сферах благодаря своим особым востребованным свойствам [1, 10].

Таким образом, паронит – уникальный прокладочный материал, обладающий полным спектром необходимых свойств и характеристик. Поэтому целесообразно, чтобы качество и точность деталей из паронита не уступали их технологическим возможностям, что говорит об актуальности данной работы.

Детали из паронита изготавливаются, как правило, сложной конфигурации и разными партиями – от одной детали до тысячи, поэтому необходимо использовать технологические методы обработки, которые позволят снизить расходы, сохраняя при этом высокий уровень качества, при любом типе производства.

Существуют различные технологические методы обработки композитных материалов, в данном исследовании были рассмотрены технологии: пробивка [2, 3], разделка на планшетном режущем плоттере, лазерная резка [4].

Пробивка осуществляется пробойником, представляющий собой заостренную металлическую трубку, приставив который ко многим видам материала и ударив по нему несколько раз можно сделать аккуратное круглое отверстие. Инструмент можно сделать из любой тонкостенной трубки, главное, чтобы его края были достаточно острыми.

Просечки обрабатывают конические и цилиндрические отверстия в деталях, он объединяет сразу две функции:

1. острый наконечник пробивает отверстие;
2. встроенное лезвие расширяет отверстие до нужного диаметра.

Инструмент позволяет не только увеличить диаметр отверстия, сделать его более точным, но и значительно улучшить качество выполняемой

работы. Механическая обработка потребует высокой мощности, чтобы операция была выполнена наиболее точно [5].

Технологические возможности планшетного режущего плоттера:

1. поправка начальной и конечной точек, для легкого вынимания вырезанных деталей можно скорректировать положение начальных и конечных точек в диапазоне от 0 до 2,5 мм;
2. давление резки точно настраивается для полного прорезания материала;
3. для резки с обратной стороны используются специальные присоединяемые маркеры, при этом снаружи прорезные линии не имеют лишних перерезов и выглядят превосходно;
4. погрешность между начальной и конечной точками окружности, возникающая при резке толстых или твердых материалов может быть скорректирована;
5. повторная резка материала (до 5 раз) позволяет прорезать сложные и толстые материалы, которые невозможно прорезать с одной попытки. При этом макет посылается на плоттер 1 раз.
6. параметры резки (давление, коррекция начальной и конечной точек, круговая коррекция, офсет и т.д.) запоминается плоттером для конкретного материала [8].

Использование лазера обусловлено рядом преимуществ:

1. тонкий луч лазера вырежет изделия сложной конфигурации с минимальным количеством отходов;
2. резка выполняется с точностью до десятых долей миллиметра, в соответствии с утвержденными чертежами;
3. срез получается гладким, ровным, и не требует последующей обработки [9];
4. процесс резки автоматизирован, поэтому все работы выполняются оперативно и в сжатые сроки.

Цель исследования: выявление условий и технико-экономических показателей, при которых будет обеспечено высокое качество деталей из паронита при различных технологиях изготовления.

Задачи исследования: решение вопросов обеспечения точности размеров, формы, расположения и качества поверхностей деталей из паронита при использовании различного оборудования и инструмента.

Для решения поставленной задачи необходимо:

1. проанализировать литературные источники по теме исследования;
2. проанализировать технологические процессы изготовления деталей из паронита при использовании различного оборудования и инструмента: пробойника, планшетного режущего плоттера, лазерного станка;
3. разработать план экспериментов по реализации изготовления деталей из паронита разными технологиями [6, 7];
4. выполнить план экспериментов по реализации изготовления деталей из паронита разными технологиями;

5. сопоставить результаты теоретических и экспериментальных исследований;
6. сделать промежуточные выводы о достоинствах и недостатках каждой технологии изготовления деталей из паронита;
7. выполнить сравнительный анализ технико-экономических показателей разных технологий изготовления деталей из паронита;
8. выбрать наиболее оптимальную технологию обработки деталей из паронита, сделать вывод об условиях и технико-экономических показателях различных технологий, которые обеспечат высокое качество и точность деталей из паронита.

### Список литературы

[1]. *Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В.* Химия древесины и синтетических полимеров. – СПб: Издательство «Лань». 2010. С. 624. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/reader/book/582/#3>.

[2]. *Васильев С.Е.* Способ обработки листов паронита // Электронный ресурс: <http://www.freepatent.ru/images/patents/75/2388607/patent2388607.pdf>.

[3]. *Васильев С.Е.* Способ изготовления паронита // Электронный ресурс: <http://www.freepatent.ru/patents/2393097>. 2010.

[4]. *Голубев А.П.* Перспективные методы формирования качества рабочих поверхностных слоев деталей // Современные информационные технологии сборник трудов по материалам II-й межвузовской научно-технической конференции. под общей научной редакцией В.М. Артюшенко. 2016. С. 166-172. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26877022>.

[5]. *Завистовский С.Э.* Обработка материалов и инструмент: учебное пособие. - Минск: РИПО, 2014. - 448 с. ISBN 978-985-503-342-5. Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=463704>.

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

[7]. *Карнов М.П., Малышев Е.Н.* Исследование процесса изготовления деталей пробивкой из листа паронита // Южно-сибирский научный вестник. 2018. №3. С. 49-53. Режим доступа: <http://s-sibsb.ru/issues-of-the-journal-eng.html?sobi2Task=sobi2Details&catid=51&sobi2Id=460>.

[8]. *Фещенко В.Н.* Слесарное дело. Механическая обработка на станках. Книга 2 // учебное пособие. - М. : Инфра-Инженерия, 2013. — 464 с. — 978-5-9729-0054-1. Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/13547>.

[9]. *Филимонов Е.В., Светлова А.М., Гизитдинов Т.Р.* Современные способы раскрытия препрегов на основе тканевых материалов // Современные материалы, техника и технология Материалы 3-й Международной научно-практической конференции, 2013. С. 348-355.



[10]. *Шанин Н.И.* Производство асбестовых технических изделий. – Л.: Химия, 1983. С.193.

**Карпов Максим Петрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ПАО «КАДВИ». E-mail: Maks96F@yandex.ru

**Мальшев Евгений Николаевич** – заведующий кафедрой "Машиностроительные технологии", канд. техн. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

С.С. Аксенов

## **ТЕРМООБРАБОТКА ВАЛОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ТЕРМОСИЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ**

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

Термическая обработка является одной из фундаментальных, значимых операций технологического цикла обработки. Необходимо верно выбрать способ, от которого зависит качество готовой продукции. Перспективным способом является комбинированное термосиловое нагружение валов.

Проблема обработки валов заключается в том, что после механической и термической обработки возникают остаточные напряжения первого рода. В следствие этого теряется геометрическая точность изделия. Это проблема побудила к разработке новой технологии термообработки валов. Основная цель термосилового нагружения валов состоит в том, что деформация прикладывается к валу при нагреве до температур закалки или отпуска при выдержке и остывании. Усилие может создаваться за счет внешних сил. Кроме того, может создаваться самой технологической системой за счет физических процессов при нагреве-охлаждении.

Для исследования проблемы была спроектирована, изготовлена и апробирована в промышленных условиях (ОАО «Азотреммаш», г. Тольятти) установка для ТСО (рис. 1, *а*). Особенностью установки является то, что коэффициент температурного расширения материала, из которого изготовлен вал, меньше коэффициента температурного расширения материала труб стапеля. При нагревании устройства в шахтной печи возникает осевое растягивающее усилие, вызванное разницей температурных удлинений труб стапеля и вала. При остывании устройства осевое усилие сохраняется за счет того, что изделие — вал — остывает быстрее труб стапеля, которые имеют большую теплоемкость за счет заполнения чугунной стружкой и песком и сообщают осевое усилие требуемого значения до полного остывания вала.

Пластическая деформация вала происходит при нагревании с заданной скоростью, согласно технологии термообработки.

При ТСО в двухтрубчатом стапеле (рис. 1, *б*) осевое растягивающее усилие, вызванное разницей температурных удлинений труб стапеля 1 и вала 6, через замкнутую силовую цепь: стапель 1 — крышки 2 — сферические шайбы 3 — гайки 4 — тяги 5 — сообщается валу 6. Значение и скорость деформации определяются подбором материала стапеля, видом и объемом наполнителя труб, температурным режимом охлаждения-нагрева, а также первоначально выставляемым температурным зазором в замкнутой силовой цепи, который необходим для согласования времени начала деформирования заготовки с ее выходом на рабочие температуры.

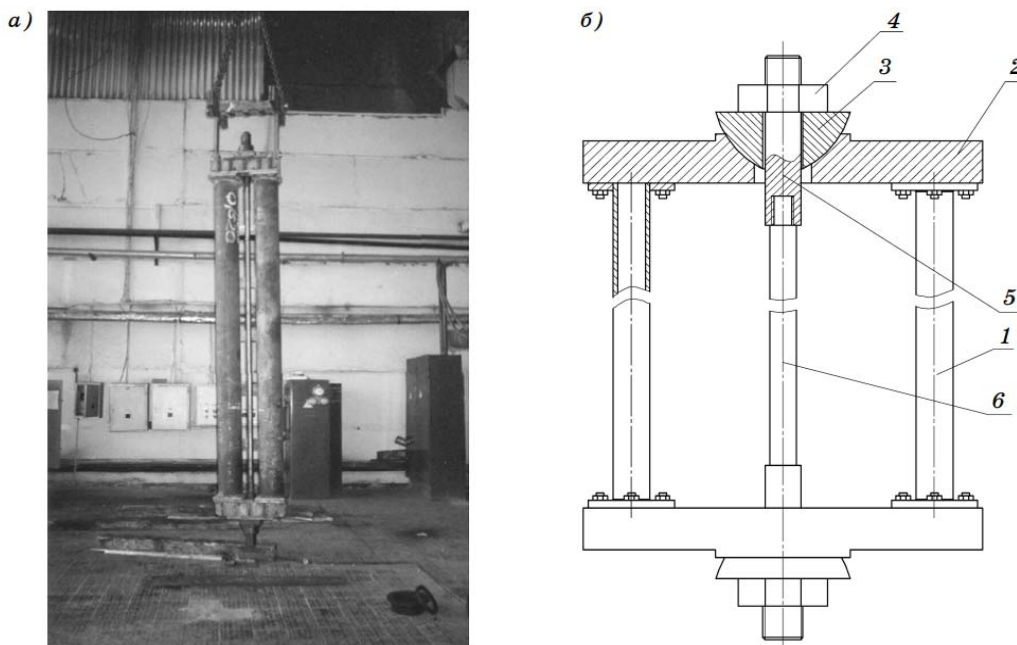


Рис. 1. Установка для ТСО: а — промышленная установка; б — функциональная схема

Основная проблема термосилового нагружения – обеспечение равномерности деформирования заготовки по длине. Для решения этой задачи была спроектирована экспериментальная установка, которая способна воспроизвести данный процесс. В ходе анализа данных, полученных при обработке деталей из материалов сталь 12Х18Н10Т можно сделать следующие выводы:

1) степень относительной деформации оказывает значительное влияние на интенсивность снижения значения биения вала и равномерность деформирования по длине заготовки;

2) при больших значениях начального биения (более 0,2 мм на 100 мм длины заготовки) рекомендуется проведение предварительных правильных операций;

3) ТСО обеспечивает выравнивание физико-механических свойств по всему объему за счет подбора режима обработки, позволяющего получить значения критерия локальности деформации до 1,05-1,10.

Таким образом, ТСО позволяет устранить технологическую наследственность от предыдущих операций, стабилизировать уровень остаточных напряжений в сечениях изделия, создавая при этом остаточные напряжения одного знака, одновременно провести правку длинномерных заготовок.

### Список литературы

[1]. Пат. № 2260628 Российская Федерация. Кл. С21Б9/06. Устройство для термосилового нагружения осесимметричных деталей / Д. А. Расторгуев, О. И. Драчев, Д. Ю. Воронов, В. А. Гуляев. 20.09.2005.

[2]. Драчев О.И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей. М.: Политехника, 2005. 289 с.

[3]. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

[4]. *Пат.* № 2235794 Российская Федерация. Кл. С21Б9/06. Способ и устройство для термосиловой обработки осесимметричных длинномерных деталей / А. О. Драчев, А. В. Ареткин, Т. Л. Яшкина 20.02.2001.

**Аксенов Сергей Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: aksenovsergey97@mail.ru

**Научный руководитель: Зенкин Николай Васильевич.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

М.Е. Сафронова

## **ХРОНОЛОГИЯ ПРОГРЕССА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

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

Металлорежущий инструмент является одним из важнейших орудий производства. Он используется при обработке резанием всевозможных деталей на металлорежущих станках. При этом срезается часть материала заготовки в виде стружки до получения требуемой поверхности детали. В настоящее время в машиностроении используется большое количество разнообразных режущих инструментов [1-3].

Одними из первых режущих инструментов, которыми пользовались люди в процессе своего труда, были каменные скреби, резцы, наконечники, иголки, кинжалы, топоры, молотки, мотыги, серпы, напильники. Несмотря на твердость каменных инструментов, основным недостатком является их хрупкость. Технологический уровень людей в III – I тысячелетиях до н. э. позволил заменить каменные инструменты на медные, оловянные и бронзовые. Позднее железные инструменты сочетали в себе прочность бронзы и твердость камня. Мануфактурный период, который пришел на смену ремесленному производству, ознаменовался тем, что производство было разделено на ряд операций и каждая из них выполнялась отдельным рабочим, что привело к соответствующей дифференциации орудий труда и приспособления их к определенным операциям мануфактурного производства.

Выделяют несколько типов конструкции режущего инструмента в зависимости от условий работы:

1. Цельные конструкции – встречаются крайне часто, что связано с их относительно невысокой стоимостью и надежностью в применении.
2. Составные – обходятся намного дороже, но при этом есть возможность использовать более качественные материалы при создании режущей кромки.
3. Сборные также характеризуются тем, что состоят из отдельных частей [4].

**Тенденции развития режущего инструмента.** Современный режущий инструмент по используемым при производстве материалам можно разделить на 4 основных группы:

- инструмент из быстрорежущей стали,
- твердосплавный инструмент,
- режущая керамика,
- сверхтвердые поликристаллические синтетические материалы.

Среди основных направлений развития режущего инструмента можно выделить 3 основных вектора:

1. Разработка новых материалов с одновременно высоким комплексом свойств «прочность — пластичность».
2. Оптимизация производства существующего инструмента.
3. Разработка новых химических и физико-химических покрытий.

Как правило, режущий инструмент редко эксплуатируется без покрытия, которое существенно снижает температурную нагрузку, вероятность «схватывания» с обрабатываемым материалом, увеличивает износостойкость и поверхностную твердость. На сегодняшний день, в качестве таких покрытий, широко используются газовое и плазменное азотирование, физико-химические PVD и CVD способы нанесения нитридов и карбонитридов титана, алюминия и др. PVD-покрытия (Physical vapour deposition, в пер. с англ. «физическое осаждение из газовой фазы»). CVD-покрытия (Chemical vapour deposition, в пер. с англ. «химическое осаждение из газовой фазы») [5].

Разработка новых способов покрытия инструмента, так же как и разработка новых инструментальных материалов, требует больших капиталовложений. Движущей силой исследований и новых научных разработок является высокая конкуренция на мировом рынке и желание сделать изделие с более низкой себестоимостью и более высоким комплексом тех самых свойств «прочность — пластичность», поэтому постоянно появляются новые инструментальные сплавы, новые конструкции инструмента и новые технологии поверхностного химико-термического упрочнения.

### Список литературы

[1]. Библиотека инструментальщика: [сайт]. URL: <http://www.info.instrumentmr.ru/vvedenie.shtml> (дата обращения: 25.02.2019).

[2]. Ющенко Д. А., Кузнецова Е. М. Перспективы применения полимерных композиционных материалов //Механики XXI века. – 2015. – №. 14. – С. 194-198.

[3]. Лобанов Д. В., Янюшкин А. С., Рычков Д. А. Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2015. – Т. 15. – №. 1.

[4]. Режущий инструмент по металлу: [сайт]. URL: <http://stankiexpert.ru/tehnologicheskaya-osnastka/instrument/rezhushij-instrument.html/> (дата обращения: 25.02.2019).

[5]. Петров А. Тенденции развития режущего инструмента // Твердый сплав. 2015. Электронный журнал: URL: <http://tverdysplav.ru/tendentsii-razvitiya-rezhushhego-instrumenta/> (дата обращения: 15.01.2019).

**Сафронова Мария Евгеньевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Svetlaya.dom@mail.ru

**Научный руководитель: Калмыков Вадим Владимирович.** Преподаватель кафедры «Машиностроительные технологии» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: kalmykovvv@bmstu.ru

М.С.Подвязников

## **АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК МИКРОИНСТРУМЕНТОМ**

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

Микрофрезерование предполагает использование фрез, которые не превышают 1 мм. Допуски, измеряются в сотых долях миллиметра, и менее. Выполняя операцию микрофрезерования, на выходе получаются зрелищные и красивые детали.

Рассмотрим некоторые аспекты, при которых становится возможным осуществление операции микрофрезерование:

1. Точность позиционирования станка.
2. Минимальное биение инструмента.

Главное требования к канавкам микрофрезы - симметричное расположение относительно центра. Из-за неточности инструмента, происходит биение и может вызвать увеличение нагрузки на канавку, которая может повлиять на увеличение срезаемого металла данной канавкой, тем самым увеличивая нагрузку и быстрому износу инструмента. Это негативно сказывается на инструменте изготовленного из хрупкого материала, который способен выдержать только небольшую подачу на зуб.

3. Предотвращение отгиба инструмента и сила резания.

Отгиб инструмента чаще всего происходит при большом вылете микроинструмента. Они чаще всего подвергаются отгибу и варьируется от 2 до 20 раз по сравнению с той силой, которую можно ожидать при использовании фрез привычного размера. Всегда используйте наиболее короткий инструмент, имеющий максимальную жесткость. Необходимо варьировать наклон линии зуба или размеры канавок так, чтобы добиться идеального положения инструмента и предотвратить отгиб.

4. Оптимальная подача.

С учетом того, что подача на зуб связана с геометрией фрезы на микроуровне, единственный способ повысить скорость обработки — это использование шпинделя с высокой частотой вращения для достижения достаточной скорости подачи инструмента с учетом допустимых значений подачи на зуб, которые способны выдержать микрофрезы.

5. Встречное фрезерование предпочтительнее попутного

Есть целый ряд аргументов в пользу данного утверждения, но основной проблемой в данном вопросе является то, в каком направлении происходит отгиб инструмента. Ввиду того, что микрофрезы особенно подвержены отгибу, встречное фрезерование является более предпочтительным, так как отгиб фрезы будет происходить в направлении траектории движе-



ния инструмента, а не по направлению подачи заготовки. Отгиб в направлении движения заготовки ведет к увеличению подачи на зуб и снижению точности обработки, а также к возникновению дрожания, в случае если заготовка имеет малую толщину.

Для получения более подробной информации посетите страницу «Попутное фрезерование против встречного».

#### 6. Программное обеспечение.

Необходимо сразу установить скорость подачи и частоту вращения. Кроме того, даже очень небольшой отгиб инструмента в неподходящий момент может привести к его мгновенному заклиниванию, поэтому вам необходимо иметь очень качественно рассчитанные траектории движения. Вкладывайте средства в приобретение программного обеспечения, которое поможет вам избежать возникновения подобного рода проблем.

### Список литературы

[1] Боденхаузен Й. В., Мюллер В. Новые технологии и средства микрофрезерования // САПР и Графика. 2005. № 8.

[2] Введение в микрообработку. Режим доступа: <https://darxton.ru/wiki-article/mikrofrezerovanie/>

**Подвязников Михаил Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [m.podvyaznikov@yandex.ru](mailto:m.podvyaznikov@yandex.ru)

**Научный руководитель: Мусохранов Марсель Владимирович.** Канд. техн. наук, доцент кафедры " Машиностроительные технологии " КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [marls77@yandex.ru](mailto:marls77@yandex.ru)

К.А. Шулепов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТРАТ ВРЕМЕНИ НА НАЛАДКУ И СМЕНУ ИНСТРУМЕНТА

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

Традиционно стойкость режущего инструмента определяет его срок службы. Под стойкость понимается время, которое инструмент будет работать до выхода из строя.

В связи с развитием и появлением новых технологий значения стойкости для различных режущих инструментов претерпевали изменения. Например, для всех фрез в среднем это значение варьировалось от 60 минут (было предложено Комиссией по резанию металлов в 1942 г.) до 45 минут (снижено в 80-х годах прошлого века)[1].

Однако все эти величины стойкости инструментов далеки от оптимальных значений стойкости инструмента и скорости резания как с точки зрения обеспечения минимальной себестоимости, так и с точки зрения максимальной производительности. Это отражено на данном графике (рис. 1) [2].

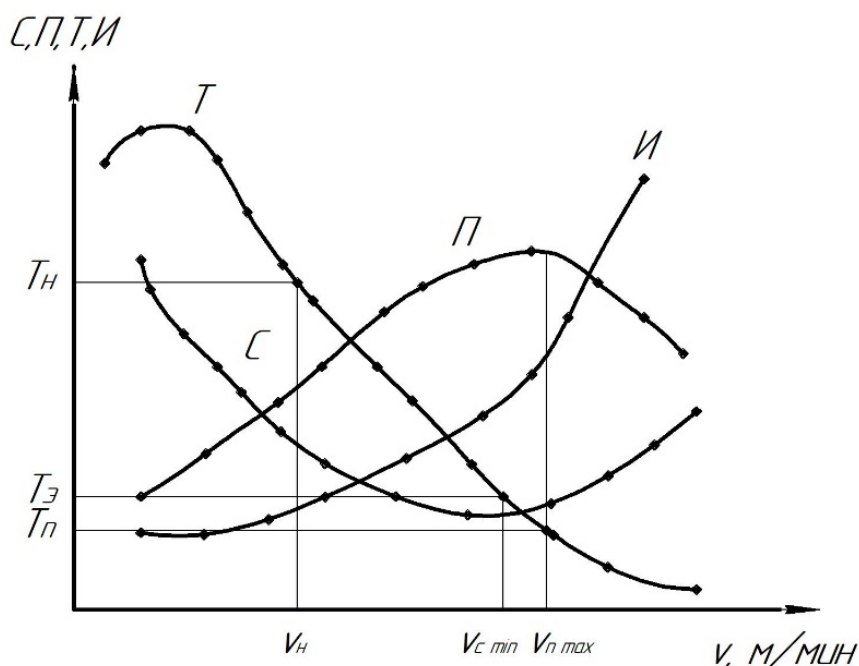


Рис. 1. Влияние скорости резания на себестоимость (С), производительность (П), расход (Р) и стойкость (Т) инструмента

Поэтому существующие оптимизационные методики выбора режима резания предлагают не назначать стойкость режущего инструмента как исходную величину, а сразу рассчитывать скорость резания на основе требуемых технико-экономических показателей процесса обработки и, исходя из них, задавать значения стойкости инструмента [3,4].

В действительности определение стойкости является экономической задачей. Поэтому целью нашей работы является выявление зависимости между временем смены и наладки инструмента и его стойкостью, на основе анализа общих издержек производства.

В ходе эксперимента были получены данные о времени замены сменных твердосплавных пластин для фрез: R390-020A20-11M (рис.2), ISCARHCE 012-A-L120-C12 (рис.3), GARANT 215 157 32/3 (рис.4).



Рис. 2. Фреза R390-020A20-11M



Рис. 3. Фреза ISCARHCE  
012-A-L120-C12



Рис. 4. Фреза GARANT 215 157 32/3

Процесс эксперимента включал снятие крепежного винта, снятие пластины, установка новой пластины и ее закрепление (рис.5).



Рис. 5. Замена пластин

Таблицы со временем смены пластин полученные в ходе эксперимента приведены ниже:

Кол-во повторений	Время смены	Кол-во повторений	Время смены	Кол-во повторений	Время смены
1	49,9	1	35,4	1	30,9
2	31,3	2	31,6	2	38,7
3	32,3	3	29,1	3	25
4	36,2	4	26,2	4	48,1
5	34,5	5	24,3	5	28,7
6	29,7	6	25,7	6	21,6
7	24,3	7	27,9	7	22,7
8	28,7	8	26,9	8	25,9
9	28,2	9	23	9	28,7
10	35,4	10	21,4	10	26,2
11	25,6	11	21,8	11	20,5
12	25,9	12	23,1	12	21,5
13	24	13	25,9	13	31,2
14	24,5	14	22	14	38,3
15	23,8	15	22,4	15	25,1
16	25,8	16	25,2	16	27,9
17	22,5	17	23,2	17	28,5
18	33,9	18	21,1	18	31,8
19	23,1	19	22,5	19	26,9
20	22,4	20	21,2	20	25
21	23,4	21	22,6	21	19
22	21,1	22	24,7	22	17,3
23	24,3	23	24,8	23	26,9
24	21,1	24	20,1	24	24,6
25	22,6	25	24	25	19,5

R390-020A20-11M

ISCARHCE 012-A-L120-C12

GARANT 215 157 32/3

Как видно из графиков (рис. 6.) с увеличением повторений смены инструмента время уменьшается, что будет вести к уменьшению простоев оборудования.

Подставляя полученные результаты в формулу:

$$T = \frac{(1 - m) \cdot t_{см} \cdot C_{И}}{m \cdot (2,55C_{\beta} + 2,55C_{\alpha} + 1,39C_{\gamma})}$$

Можно будет судить о величине экономически обоснованной стойкости инструмента.

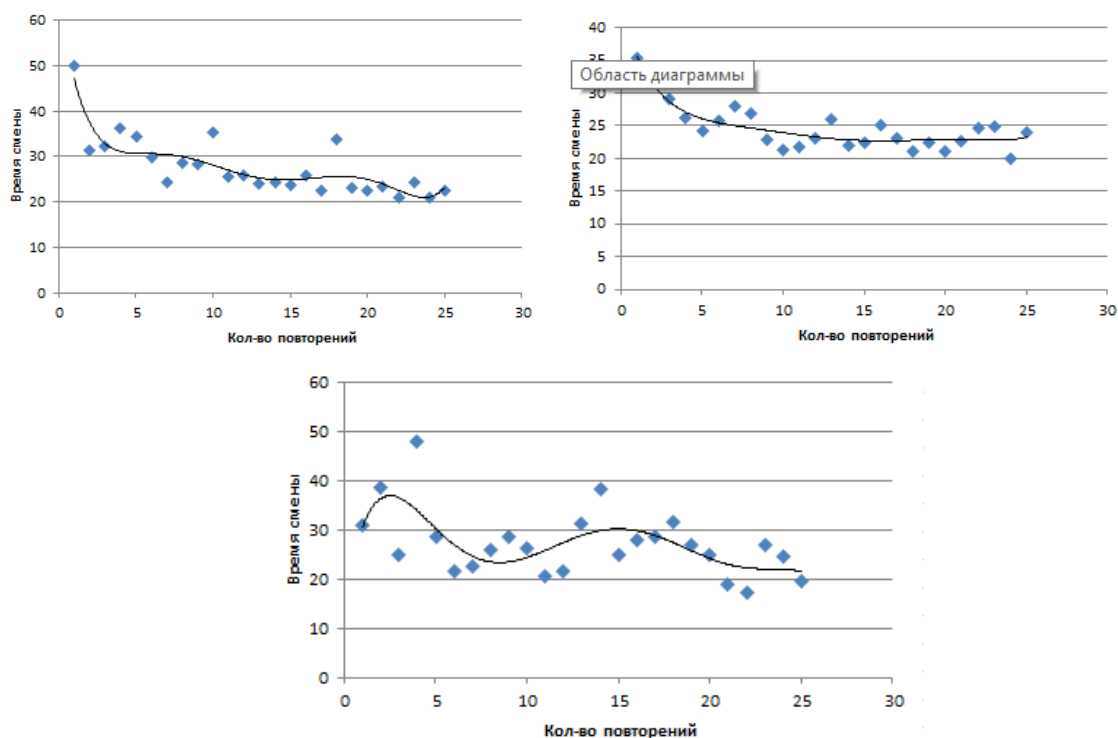


Рис. 6. Линии тренда, построенные по результатам эксперимента

### Список литературы

[1] *Петрушин С.И.* Экономически обоснованный срок службы режущих инструментов // Вестник машиностроения. — 2007. — №4. — С.40–46.

[2] *Грановский Г.И.* О стойкости инструмента как исходном параметре для расчета режимов резания // Вестник машиностроения. — 1965. — №8. — С.59–63.

[3] *Новожилов В.И.* Методика выбора экономически оптимальных режимов резания металлов. — Л.: Знание, 1966. — 66 с.

[4] *Грановский Г.И.* Резание металлов. — М.: Высш. шк., 1985. — 304 с.

**Шулепов Кирилл Андреевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: shulepoffkirill@yandex.ru

**Научный руководитель: Зенкин Николай Васильевич.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m1@bmstu-kaluga.ru

И.А.Колесников

## ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ КОНТУРНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

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

Значительная часть изделий современного машиностроения и технологической оснастки для объемного формообразования деталей из металлов, пластмасс и резины имеет сложные криволинейные поверхности. Они характерны для изделий со сложной аэро- и гидродинамикой, бытовой техники, художественного литья и изделий, имеющие эргономические формы, диктуемые условиями эксплуатации. В некоторых случаях детали с такими поверхностями определяют вид и форму соединения или стыка, в других – определяют внешний вид и в большей степени несут эстетическую нагрузку.

Шероховатость сложных поверхностей оказывает влияние на эксплуатационные свойства изделий и качество изделий, получаемых с применением технологической оснастки, используемых в различных процессах формообразования. Исследованиям качества поверхностного слоя при обработке деталей на металлорежущем оборудовании, в частности, фрезерном, и установлению связей между параметрами шероховатости и режимами резания посвящено огромное количество различных работ и научных исследований.

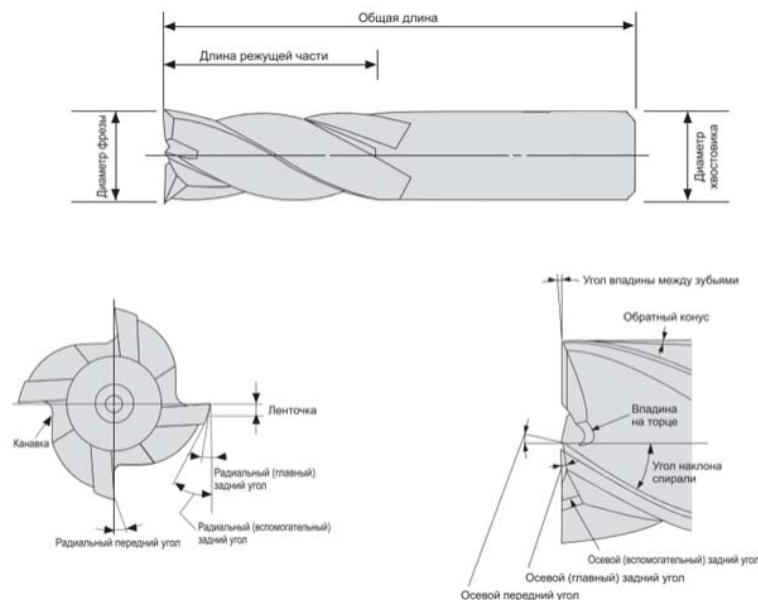


Рис.1. Типовая конструкция концевой фрезы

При фрезерной обработке наружных и внутренних контуров деталей в основном применяются так называемые концевые фрезы (рис.1), работающие своей наружной цилиндрической и торцевой поверхностями; также

они могут применяться при механической обработке плоских поверхностей в различных углублениях, пазах и выемках.

Концевая фреза представляет собой универсальный инструмент для обработки, связано это непосредственно с её конструктивными особенностями, которые объединяют в себе конструктивные особенности: сверла, токарного резца, а так же цилиндрической и торцевой фрезы.

В процессе прохода по контуру концевая фреза на участке внутреннего радиусного сопряжения подвергается действию скачкообразной, а также многократно возрастающей силы. Инструмент практически останавливается; при этом изменяется направление его подачи (рис.2).

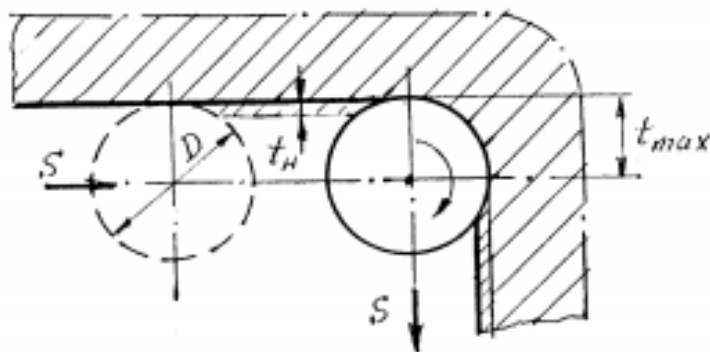


Рис. 2. Схема обхода радиусного сопряжения концевой фрезой

Из-за этого происходит резкое изменение глубины резания от номинального значения  $t_{н} (0,2 \dots 1$  мм до предельного значения, равного радиусу фрезы  $t_{max} = 0,5D$ . Резкое увеличение силы резания провоцирует отжим фрезы от обрабатываемой детали и образование на ее поверхности погрешностей формы в виде уступов и подрезов. Также при такой ситуации может произойти и поломка инструмента, что означает возникновение аварийной ситуации, а также получение бракованной детали. Наихудшее качество обрабатываемых поверхностей получается при обработке лишь одной режущей кромкой, так как в таком случае имеет место повышенное биение фрезы.

Однако помимо возникновения погрешностей формы детали от работы цилиндрической части фрезы, возникает неодинаковость штрихов шероховатости на плоской поверхности детали при фрезеровании скруглений и различных криволинейных поверхностей по их контуру. При обходе радиусного сопряжения, на участке плоской поверхности, находящейся ближе к скруглению, следы шероховатости появляются чаще, чем на участке, находящемся дальше от него, что обусловлено более частым касанием зубьями фрезы плоской поверхности на данном участке. Целью работы является исследование данного явления, которое будет достигаться с помощью теоретических исследований и проведения эксперимента на обрабатывающем центре MiniMill450. Также по завершении работы будет сделан вывод о величине практической ценности исследования данного явления.

### Список литературы

[1] *Баринов А.В., Платонов А.В., Бегаева Е.Г., Самсонов И.С., Любомиров А.С.* Исследование качества обработки поверхностей деталей на вертикально-фрезерном станке концевыми фрезами. – НГТУ им. Р.Е.Алексеева, Арзамас.

[2] *Каталог DEREK 2017* Инструмент и оснастка для станков [Электронный ресурс ]. -Режим доступа: <http://lab2u.ru/katalog-derek-2017-instrument-i-osnastka-dlia-stankov-str-c26-0229-lab2u.html>, свободный.

[3] *Контурная обработка – фрезерование периферией* [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/-/milling/application\\_overview/shoulder\\_milling/edging/pages/default.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/-/milling/application_overview/shoulder_milling/edging/pages/default.aspx), свободный.

[4] *Лебедев Л.В., Мнацаканян В.У., Схиртладзе А.Г.* Технология машиностроения. Учебник для вузов. М.: Академия, 2009.

[5] *Островский М.С., Мнацаканян В.У., Тимирязев В.А.* Программирование обработки деталей горных машин на станках с ЧПУ. Учебное пособие, Горная книга, М. 2009 г.

[6] *Радзевич С.П.* Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ. – К.: Вишашк., 1991. – 192 с.

**Колесников Игорь Алексеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [koles.igor96@gmail.com](mailto:koles.igor96@gmail.com)

**Научный руководитель: Малышев Евгений Николаевич.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [m1@bmstu-kaluga.ru](mailto:m1@bmstu-kaluga.ru)



И.А. Шведов

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ**

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

Существует три основных метода лазерной резки: сублимационная, резка плавлением и газокислородная резка. Сублимационная характеризуется испарением материала в процессе резания под действием лазерного луча. Для обеспечения минимальной ширины прорези, мощность излучения должна быть высокой, чтобы снизить потери на теплопроводность. В данном методе характерно использование следующих газов: азот (N<sub>2</sub>), гелий (He), аргон (Ar). Результатом сублимационной резки являются: гладкие кромки реза, минимальное термическое воздействие на материал, отсутствие окисления реза. К минусам относят невысокую скорость резки и ограничение по толщине материала до 1 мм. Этим методом производят резание различных материалов, которые имеют достаточно высокую теплоустойчивость. Процесс характеризуется переходом металла в расплавленное состояние в области образующейся прорези, после чего расплав удаляется струей инертного газа (аргон, азот). Этот способ позволяет применять более высокие скорости резки, т. к. не требуется испарение материала. Выбором применяемого газа можно предотвратить окисление кромок реза. Лазерная резка плавлением с подачей газа под давлением свыше 6 бар позволяет увеличить скорость удаления расплавленного материала из прорези, что предотвращает образование заусенцев и прилипание шлаков к кромкам реза. В качестве газа используется азот, предотвращающий окисление кромок. Лазерная резка плавлением с высоким давлением газа используется в основном для нержавеющей стали и сплавов алюминия. Газокислородная резка отличается от резки плавлением тем, что расплавленный материал удаляется из зоны резки струей кислорода. В результате взаимодействия кислорода с расплавленным и частично испарившимся металлом в несколько раз увеличивается подвод энергии к зоне взаимодействия лазерного луча и заготовки. К достоинствам газокислородной резки можно отнести возможность разделения листов металла с большой толщиной, высокую скорость обработки. Есть и недостатки этого метода – кромка реза имеет существенные неровности и окисляется, что создает необходимость последующей обработки. Этот процесс используется для разделения только металлов.

На достижение желаемых результатов при обработке материала лазерной резкой влияют параметры лазера, режимы обработки, параметры заготовки и машинные параметры. К параметрам лазера относятся: мощность лазера, частота следования импульсов, распределение удельной

мощности, постоянство мощности, поперечное сечение луча, расходимость, поляризация. Режимы обработки включают в себя: скорость резки, вид газа, давление газа, положение фокуса. К параметрам заготовки можно отнести толщину заготовки, материал, геометрию заготовки, поверхность заготовки. Машинные параметры определяются зеркалом для вывода энергии лазерного агрегата, положением луча, астигматизмом, отклоняющим зеркалом, фокусирующей линзой, регулировкой лазерного луча относительно сопла, отверстием сопла. Далее кратко рассмотрены некоторые вышеперечисленные параметры. Выбираемая мощность лазера зависит от обрабатываемого материала, толщины заготовки, требуемых результатов обработки. Так для достижения высокой точности при сложной геометрии заготовки или в случае наличия тонких перемычек необходимо уменьшить мощность лазера переходом на импульсный режим. В случае разделения конструкционной стали с толщиной заготовки более 8 мм требуется мощность лазера выше 1000 Вт. Важное значение имеет и постоянство мощности лазера в течение всего времени обработки заготовки. Этот параметр влияет на стабильность результата резки.

Частота следования импульсов зависит от задач обработки. При резке небольших контуров или при врезании в режиме ступенчатой мощности рекомендуется небольшая частота следования импульсов. Чем больше диаметр лазерного луча, тем меньше получаемый фокальный диаметр и, следовательно, меньше ширина реза.

Фокальный диаметр зависит от фокусного расстояния применяемой фокусирующей линзы. При совпадении плоскости поляризации луча с плоскостью резки показатели скорости и качества резки повышаются. В этом случае на передней поверхности реза происходит наиболее высокое поглощение излучения. Если плоскость поляризации перпендикулярна плоскости реза, то происходит поглощение излучения боковыми поверхностями реза. Скорость и качество резки могут значительно различаться в зависимости от изменения направления перемещения оптического резака при вырезке фигурных деталей. Для обеспечения наибольшей эффективности резки целесообразно плоскость поляризации луча с помощью специального устройства автоматически поворачивать при изменении направления резки, чтобы она совпадала с плоскостью резки. Хорошие результаты могут быть достигнуты в результате превращения линейно поляризованного излучения в излучение с круговой поляризацией с применением фазовращающего зеркала, которое устанавливают перед входом в оптический резак.

Скорость резки зависит от материала и толщины заготовки. Сильно завышенная или заниженная скорость резки может привести к повышенной шероховатости, образованию заусенцев, проплавлениям. Чем толще заготовка, тем меньше должна быть скорость перемещения лазерного луча.

В случае обработки материалов с использованием газа требуемый результат резки определяет вид применяемого газа. Так, например, при обра-

ботке такого горючего материала, как древесины, нельзя использовать кислород. Для металла тоже нельзя применять кислород из-за окисления кромок реза. Большое значение имеет качество применяемого газа. Из-за наличия в кислороде воды и азота на кромках реза могут образовываться заусенцы.

Давление газа зависит от толщины заготовки материала. При газовой резке тонкие заготовки из металла разделяются лучше под большим давлением, чем толстые заготовки. Это компенсирует недостаток кислорода при больших скоростях резки. При резке высокого давления толстые заготовки используют большое давление газа, чтобы удалить расплавленный материал из прорези. При кислородной резке давление газа уменьшается с увеличением толщины заготовки. Результат резки зависит и от положения фокуса.

Еще одним параметром, влияющим на качество резки, является геометрия заготовок. Так, например, наличие острых углов, перемычек, небольших отверстий (диаметр меньше удвоенной толщины листа) вызывают сложности при резке. Обработка этих элементов проводится с уменьшенной скоростью резания, уменьшенной мощностью излучения, низкой частотой следования импульсов.

### Список литературы

[1] *Закалюкина Л.А., Баннов В.Я.* Виды и параметры процесса лазерной резки. ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет». Новые информационные технологии в автоматизированных системах – 2016. (<https://e.lanbook.com>)

[2] *Сыздальцев Ю.* Лазерная и плазменная резка металлов. Фотоника - 2011г. №3 (<https://e.lanbook.com>)

[3] *Анисимова М.А., Князева А.Г.* Модель кислородной резки. Физика горения и взрыва - 2016г. №1 (<https://e.lanbook.com>)

[4] *Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н.* Химико-термическая обработка металлов. Учебное пособие для вузов. М., «Металлургия», 1985г.

[5] *Рыбаков В.М.* Сварка и резка металлов - Москва: Высшая школа, 1979 - с.214

**Шведов Иван Александрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана.  
E-mail: [shvedov.vania2017@gmail.com](mailto:shvedov.vania2017@gmail.com)

**Научный руководитель: Аракелян Самвел Абрамович.** Преподаватель КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана. E-mail: [Samvel.Org@mail.ru](mailto:Samvel.Org@mail.ru)

В.В.Бураков

## **ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТОЧНОСТЬ УСТАНОВКИ ЗАГОТОВКИ В ПРИСПОСОБЛЕНИИ**

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

При установке заготовок неизбежно образуются различного вида погрешности. Под погрешностью установки понимается отклонение фактически достигнутого положения от требуемого в процессе базирования и закрепления. Погрешность установки включает.[1]

- погрешность базирования;
- погрешность, вызванную силами закрепления;
- погрешность установки.

В нашей научной работе нас в большей степени интересует погрешность, вызванная силами закрепления, поэтому разберем ее подробнее.

Под погрешностью, вызванной силами закрепления, понимается разница между максимальным и минимальным перемещением измерительной базы вдоль обеспечиваемого размера под действием силы закрепления.

Наибольшее влияние на точность установки заготовки в приспособлении оказывает упругая деформация ее звеньев, через которые передается сила закрепления. При этом деформации сжатия заготовки и деталей приспособления сравнительно малы, а наибольшую величину имеют перемещения в стыке между заготовкой и установочными элементами.

Зависимость контактных деформаций для стыка: заготовка – опора приспособления выражается нелинейным законом [2]:

$$y = CQn ,$$

Данные перемещения зависят от конструктивных параметров установочных элементов, таких как радиус установочных элементов, их материал, твердость, площадь контакта, механические свойства материала заготовки и т.д. Все вышеперечисленные конструктивные параметры влияют на упругие деформации, которые в итоге приводят к изменению положения заготовки.

В справочнике [3] приведены значения коэффициента  $C$  только для заготовок из стали и чугуна. Следовательно, необходимо провести исследования для других материалов.

Для определения коэффициентов  $C$  и  $n$  для заготовок из алюминиевого сплава, устанавливаемых на опоры сферического типа, необходимо выполнить экспериментальные исследования.

Для эксперимента необходимо учесть такие факторы, как радиус установочных элементов, твердость заготовки, сила закрепления.

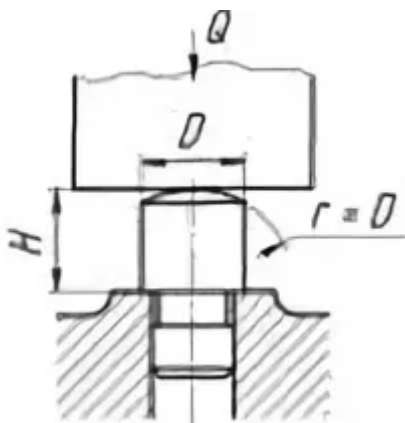


Рис. 1. Факторы, влияющие на контактные деформации

### Список литературы

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

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

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

**Бураков Виктор Викторович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЗАО Вольво Восток. E-mail: bereg844@mail.ru

**Научный руководитель: Вяткин Андрей Геннадьевич.** КФ МГТУ им Н.Э. Баумана. E-mail: and-vyatkin@mail.ru

## **СЕКЦИЯ 2.**

# **ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Е.И. Грибовский, Н.Н. Максимов, Е.А. Харченкова

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ЭФФЕКТА ШУНТИРОВАНИЯ СВАРОЧНОГО ТОКА ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ**

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

Алюминий и его сплавы обладают свойствами, выгодно отличающими их от других металлов. Это легкие материалы с плотностью 2,5-2,8 г/см<sup>3</sup>, примерно в три раза меньшей, чем у железа, меди или цинка. Но при этом они обладают высокой прочностью, электропроводностью и коррозионностойкостью [1].

Увеличение объема использования алюминия и его сплавов в различных отраслях промышленности приводит к возрастанию потребности в технологиях, обеспечивающих качественные сварные соединения изделий из данных материалов.

Одним из распространенных способов получения неразъемных соединений алюминиевых деталей является точечная контактная сварка. Она обеспечивает высокую производительность, стабильное качество сварных соединений, низкую себестоимость, отвечает современным санитарно-гигиеническим требованиям.

Однако при этом способе возникают затруднения, обусловленные химическими, теплофизическими и механическими свойствами алюминия, а именно: химической активностью, высокой тепло- и электропроводностью, низкой прочностью и сопротивляемостью деформации при температурах 400-600°С, высоким коэффициентом теплового объемного расширения [3].

В данной работе рассматриваются пути решения проблемы повышения качества сварных соединений на примере кронштейна, выполненного из сплава АМц. Кронштейн (рис. 1) представляет собой конструкцию, состоящую из пластины толщиной 0,8 мм к которой приваривают 4 скобы из того же сплава.

Такая конструкция в сочетании с высокими требованиями к качеству соединений в значительной степени усложняет технологию процесса контактной точечной сварки.

Основные методы решения проблемы получения качественных соединений при сварке излучателя описаны в работе [2]. Представленные исследования посвящены решению проблемы шунтирования сварочного тока обусловленного конструктивными особенностями кронштейна (рис. 2) и относительно низким значением удельного электрического сопротивления ( $\rho_0$ ) алюминиевого сплава АМц ( $4,3 \div 6,0 \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 10^8$ ), высокой теплопроводностью ( $\lambda=101 \div 133 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$ ) и сводятся к решению нескольких основных

задач определяемых особенностями конструкции детали и свойствами алюминия.

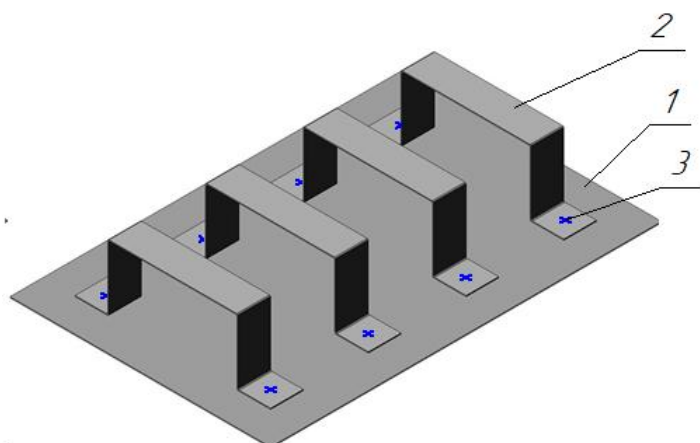


Рис. 1. Кронштейн: 1 – пластина, 2 – скоба, 3 – сварочные точки

Высокие теплофизические свойства алюминия затрудняют тепловыделение в зоне соединения при точечной контактной сварке[2]. При достижении температуры плавления и формировании литого ядра в контакте деталь-деталь температура в контакте между электродом из БрХ и наружной поверхностью деталей из АМц достигает значений 420-480°C. При такой температуре предел прочности алюминиевых сплавов резко снижается и, как следствие, формируется отпечаток от электрода с деформацией более 15-20% от толщины деталей, вызванный не только сварочным давлением, но и тепловым расширением материала деталей под электродами при формировании литого ядра.

Учитывая характерное для детали распределение тока (рис. 2), при котором через контакты электрод-деталь протекает весь ток вторичного контура равный сумме тока шунтирования и сварочного, формирующего сварные точки, можно в значительной степени понизить тепловыделение в контактах электрод-деталь уменьшив ток шунтирования ( $I_{шунт}$ ) и снизив этим общую величину тока в контактах электрод-деталь ( $I_2$  рис. 2). Для этого в конструкции приспособления целесообразно разместить магнитопровод охватывающий скобы с током шунтирования (рис.2).

В этом случае токи шунтирования можно свести до ничтожно малого значения, посредством разъемных дросселей. Если разъемный железный сердечник надет на скобы, то он становится одновитковым дросселем, через который идет ток  $I_{ш}$  (рис. 2). Коэффициент самоиндукции такого дросселя определяется по формуле:

$$L = 4\pi n^2 \mu S_{жс} / l_{жс}, \quad (1),$$

где  $n$  – число витков ( $n=1$ );  $S_{жс}$  – площадь сечения активного железа сердечника;  $l_{жс}$  – длина средней магнитной линии по сердечнику.



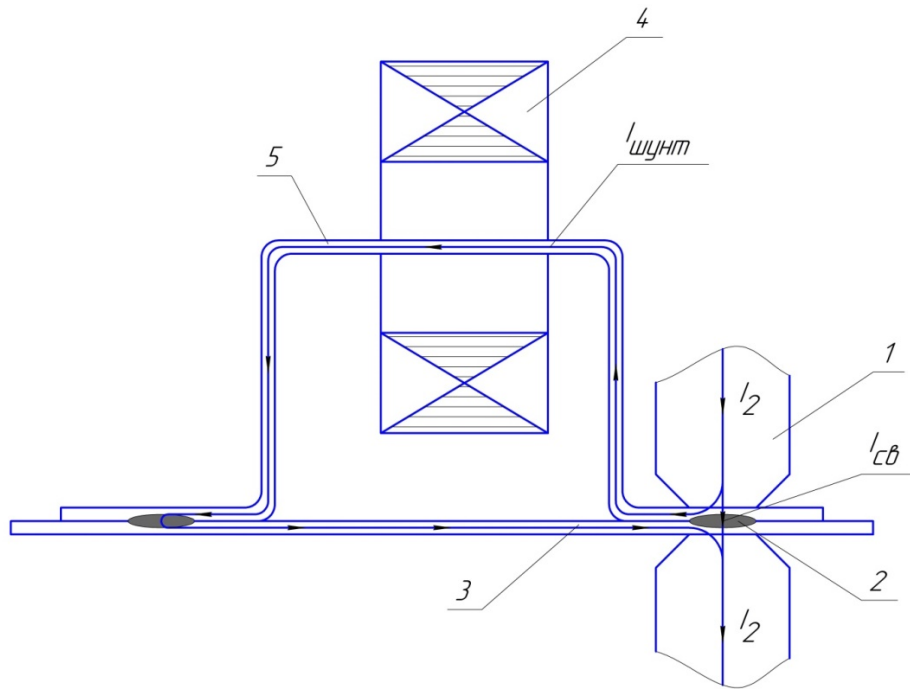


Рис. 2. Схема протекания тока при сварке кронштейна и измерения тока вторичного контура  $I_2$  и  $I_{шунт}$ ;  
 1 – электроды БрХ, 2 – литое ядро  $643^\circ\text{C}$ ; 3 – пластина;  
 4 – магнитопровод; 5 – скоба

Если положить, что максимальная индукция, допустимая в сердечнике,  $B = 1,8 \cdot 10^4$  Тл, то, поскольку:  $B = \mu H$ ;  $H = I / u$ , получаем:

$$\mu = 1,8 \cdot 10^4 u / I_{ш}, \quad (2),$$

где  $u = 2(h_s + \delta)$  – периметр проводящего контура ветви шунтирования.

При этом индуктивное сопротивление одновиткового дросселя:

$$X_{др} = \frac{2\pi f 4\pi n^2 1,8 \cdot 10^4 u S_{жс}}{I_{ш} l_{жс} 10^9}, \quad (3),$$

где  $n$  – число витков;  $S_{жс}$  – сечение магнитопровода;  $l_{жс}$  – длина средней-магнитной линии в сердечнике [4].

Для нормальной частоты 50 Гц:

$$X_{др} = \frac{72 S_{жс} 10^3}{I_{ш}} 10^{-6}, \quad (4),$$

где  $S_{жс}$  – в  $\text{см}^2$ ;  $x_{др}$  – в Ом.

Если напряжение в контактах электрод-деталь концах  $U_{он}$ , то следует обеспечить посредством дросселя:

$$U_{он} = I_{ш} x_{др}, \text{ тогда } \frac{I_{ш} 72000 S_{жс}}{I_{ш} 10^6} = U_{он}. \quad (5).$$

Отсюда сечение магнитопровода дросселя:

$$S_{жс} \approx 14 U_{он}. \quad (6).$$

В этой расчетной формуле  $S_{жс}$  – в см<sup>2</sup>;  $U_{он}$  – в В.

Описанное технологическое решение и прием были применены при конструировании лабораторной установки и приспособления (с магнитопроводом) для сборки и сварки излучателя.

Величину тока в сварочном контуре  $I_2$  и тока шунтирования  $I_{шунт}$  (рис. 2) измеряли с помощью индуктивного датчика (пояса Роговского) и цифрового осциллографа по амплитудным значениям соответствующих импульсов соответствующих электрических цепей ( $I_2$  и  $I_{шунт}$ , рис. 2). Анализ измеренных величин тока шунтирования без магнитопровода и с магнитопроводом (рис. 2) показал, что конструирование сборочно-сварочного приспособления с учетом размещения магнитопровода позволяет уменьшить ток шунтирования со значения равного  $16 \div 18$  кА до величины порядка  $2 \div 3$  кА. Что в свою очередь обеспечило уменьшение тока вторичного контура и тока сварки на соответствующую величину. Дальнейший технологический прием обеспечил меньший нагрев в контактах электрод-деталь и способствовал снижению степени деформации от электрода (глубины отпечатка) до  $5 \div 7\%$  и удовлетворить конструкторско-технологические требования к изделию.

### Список литературы

[1]. Банов М.Д. Технология и оборудование контактной сварки, М.: «Академия», 2009. – 224с.

[2]. Максимов Н.Н., Сергеев В.Ю. Совершенствование технологического процесса контактной сварки деталей из алюминиевых сплавов, «Научно-практический электронный журнал Аллея Науки» №10 2017.

[3]. Максимов Н.Н., Белобородов А.С., Осипова М.В., Кишкин А.Е. Опыт применения контактных машин переменного тока для сварки алюминиевых сплавов, НТК. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. -38с.

[4]. Кочергин К.А. Сварка давлением, Л.: Машиностроение, 1972. – 155с.

**Грибовский Егор Ильич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: eg.gribovskiy@gmail.com

**Максимов Николай Николаевич** – доцент кафедры "Сварка и диагностика", канд. техн. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstu-kaluga.ru

**Харченкова Елена Александровна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: elenka23811@gmail.com

**Научный руководитель: Максимов Николай Николаевич.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstukaluga.ru

Е.А. Харченкова, Н.Н. Максимов

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

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

Камера сгорания является одним из основных узлов газотурбинного двигателя (ГТД) и в значительной мере влияет на экономичность, надежность, долговечность двигателя в целом, а также определяет степень его воздействия на окружающую среду. По сравнению с другими узлами ГТД камера сгорания отличается многообразием и сложностью рабочего процесса. Камера сгорания является наряду с турбиной одним из ресурсоограничивающих элементов ГТД, в связи с этим разработка методов диагностики, позволяющих на основе моделирования по замеренным параметрам оценить состояние элементов основной и форсажных камер сгорания, а также спрогнозировать возможный дефект и его развитие, является актуальной задачей.

Дефекты деталей камеры сгорания могут быть вызваны причинами технологического характера (сварочные трещины и поры, остаточные напряжения в материале, изменение структуры при термической обработке). При разрушении корпуса основной камеры сгорания происходит резкое повышение давления в мотогондоле или фюзеляже ЛА, деформация и локальный перегрев конструкции. Возникновение и развитие повреждений жаровых труб при циклических изменениях температуры в значительной степени зависит от физико-механических характеристик используемых материалов: коэффициента теплопроводности, коэффициента термического расширения, предела длительной прочности. Повреждение жаровой трубы может также возникнуть из-за неравномерного нагрева стенок вследствие нарушения характера распыла топлива отдельными форсунками. Нарушение характеристик распыла форсунок вызывает местный перегрев стенок камеры сгорания, что проявляется в выпучивании, растрескивании, повышенном окислении материала стенки. Ухудшение распыла топлива форсунками может быть связано с закоксовыванием форсунок, образованием нагара на форсунках или их засорением. Коксование рабочих коллекторов и форсунок вызывается локальной более высокой температурой нагрева элементов конструкции (из-за неравномерности параметров обтекающего их компрессорного воздуха, неравномерности лучистых потоков от зоны горения, отклонений размеров). Повреждения деталей соединений элементов камер сгорания (форсунки и завихрителя, элементов крепления жаровой трубы и коллекторов к корпусу, газосборника и корпуса соплового аппарата первой ступени турбины). На поверхностях контактирующих дета-

лей в этих соединениях часто наблюдается повышенный износ, следы фреттинг-коррозии, мелкие трещины. В результате в соединениях появляются зазоры, перетекание воздуха и газов, возникают вибрации, приводящие к наклепу контактирующих поверхностей и к быстрому разрушению элементов соединений. Повреждение и разрушение элементов конструкции форсажных камер происходит в результате действия дополнительного повышения температуры газа, нарушений в системе охлаждения и вибрационного горения в форсажной камере. Источниками дополнительного подвода тепла (повышения температуры корпуса камеры сгорания) являются течи топлива или гидросмеси. Прогар корпуса форсажной камеры происходит независимо от того, где возникла течь, внутри камеры или снаружи. Горение дополнительного неорганизованного источника топлива внутри нарушает систему предохранения корпуса от перегрева (прогорают или коробятся экраны форсажной камеры). Горение топлива или масла снаружи камеры приводит к дополнительному разогреву вместо теплосъема с поверхности корпуса камеры и, как следствие, происходит перегрев материала. Усталостные повреждения, как правило, возникают в местах резкого изменения формы деталей и вблизи сварочных швов (на ребрах и кольцах стабилизаторов, в местах крепления стабилизатора, на стабилизаторах, тягах их крепления, на антивибрационном экране, на створках, на обтекателях, наружных и внутренних стенках диффузоров и т.д.). Если внутренние поверхности форсажной камеры имеют защитное покрытие, то на нем возможны следы местного перегрева, растрескивание, сколы. Повреждение и разрушение деталей и стенок форсажной камеры при вибрационном горении форсажного топлива происходит в зонах стабилизации пламени при больших степенях форсирования двигателя и повышенных скоростях полета. Вибрационное горение сопровождается колебаниями газового столба в форсажной камере, возбуждаемыми колебаниями фронта пламени при периодических изменениях местных составов топливовоздушной смеси. Это явление связано с неравномерностью параметров потока на входе в камеру, местными переобогачениями смеси у кромок стабилизаторов пламени и с неправильной настройкой регулятора форсажа, дающей повышенный расход топлива, или с чрезмерным открытием створок регулируемого сопла.

Для моделирования рабочего процесса в камере сгорания применяется достаточно большое число методов [3,4], однако для целей диагностики могут быть использованы далеко не все. В данной статье анализируется возможность применения модульного метода и численных методов трехмерного моделирования течений, горения и теплообмена. Вероятной причиной этого является неудовлетворительное распределение охлаждающего воздуха в тракте охлаждения, связанное с нарушением геометрией проточной части этого тракта вследствие коробления экранов. При обнаружении

подобного скачка во время термометрирования на работающем двигателе, необходимо воспроизвести подобное явление в имитационной модели, путем корректировки распределения воздуха под экранами (изменяя проницаемость экранов, высоту тракта охлаждения, загромождение проточной части, а значит и перепад давления на экране) и выявить причину отклонения. Возможны два пути использования систем имитационного моделирования. Первый - превентивное моделирование различных отказов и формирование базы знаний по их признакам – параметрам, фиксируемым измерительными приборами (значениям температур и давлений в контрольных точках). При наступлении признаков отказа (отклонения значений параметров в контрольных точках от номинальных) подбирается наиболее подходящая модель ситуации из базы знаний и по ее исходным данным определяется дефект. Преимущество данного метода - быстрое выявление дефектов и их предпосылок, недостаток – большой объем базы знаний, а значит и длительный процесс ее формирования. Второй путь предусматривает создание математической модели и проведение расчетного исследования после наступления события-предвестника дефекта – отклонения контролируемых параметров от нормы. Математическая модель с помощью задания начальных условий настраивается так, чтобы на выходе получились зафиксированные параметры рабочего процесса. Преимущество данного подхода - отсутствие предварительного моделирования, недостаток - необходимость затрат дополнительного времени на создание модели после отказа или появления признаков его формирования. Первый путь оптимален для изделий, выпущенных в большом количестве, а второй - для опытных партий. Из вышеизложенного можно сделать вывод, что существует возможность использования систем имитационного моделирования для предупреждения и выявления дефектов. Использование готовых моделей позволяет на ранней стадии выявлять зарождающиеся дефекты по признакам, полученным в результате имитационного моделирования.

Аналогичная технология может быть использована и для основной камеры сгорания. Одним из наиболее информативных факторов, позволяющим судить о наличии неисправности элементов камеры сгорания, является температурное поле в ее выходном сечении. Ряд дефектов камер (прогары и коробления жаровой трубы, оплавление и растрескивание кромок отверстий, коксование форсунок и их разрушение, деформация элементов подвески жаровой трубы и др.) вызывает изменение распределения температуры газа в выходном сечении камеры. Для исследования влияния конкретных дефектов на выходное температурное поле камеры сгорания и изучения изменений, вносимых в это поле с учетом прохождения через турбину, помимо натуральных экспериментов может с успехом применяться численное моделирование газодинамических и тепловых процессов. Такое моделирование осуществляется на основе программных комплексов вычислительной гидрогазодинамики (ПК CFD). Применительно к конкретной

камере, верификация должна быть выполнена заново для другого уровня и соотношения параметров и другого соотношения размеров. По результатам верификации делается вывод об адекватности применяемых моделей и пригодности использования данного ПК CFD для решения задач моделирования и диагностирования. Положительные результаты верификации задачи распространения одиночной струи в поперечном потоке, в существенной степени влияющего на формирование температурного поля, дают возможность перейти к моделированию процессов в зоне разбавления и газосборнике. Возникновение отрыва потока вследствие погрешностей изготовления деталей, деформации элементов при работе, изменения параметров на входе в камеру может привести появлению неравномерности распределения скоростей и температур и стать причиной дефекта (например, прогар жаровой трубы при локальном изменении условий охлаждения). Моделирование процессов в камере сгорания в целом включает в качестве основной составляющей моделирование процесса турбулентного горения. Некоторые теоретические и методические основы моделирования горения в камерах ГТД изложены в монографии [8]. Верификационные задачи для моделирования горения с целью диагностики необходимо решать с учетом химического состава конкретного топлива, конструктивных особенностей камеры сгорания и значений газодинамических параметров на входе.

### Список литературы

- [1] *Сиротин Н.Н.* Конструкция и эксплуатация, повреждаемость и работоспособность газотурбинных двигателей. Москва, РИА "ИМ-Информ" 2002 г. - 441 с.
- [2] *Пчелкин Ю.М.* Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Москва, Машиностроение 1984 г. - 280 с.
- [3] *Мингазов Б.Г.* Камеры сгорания газотурбинных двигателей Учебное пособие, Казань, Изд-во КГТУ, 2008.
- [4] *Харитонов В.Ф.* Проектирование камер сгорания – Уфа, УГАТУ, 2008, 138 с. Гребенюк Г.П., Кузнецов
- [5] *Харитонов В.Ф.* Исследование температурного поля на выходе камеры сгорания с поворотом потока в газосборнике - Вестник СГАУ, 2006 г, №1(9), с 48-53.
- [6] *Гиришович Т.А.* Турбулентные струи в поперечном потоке. - М.: Машиностроение. 1993.- 256 с.
- [7] *Кузнецов С.Ю., Катасонов И.А., Харитонов В.Ф.* Моделирование газодинамических процессов во фронтных устройствах и зонах разбавления камер сгорания ВРД // Материалы доклада на отчетной конференции по подпрограмме “Транспорт” Минобразования РФ – М., изд. МАИ, 2001, с. 32-33.

[8] *Куценко Ю.Г.* Численное моделирование оценки эмиссионных характеристик камер сгорания ГТД – Екатеринбург-Пермь, изд-во УрО-РАН, 2006, 140 с.

**Харченкова Елена Александровна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [elenka23811@gmail.com](mailto:elenka23811@gmail.com)

**Максимов Николай Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Сварка и диагностика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [m2kf@bmstukaluga.ru](mailto:m2kf@bmstukaluga.ru)

**Научный руководитель: Максимов Николай Николаевич.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [m2kf@bmstukaluga.ru](mailto:m2kf@bmstukaluga.ru)

А.В. Дымов, Г.В. Орлик, А.Г. Орлик

## **АНАЛИЗ СПОСОБОВ НАПЛАВКИ**

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

Наплавка на деталь металла позволяет не только восстановить первоначальные свойства изделия, но и придать ему совершенно новые ценные качества.

Наплавкой называется процесс нанесения одного расплавленного металла (называемого присадочным) на поверхность другого (называемого основным). При этом основной металл также расплавляется на небольшую глубину для образования гомогенного соединения. Цель наплавки может быть различной: восстановление утраченной геометрии детали или придание ей новой формы, образование поверхностного слоя с заданными физико-механическими свойствами (такими как повышенная твердость, износостойкость, антифрикционность, коррозионная стойкость, жаростойкость и пр.), упрочнение наплавкой.

Наплавку можно производить на любые поверхности - плоские, конические, цилиндрические, сферические. В больших пределах может меняться и ее толщина - от нескольких долей миллиметра до сантиметра и более.

### **Основные принципы наплавки**

В основных своих моментах технология наплавки сходна с технологией сварки. Перед ней стоят те же задачи, что и перед сваркой - защита наплавляемого металла от газов, содержащихся в воздухе, получение плотного, без пор, трещин и посторонних включений металла шва. При наплавке следует соблюдать основные принципы, заключающиеся в ряде требований:

1) Необходимо стремиться к минимальному проплавлению основного металла.

2) Должно быть как можно меньшее перемешивание наплавленного металла с основным.

3) Нужно стараться достичь минимальных остаточных напряжений и деформаций в детали.

4) Необходимо снижать до приемлемых значений припуски на последующую обработку детали.

Применяются различные способы наплавки металла - электродуговая, газовая, электрошлаковая, индукционная, плазменная, импульсно-дуговая, вибродуговая, порошковая наплавки. Наибольшее распространение получила дуговая наплавка.

Материалы для наплавки существуют в различных формах. Это могут быть присадочные прутки, порошкообразные смеси, наплавочные покрытые электроды, порошковая и цельностержневая проволока. [1]



### **Наплавка покрытыми электродами**

Наплавка покрытыми наплавочными электродами относится к основным способам, применяемым как в промышленности, так и в быту, в силу ее простоты, удобства, отсутствия необходимости в специальном оборудовании. Выпускается большое количество марок электродов, создающих наплавочный слой с различными характеристиками, обеспечивающими требуемые качества изделий для работы в тех или иных условиях.

Наплавка требует определенных навыков в работе. Надо при минимальном токе и напряжении, чтобы не увеличивать долю основного металла в наплавленном, оплавить оба компонента. Состав металла будет определять тип электрода, а толщину и форму - диаметр электрода. Напряжение дуги определяет форму наплавленного валика, при его повышении увеличивается ширина и уменьшается высота валика, возрастает длина дуги и окисляемость легирующих примесей, особенно углерода. В связи с этим стремятся к минимальному напряжению, которое должно согласовываться с током дуги.

Детали из низкоуглеродистых и низколегированных сталей наплавляют обычно без предварительно нагрева. Но нередко требуется предварительный подогрев и последующая термообработка с целью снятия внутренних напряжений. Более детальные требования к наплавке сообщаются в документации на применяемые наплавочные электроды. После наплавки рекомендуется медленное охлаждение. Поверхность детали перед наплавкой очищается от масла, ржавчины и других загрязнений. [2]

### **Наплавка металлорежущего инструмента и штампов**

Металлорежущие инструменты и штампы, работающие при холодной и горячей штамповке, наплавляют электродами ОЗИ-3, ОЗИ-5, ОЗИ-6, ЦС-1, ЦИ-1М и прочие марки. Металл, наплавленный этими электродами, обладает высокой сопротивляемостью к истиранию и смятию при больших удельных нагрузках и высоких температурах - до 650-850°C. Твердость наплавленного слоя без термообработки составляет от 52 HRC (ОЗИ-5) до 61 HRC (ОЗИ-3). Наплавляется 1-3 слоя общей толщиной 2-6 мм. Деталь перед наплавкой подогревают до температуры 300-700°C (в зависимости от марки электрода).[3]

### **Наплавка нержавеющей сталей**

Для наплавки деталей из нержавеющей сталей применяются электроды ЦН-6Л, ЦН-12М-67 и прочие марки. Стержень этих электродов изготовлен из нержавеющей высоколегированной проволоки. Кроме высокой коррозионной стойкости, наплавленный металл имеет еще и устойчивость к задиранию, что позволяет использовать эти электроды для наплавки уплотнительных поверхностей в арматурных изделиях.

При использовании некоторых электродов для наплавки нержавеющей сталей, рекомендуется производить предварительный и сопутствующий

ший подогрев детали до температуры 300-600°C и осуществлять после наплавки термообработку.

### **Наплавка меди и её сплавов**

Наплавка меди и ее сплавов (бронз) может осуществляться не только на медное или бронзовое основание, но также на сталь и чугун. В этом случае создаются биметаллические изделия, имеющие необходимые эксплуатационные качества (высокую стойкость против коррозии, низкий коэффициент трения и прочие ценные свойства, присущие меди и ее сплавам) и обладающие при этом гораздо более низкой стоимостью в сравнении с деталями, изготовленными полностью из меди или ее сплавов.

Алюминиевые бронзы, в частности, обладающие высокими антифрикционными свойствами, очень хорошо работают в узлах трения, поэтому их наплавляют на червячные колеса, сухари и другие детали, работающие в условиях трения.

Наплавка деталей из технической чистой меди может производиться электродами "Комсомолец-100" или присадочными прутками из меди или ее сплавов. При наплавке меди на медь применяют предварительный подогрев до температуры 300-500°C.

Наплавка меди и ее сплавов производится постоянным током обратной полярности в нижнем положении.[4]

### **Наплавка в среде защитных газов**

Наряду с наплавкой покрытыми электродами, в домашних условиях можно осуществлять и наплавку в среде защитных газов - методом MIG/MAG (с автоматизированной подачей проволоки) или TIG (вольфрамовым электродом) с присадочными прутками. Для защиты можно применять различные газы: аргон, углекислый газ, гелий, азот - в зависимости от того, какой наплавляется металл.

При восстановлении наплавкой деталей из углеродистых сталей можно использовать более дешевый углекислый газ. Учитывая тот факт, что CO<sub>2</sub> окисляет расплавленный металл, наплавочная проволока в этом случае должна иметь раскислители (марганец, кремний и пр.).

Высоколегированные стали, сплавы на магниевой и алюминиевой основе наплавляются в аргоне, гелии или их смеси.

Наплавку неплавящимся вольфрамовым электродом осуществляют в аргоне и гелии. Вообще, инертные газы, особенно, аргон, являются универсальными, подходящими для сварки и наплавки практически любого металла.

В качестве материалов для наплавки полуавтоматами углеродистых и низколегированных сталей применяются сварочные проволоки сплошного сечения (Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-12ГС), и специальные наплавочные (Нп-40, Нп-50, Нп-30ХГСА). Для наплавки нержавеющей стали применяют проволоку из нержавеющей стали. Может осуществляться наплавка и порошковой

проволокой, позволяющей получить наплавленный слой с особыми свойствами.

### Список литературы

[1]. *Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П., Константинов В.М.*; Под ред. В.П. Иванова. Восстановление деталей машин: Справочник / - М.: Машиностроение. 2003. 672с.

[2]. *Бобров Г.В.* Нанесение неорганических покрытий. 2004.420с.

[3]. *Солнцев С.С.* Защитные покрытия металлов при нагреве.2009. 340с.

[4]. *Колганов Л.А.* Сварочные работы. Сварка, резка, пайка, наплавка; 2003. 305с.

**Дымов Антон Викторович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: dimow.anton@yandex.ru

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

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

**Научный руководитель: Орлик Геннадий Владимирович.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: G.V.Orlik@yandex.ru

Е.А. Харченкова, Н.Н. Максимов, Е.И. Грибовский

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЖАРОВОЙ ТРУБЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

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

В стадии охлаждения в зоне сварки возникает сложно напряженное состояние металла из-за несвободные усадки и действия усилия сжатия.

Характер распределения внутренних напряжений изменяется во времени, не только от усадки и внешнего давления, но и от сопротивления пластической деформации металла. В начале охлаждения или при относительно малом значении  $\sigma_d$  усадка вдоль оси  $z$  в значительной мере компенсируется деформацией металла от  $F_{св}$  и при точечной сварке в этом направлении растягивающие напряжения невелики, а в при электродной области часто обнаруживаются остаточные сжимающие напряжения.

Усадка в продольном направлении (вдоль оси  $r$ ) практически не остается некомпенсированной, так как за счет охлаждения вокруг литого ядра образуется своеобразный жесткий каркас, препятствующий деформации от внешнего усилия в этом направлении. Поэтому в центральной части зоны сварки получают развитие процессы образования остаточных радиальных  $\sigma_r$  и окружных  $\sigma_\theta$  напряжений (рис.1).

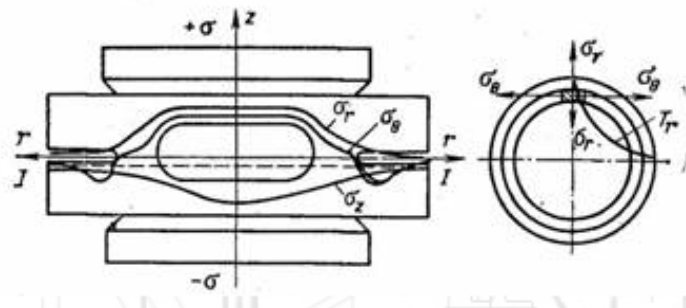


Рис. 1. Остаточные напряжения после точечной сварки

Механизм образования этих напряжений можно пояснить следующей схемой. При охлаждении внутренние слои, например, в виде кольца стремятся ускориться, однако соседние наружные более холодные слои препятствуют этому, и в них образуются остаточные растягивающие напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$ . При удалении от ядра температура и величина усадки снижаются, растягивающие напряжения уменьшаются до нуля. На значительном расстоянии  $\sigma_\theta$  меняет свой знак и превращаются в сжимающие. Следует иметь в виду, что при охлаждении остаточные растягивающие напряжения могут превышать  $\sigma_T$ . После полного охлаждения уровень напряжений меньше  $\sigma_T$ .

Если по мере охлаждения зоны сварки за счет увеличения внешнего давления вызвать дополнительную пластическую деформацию металла и тем самым обеспечить компенсацию усадочных процессов, можно снизить и даже преобразовать растягивающие напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\epsilon$  в сжимающие. Это практически реализуется путем плавного или ступенчатого повышения усилия сжатия до  $F_{ков}$  (рис. 2).

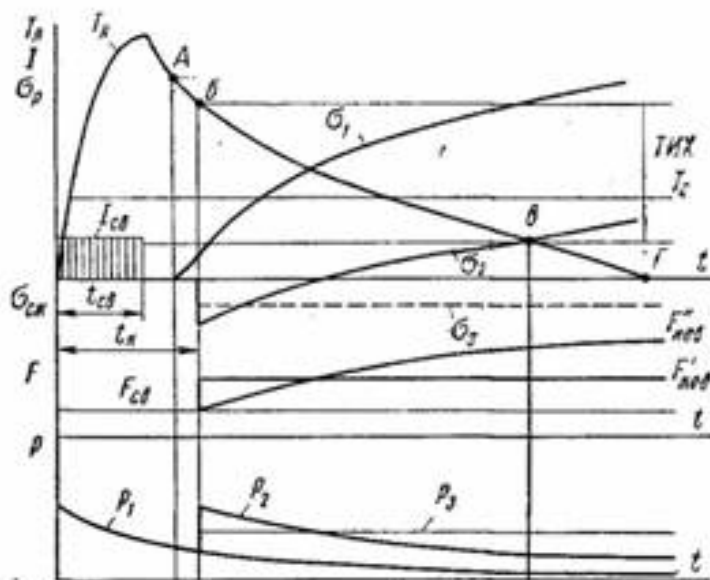


Рис. 2. Схема напряженного состояния металла на стадии охлаждения, где  $p_1, p_2, p_3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — средние давления и остаточные напряжения соответственно при отсутствии ковочного усилия ( $F_{св}$ ) ступенчатом его изменении ( $F'_{ков}$ ) и плавном увеличении ( $F''_{ков}$ )

При использовании постоянного усилия  $F_{св}$  растягивающие напряжения  $\sigma_1$  на пояске (точка А) образуются при температуре пластического состояния металла (например, для углеродистой стали 600 °С) и развиваются до полного охлаждения околошовной зоны. Однако, если через определенный промежуток времени  $t_k$  (точка Б) повысить усилие  $F_{св}$  до  $F_{ков}$  или давление с  $p_1$  до  $p_2$  то остаточные напряжения  $\sigma_2$  в зоне сварки будут преимущественно сжимающими. Наилучшим, но трудно выполнимым пока в сварочных машинах вариантом является плавное изменение усилия  $F_{ков}$ , при котором можно получить постоянное давление на охлаждающийся металл ( $p_3$ ) и сжимающие остаточные напряжения  $\sigma_3$ .

Уменьшить количество усадочных дефектов можно также снижением  $\sigma_4$  путем замедленного охлаждения при использовании подогрева током, что дает возможность снизить  $F_{ков}$ .

Так как образование остаточных напряжений за счет усадки продолжается до полного охлаждения, то становится значимым время проковки. При сварке малых толщин (до 1 мм) обеспечить необходимую для снижения остаточных растягивающих напряжений деформацию можно без приложения  $F_{ков}$ .

Таким образом, основными причинами разрушения жаровой трубы являются: 1) неравномерность температурного поля; 2) постановка жаровой трубы с монтажными напряжениями по обойме.

### Список литературы

[1] *Кондаков Г.Ф.* Повышение работоспособности сварных тонкостенных конструкций. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004 - 332 с

[2] *Сорокин Л.И.* Технология сварки специальных сталей., Способы уменьшения сварочных деформаций и напряжений. - М.: Машиностроение, 1996

[3] *Чулошников П.Л.* Контактная сварка., Учебное пособие для проф. обучения. - М.: Машиностроение, 1987

**Харченкова Елена Александровна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: elenka23811@gmail.com

**Максимов Николай Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Сварка и диагностика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstukaluga.ru

**Грибовский Егор Ильич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: eg.gribovskiy@gmail.com

**Научный руководитель: Максимов Николай Николаевич.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstukaluga.ru

А.А. Никитин

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАДИАЛЬНЫХ ФОРМОИЗМЕНЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ВТУЛКА» ПРИ ЭКНП

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

Одним из основных способов восстановления деталей типа «втулка» является электроконтактная наварка проволокой, характеризующаяся рядом преимуществ, такими как, возможность получения покрытий различной твердости, толщины и химического состава, меньшим термическим влиянием на основной металл и т.д.

Однако при применении данной технологии для восстановления деталей типа «втулка» возможно появление таких формоизменений детали, как изменение радиальных размеров детали – происходит их уменьшение на величину  $\Delta S$  (рис. 1).

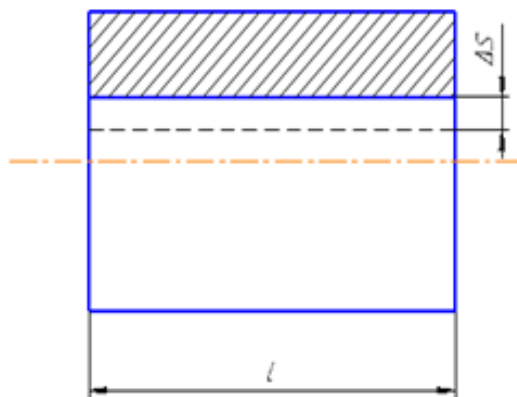


Рис. 1. Радиальные формоизменения деталей типа «втулка» после ЭКНП: поперечные формоизменения [1]

Для прогнозирования величины радиальных формоизменений деталей типа «втулка» была разработана математическая модель. Для решения данной задачи необходимо решить две задачи: тепловую и деформационную. Решение тепловой и деформационной задач осуществлялось с применением МКЭ в программном комплексе ANSYS.

В работе [3] было предложено решение данной задачи, которое давало результаты сопоставимые с экспериментальными. Однако, модель использовавшаяся для решения данной задачи имела следующие недостатки: большой объем места, занимаемого на вычислительной машине; слишком большое время решения задачи.

Для устранения данных недостатков была разработана упрощенная модель решения задачи (рис. 2), которая дала схожие результаты решения задачи.

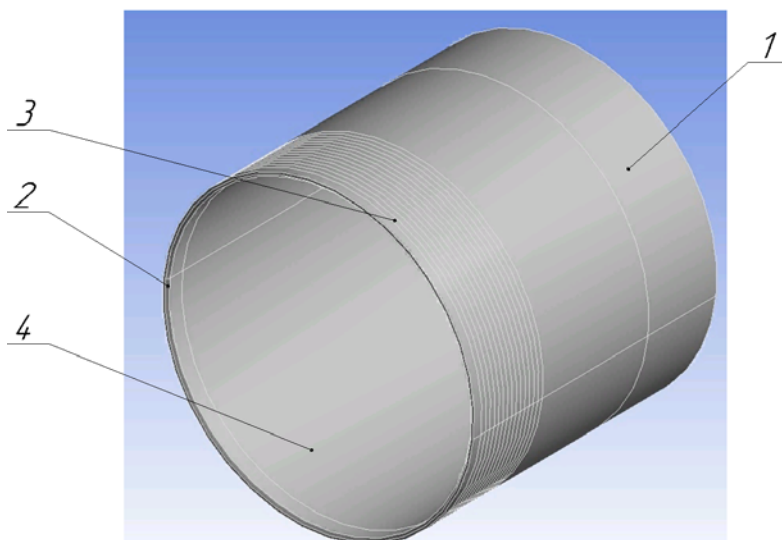


Рис. 2. Расчетная модель для определения остаточных радиальных формоизменений: 1 - часть втулки, закрепленная в патрон; 2 - поверхность, на которую действует пиноль, центрирующая втулку; 3 - кольцо, характеризующее область наплавки; 4 - внутренняя поверхность втулки

Для упрощения модели, было принято решение заменить элементарные площадки на кольца, к которым прикладывается тепловая энергия и усилие сжатия. Это позволило существенно снизить размер файла модели на вычислительной машине, а так же уменьшить время решения задачи на 2 порядка.

Ширина кольца 4,5 мм, что соответствует ширине зоны контакта проволоки с поверхностью детали диаметром 265 мм, при наварке проволокой диаметром 2 мм с осадкой 60%[2].

Величины теплового потока и усилия, прикладываемых к кольцам соответствуют значениям при ЭКНП. Время приложения теплового потока и нагрузок к кольцам равно, принималось равным времени продолжительности импульса электрического тока - 0,12 с. Время паузы между приложениями тепла и усилия к кольцам – 0,12 с. Что соответствует времени подачи импульса электрического тока и времени паузы при ЭКНП.

Физические свойства модели принимались равными свойствам материала Сталь 45.

Внутренний диаметр модели принимался равным 240 мм, 222 мм и 170 мм, что соответствует диаметрам втулок в реальных экспериментах.

В ходе решения задачи для трех толщин были получены следующие результаты (табл. 1):

Таблица 1

Результаты расчетов		
Внутренний диаметр, мм	Величина радиальных формоизменений в ходе расчетов ,мм	Величина радиальных формоизменений в ходе эксперимента, мм
240	0,14	0,1
222	0,084	0,1
170	0,05	0



Исходя из того, что величина радиальных формоизменений в ходе расчетов близка к величине радиальных формоизменений в ходе эксперимента, можно сделать вывод, что разработанная математическая модель адекватна.

### Список литературы

[1]. *Дубровский В.А.* Формоизменения деталей типа "втулка" при электроконтактной наварке проволокой / В.А. Дубровский, В.В.Зезюля, И.Н. Зыбин // Сварка и диагностика. —2016 .— №6 — С. 40-45.

[2]. *Дубровский В.А., Потапов А.В., Амеличева А.Ю., Зезюля В.В., Зыбин И.Н.* Текущее состояние и направления дальнейшего развития технологии электроконтактной наварки проволокой // Сварка и диагностика. – 2017. – № 3. – С. 30-34.

[3]. *Дубровский В.А.* Разработка методики расчета остаточных формоизменений деталей типа«втулка» при электроконтактной наварке проволокой их наружныхповерхностей/ В.А. Дубровский, В.В.Зезюля, И.Н. Зыбин, А.В. Карчагин // Информационный вестник Дона. – 2015 – №2 – С. 54-66.

**Никитин Артём Александрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, АО "Восход" – КРЛЗ. E-mail: artem220808@gmail.com

**Научный руководитель: Зыбин Игорь Николаевич.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: m2kf@bmstukaluga.r

Д.А. Мельников

## ОБЗОР ДЕФЕКТОВ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

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

Сварка трением с перемешиванием (СТП) – это относительно новый способ соединения материалов, запатентованный в 1991 году в Великобритании [1]. Впервые данная технология была предложена в 1967 году в СССР Клименко Ю.В [2]. По сравнению с обычными методами сварки СТП не нуждается в защитных газах или присадочных материалах, не вырабатывает токсичных газов и потребляет намного меньше энергии, благодаря чему считается экологичным и энергоэффективным процессом. Данный способ применяется в основном для сварки материалов с низкой температурой плавления, например, алюминиевых, магниевых, медных и других сплавов.

При СТП, как и в других сварочных процессах, важным является получение шва высокого качества. Однако, качество сварного шва при СТП ухудшается из-за различных дефектов, появляющихся во время сварочного процесса. В данной работе рассмотрены различные дефекты СТП, причины их возникновения и способы устранения.

Наиболее распространенными дефектами СТП являются непровар корня шва, несплавление, грат, пустоты, микротрещины, поверхностные канавки, трещины и волнистость соединения.

**Микротрещины.** В основном микротрещины (рис. 1) формируются в Т-образных и стыковых соединениях на стороне набегания из-за недостаточного тепловложения и потока металла [3]. Тепловложение и хороший поток материала являются основными факторами для предотвращения образования микротрещин. Снижая скорость перемещения инструмента, можно увеличить тепловложение, что улучшит поток материала и создаст соединение без данного дефекта, а с увеличением скорости движения инструмента увеличивается площадь микротрещин [1].

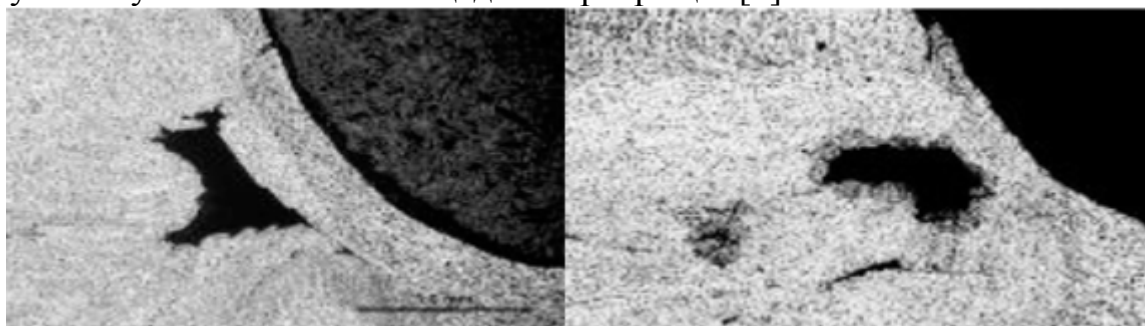


Рис.1. Макроскопическое изображение микротрещин [5]

**Образование грата.** Грат образуется около границ заплечика инструмента (рис. 2). Причинами являются чрезмерная глубина погружения заплечика, термическое смягчение материала, неправильная длина пина относительно толщины заготовки и высокое давление инструмента, которое вытесняет большой объем материала в виде грата[3]. Такой сварной шов имеет грубый внешний вид, несмотря на приемлемую прочность сварного шва, однако, данный дефект можно легко устранить с помощью фрезерования [1].

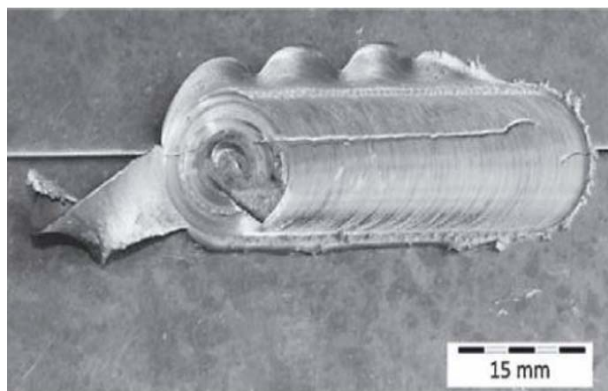


Рис. 2. Образование грата с поверхностной канавкой [1]

**Волнистость соединения.** При высоких скоростях сварки и низких скоростях вращения инструмента оксидный слой лишь частично разрушается из-за недостаточного перемешивания металла и низкого тепловложения, что приводит к снижению текучести размягченного материала. В результате включения частиц оксида приводят к образованию соединения в форме зигзага или волнистости[5]. Этот дефект обычно возникает в корне сварного шва или на поверхности раздела основного металла. Данный дефект можно предотвратить с помощью предварительного удаления оксидного слоя[3]. Наличие данного дефекта приводит к низким механическим свойствам сварного шва.



Рис. 3. Дефект волнистости соединения [3].

**Пустоты и червоточины.** Высокие скорости сварки способствуют экономичности и производительности, однако, слишком высокие скорости сварки приводят к образованию пустот (рис. 4) под верхней поверхностью сварного шва или со стороны набегания на краю сварного шва. Дальнейшее увеличение скорости сварки приводит к образованию более крупных дефектов – червоточин [6]. Пустоты – это дефекты, имеющие переменный размер, которые могут быть ориентированы под любым углом [3]. Они возникают из-за недостаточного давления инструмента и высоких скоростей сварки. Де-

фект можно уменьшить с помощью усложнения конструкции пина инструмента [7].

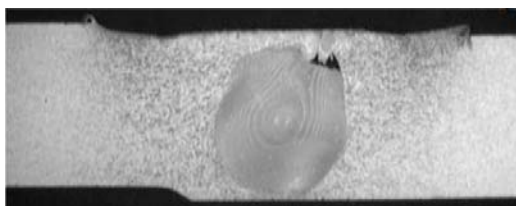


Рис. 4. Пустота со стороны набегания сварного шва[3]

**Полости и канавки.** Полости(рис. 5) и поверхностные канавки (рис. 2) оказывают существенное влияние на механические свойства соединений[4]. Они образуются из-за недостаточного тепловложения в результате неправильного выбора параметров процесса. Данный дефект может быть устранен с помощью ремонтной сварки трением с перемешиванием, с сохранением 78% прочности основного металла[8].



Рис. 5. Полость, образованная из-за недостаточного тепловложения [3]

**Трещины.** Поверхностные трещины образуются при высоких скоростях(1500 об/мин и выше) независимо от скорости сварки[7] на краю плеча инструмента, в связи с тем, что в данном месте возникает повышенная температура [4].

Корневые трещины возникают в результате недостаточного подвода тепла или неполного разрушения поверхностных оксидных слоев. Это происходит в результате недостаточного угла наклона или проникновения пина в металл.

**Непровар и несплавление корня шва.** Непровар является наиболее частым дефектом при СТП. Основной причиной его образования является отклонение от прямолинейности свариваемых кромок (рис. 6) [9]. Оно достаточно серьезно влияет на качество сварного шва и может привести к несплавлению материала.



Рис. 6. Пример отклонения от прямолинейности на металлических пластинах [9]

В целом, сварка трением с перемешиванием является прогрессивным, надежным и удобным способом получения качественных сварных соединений алюминиевых сплавов при правильном выборе параметров сварки.

### Список литературы

[1]. *P. Podrzaj, B. Jerman, D. Klobcar*. Welding defects at friction stir welding. – *Metalurgija* 54(2), 2015. – pp. 387-389. URL: <https://hrcak.srce.hr/file/190511> (Дата обращения: 25.03.2019).

[2]. *Клименко Ю.В.* Авторское свидетельство 195846 СССР. Способ сварки металлов трением – Бюллетень изобретений №10, 1967. URL: <http://patents.su/1-195846-sposob-svarki-metallov-treniem.html> (Дата обращения: 25.03.2019).

[3]. *N. Soni, S. Chandrashekar, A. Kumar, V.R. Chary*. Defects Formation during Friction Stir Welding: A Review. – *International Journal of Engineering and Management Research* 7.3, 2017. – pp. 121-125. URL: [https://www.researchgate.net/publication/326438882\\_Defects\\_Formation\\_during\\_Friction\\_Stir\\_Welding\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/326438882_Defects_Formation_during_Friction_Stir_Welding_A_Review) (Дата обращения: 25.03.2019).

[4]. *Y.G. Kim, H. Fujii, T. Tsumara, T. Komazaki, K. Nakata*. Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. – *Materials science and engineering A* 415, 2006. – pp. 250-254. URL: <http://nakata-wjs.info/assets/pdf/treatise/081.pdf> (Дата обращения: 25.03.2019).

[5]. *Paul Kah, Richard Rajan, Jukka Martikainen, Raimo Suoranta*. Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys. – *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2015. – pp. 10-26 URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40712-015-0053-8> (Дата обращения 25.03.2019).

[6]. *K. Kimapong, T. Watanabe*. Friction stir welding of aluminium alloy to steel. – *Welding Journal* 83(10), 2004. – pp.277-282. URL: [https://www.researchgate.net/publication/297931933\\_Friction\\_stir\\_welding\\_of\\_aluminum\\_alloy\\_to\\_steel](https://www.researchgate.net/publication/297931933_Friction_stir_welding_of_aluminum_alloy_to_steel) (Дата обращения: 25.03.2019).

[7]. *Song-Woo Song, Sang-Hoon Lee, Byung-Chul Kim, Tae-Jin Yoon, Nam-Kue Kim, In-Bae Kim and Snahg-Yun Kang*. Liquation Cracking of Dissimilar Aluminium Alloys during Friction Stir Welding. – *Materials Transactions*, Vol. 52, No. 2, 2011. – pp. 254-257. URL: [https://www.researchgate.net/publication/274139867\\_Liquation\\_Cracking\\_of\\_Dissimilar\\_Aluminum\\_Alloys\\_during\\_Friction\\_Stir\\_Welding](https://www.researchgate.net/publication/274139867_Liquation_Cracking_of_Dissimilar_Aluminum_Alloys_during_Friction_Stir_Welding) (Дата обращения: 25.03.2019).

[8]. *Liu Hui-jie, Zhang Hui-jie*. Repair welding process of friction stir welding groove defect. – *trans. Nonferrous met. China* 19, 2009. – pp. 563-567. URL: <https://kundoc.com/pdf-repair-welding-process-of-friction-stir-welding-groove-defect.html> (Дата обращения: 25.03.2019).

[9]. *Е.В. Кривонос, И.К. Черных, Е.Н. Матушко, Е.В. Васильев*. Анализ дефектов, возникающих при сварке трением с перемешиванием. – ОНВ.

2017. №2 (152). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-defektov-voznikayuschih-pri-svarke-treniem-s-peremeshivaniem> (Дата обращения: 25.03.2019).

**Мельников Дмитрий Александрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: melnikov23.841@gmail.com

**Научный руководитель: Царьков Андрей Васильевич.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andrey.tsarkov@mail.ru

А.Е. Денисов, Т.Г. Чернова

## **СПОСОБЫ ЗАВАРКИ ТРЕЩИН В ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЯХ ИЗ АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ**

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

Главными причинами, по которым механическое оборудование выходит из строя, являются поломки и износ деталей. Одним из способов приведения в исправное состояние машин является восстановление их деталей при помощи ремонтной сварки.

Одним из видов механического оборудования являются двигатели. В свою очередь, одной из разновидностей двигателей является газотурбинный двигатель.

Двигатель состоит из входного устройства, компрессора, камеры сгорания, газовой турбины и выходного устройства. Повышение давления воздуха происходит в компрессоре.

В центробежном компрессоре при вращении крыльчатки воздух увлекается лопатками и под действием центробежных сил движется к периферии. В процессе эксплуатации ГТД на покрывающем диске крыльчатки первого каскада компрессора появляются трещины (рис. 1). Данные трещины выявляются при поступлении на ремонт изделий из эксплуатации.



Рис. 1. Внешний вид трещин на покрывающем диске крыльчатки

Для восстановления поверхности покрывающего диска необходимо выбрать способ заварки трещин, который обеспечит наилучшие эксплуатационные характеристики и позволит сохранить работоспособность узла без необходимости замены поврежденной детали. Способ и режимы заварки должны быть таковыми, чтобы обеспечить возможность её выполнения без проведения восстанавливающей механические свойства последующей термической обработки. Допускается только отпуск детали для снятия сварочных напряжений.

Для восстановления крыльчатки будут проанализированы способ последовательной лазерной наплавки валиков и аргонодуговая сварка неплавящимся электродом. Лазерная наплавка выбрана по причине малых после

сварочных деформаций и низкого тепловложения в деталь, а аргонодуговая сварка – в силу своей универсальности и возможности получить качественный наплавленный валик, сходный по характеристикам с основным металлом.

Крыльчатка изготовлена методом точного литья из сплава ВНЛ-5, которая в некоторых справочниках также обозначается как 13X11H5M5Л. Из данного сплава изготавливаются фасонные отливки для авиационной промышленности[1].

В процессе исследования была отобрана крыльчатка с характерными дефектами в виде трещин. Из покрывающего диска крыльчатки были вырезаны сегменты с трещинами для проведения на них исследования способов заварки трещин (рис. 2).

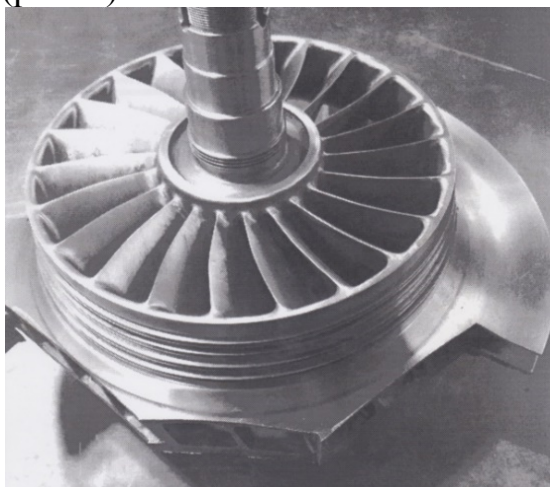


Рис. 2

До начала работ по заварке трещин была выполнена выборка трещин. Схема выборки представлена на рисунке 3.

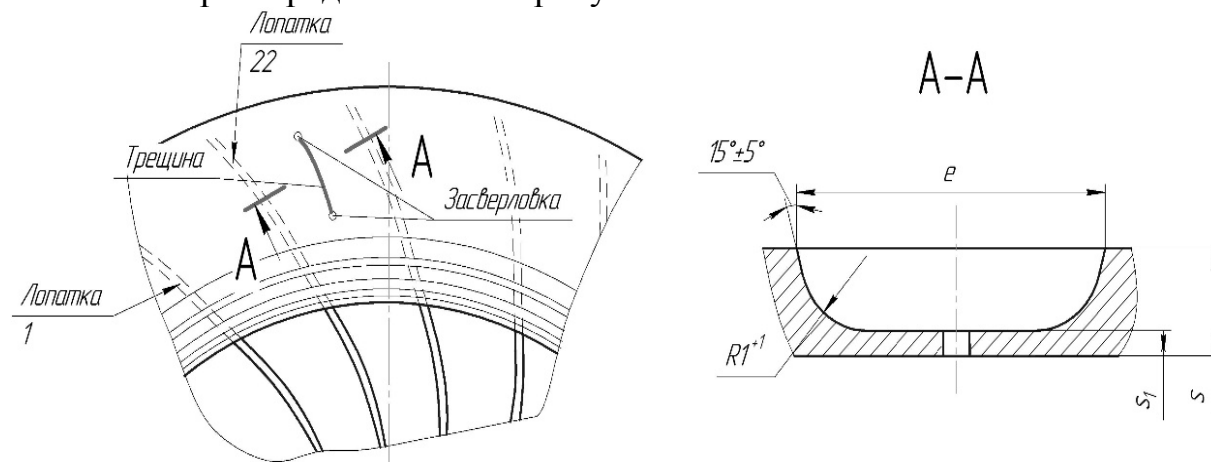


Рис. 3. Схема выборки трещины:  $e$ –ширина разделки,  $s$ –толщина покрывающего диска в месте дефекта,  $s_1$ –притупление

На 4 образцах была произведена выборка трещины с оставленным притуплением толщиной 1,0 мм. Внешний вид разделки представлен на рисунке 4 (а, б, в, г).



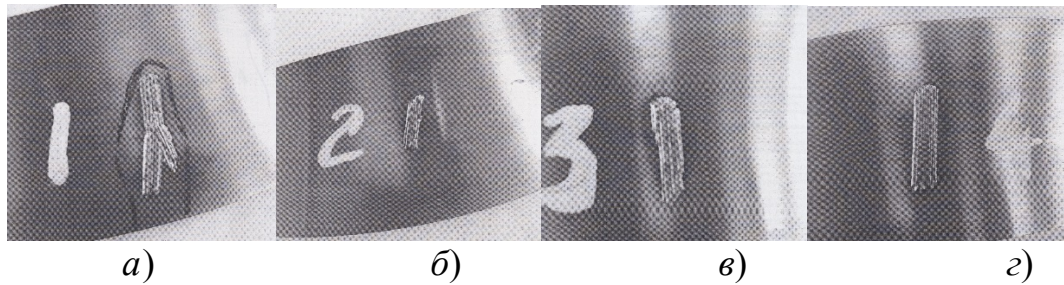


Рис. 4. Внешний вид выборки трещины под лазерную наплавку

На данных образцах была произведена последовательная лазерная наплавка валиков с использованием сварочной проволоки Св-Х14Н8М2 диаметром 0,6 мм. Наплавка велась на универсальном оборудовании, содержащем лазер ЛС-5, робот КУКА, оптическую головку фирмы PRECITEC и технологический стол, на режимах, представленных в таблице 1 [2].

Таблица 1.

Режимы наплавки

Параметры режима	Ед. изм.	Значение
Мощность излучения	Вт	250...300
Скорость наплавки	мм/с	4
Расстояние от торца сопла до шва	мм	4...6
Защитный газ	-	Аргон
Расход защитного газа	л/мин	6...8
Диаметр присадочной проволоки	мм	0,6
Марка присадочной проволоки	-	Св-Х14Н8М2

При металлографическом контроле наплавленного валика было выявлено отсутствие провара (по оставленному притуплению). (рис. 5).

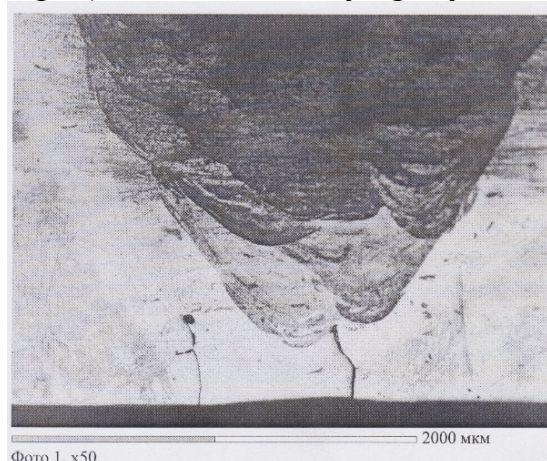


Рис. 5

Далее на 3-х образцах, из числа ранее используемых, была проведена разделка наплавки на всю толщину образца (разделка одного из образцов представлена на рис. 6), т. е. без оставленного притупления, и проведена повторная лазерная наплавка с использованием сварочной проволоки Св-Х14Н8М2 диаметром 0,6 мм.

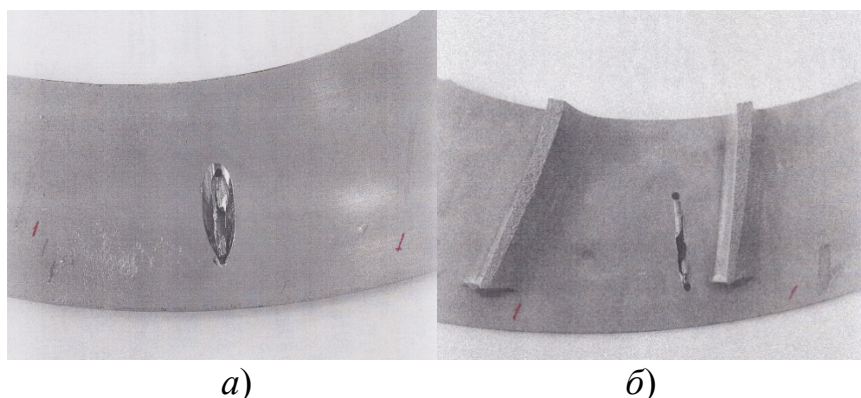


Рис. 6. Разделка ранее наплавленного образца: а) вид с наружной стороны; б) вид с обратной стороны покрывающего диска

Образцы с повторно заваренными дефектами были подвергнуты ЛЮМ1-ОВ и радиографическому контролю. Результаты контроля выявили дефекты в виде пористости, непроваров и трещин. Следовательно, данный способ не подходит для восстановления покрывающего диска крыльчатки.

Далее проводилось исследование возможности заварки трещин методом аргонодуговой сварки. Была подобрана ремонтная крыльчатка с 4-мя дефектами – трещинами на покрывающем диске. Трещины были разделаны так, как показано на рис. 7.

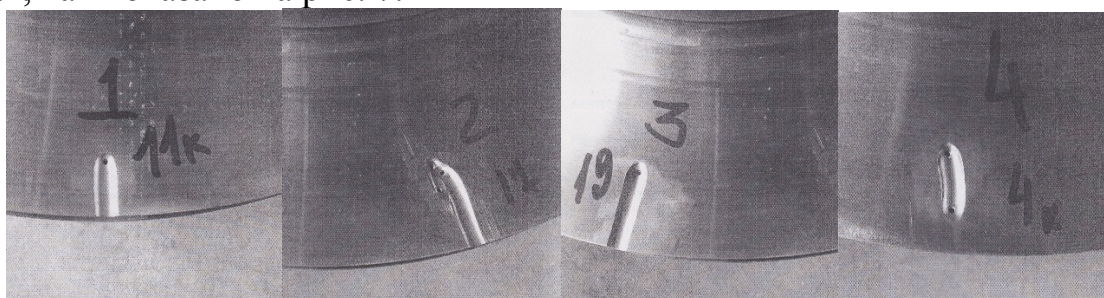


Рис. 7. Разделка трещин под аргонодуговую сварку

Перед заваркой на технологической крыльчатке были подобраны режимы аргонодуговой сварки, которые обеспечивают проплавление притупления толщиной 0,5...0,6 мм. Режимы сварки приведен в таблице 2.

Таблица 2.

Режимы аргонодуговой сварки

Параметры режима	Ед. изм.	Значение
Ток сварочный	А	60...80
Диаметр вольфрамового электрода	мм	2
Марка вольфрамового электрода	-	ЭВЛ
Защитный газ	-	Аргон
Расход защитного газа через горелку	л/мин	6...8
Расход защитного газа для защиты корня шва	л/мин	4...6
Марка присадочной проволоки	-	Св-08Х21Н10Г6

Из технологической крыльчатки был изготовлен темплет поперечного сечения шва для проведения металлографического контроля с целью выяв-

ления возможных дефектов в шве, определения наличия проплавления, определения твердости в шве и околошовной зоне.

На рис. 8 представлена фотография микрошлифа сварного соединения, на котором не выявлено дефектов в сварном шве и обеспечено полное проплавление корня шва.



Рис. 8. Фотография микрошлифа сварного соединения

Были произведены замеры твердости шва и околошовной зоны в местах, показанных на рис. 9.

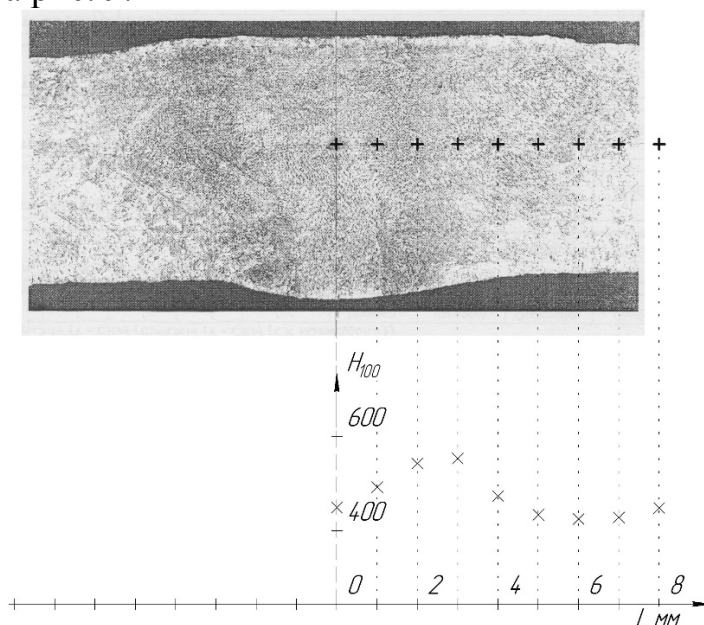


Рис. 9. Результаты замера твердости

Заварка дефектов на ремонтной крыльчатке производилась на режимах, указанных в таблице 2. Затем ремонтная крыльчатка была подвергнута отпуску при температуре 500°C в течение 3-х часов и радиографическому контролю, при котором дефектов в швах выявлено не было [1].

Крыльчатка была подвергнута контролю геометрических размеров, по результату которого отклонений размеров, превышающих допустимые по конструкторской документации, не выявлено.

На основании проведенных работ могут быть сделаны следующие выводы:

1. Исправление дефектов на покрывающем диске крыльчатки, выполненной из сплава ВНЛ-5, предпочтительно выполнять аргонодуговой сваркой.

2. Вышеприведенный метод заварки позволяет получить качественное исправление дефектов в виде трещин.

### **Список литературы**

[1] *Вознесенская Н. М, Каблов Е. Н, Петраков А. Ф., Шалькевич А. Б.* Высокопрочные коррозионностойкие стали аустенитно - мартенситного класса. – *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2002 г, №7, с. 34-37

[2] *Катаяма С.* Справочник по лазерной сварке–М.: Техносфера, 2015, 704 с.

**Денисов Антон Евгеньевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. ПАО «КАДВИ». E-mail: stealth54@yandex.ru

**Чернова Татьяна Георгиевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии сварки» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: chernova-tg@yandex.ru

**Научный руководитель: Чернова Татьяна Георгиевна.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: chernova-tg@yandex.ru

А.А. Родин

## **ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

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

Сварка трением перемешиванием (СТП) является одним из перспективных способов сварки алюминиевых сплавов взамен аргонодуговой и других способов сварки плавлением. В настоящее время процесс недостаточно исследован, поэтому актуальным является моделирование процесса сварки трением перемешиванием с использованием метода конечных элементов, который позволяет более детально изучить процесс, а также оценить влияние параметров процесса на свойства сварного шва.

Для более глубоко изучения процесса СТП необходимо понимать, какие параметры процесса и в какой степени влияют на количество тепла, которое выделяется в процессе сварки трением перемешиванием. А также влияние геометрических размеров инструмента на размеры и форму ядра шва, так как это напрямую влияет на механические свойства шва. В процессе сварки трением перемешиванием тепло производится из-за трения между инструментом и заготовкой. Количество производимого тепла определяет качество сварного шва, зону термического влияния и структуру шва. Также важную роль при формировании сварного шва играет геометрия пина инструмента [1].

В настоящее время модели, построенные на основе метода конечных элементов, используемые для моделирования процесса СТП можно разделить на три типа: термические, термомеханические без потока и термомеханические модели с потоком [2]. В моделях с потоком элементы по формулировке Лагранжа сильно искажаются, как следствие результаты могут быть неточными. Чтобы исключить влияние искажения сетки, используют несколько методов моделирования среди них: адаптивное уточнение сетки и произвольный подход Лагранжа-Эйлера. Модели на основе потока разрабатываются с использованием программных комплексов вычислительной гидродинамики. Недостатком данного способа является невозможность учесть упрочнение материала, так как в нем рассматривается поведение жестко-вязкопластического материала. Модели, основанные на потоке, также разрабатываются с использованием связанного подхода Лагранж-Эйлера. Этот метод анализа сочетает в себе два подхода: Лагранжа и Эйлера. Инструмент моделируется как жесткое изотермическое тело по формулировке Лагранжа и имеет управляющую точку "referencepoint", в то время как заготовка моделируется с использованием формулировки Эйлера. Взаимодействия между ними моделируется с помощью определения контакта [2].

Исследования СТП проводятся в различных коммерческих программных обеспечениях таких как: ANSYS, ABAQUS, FIDAP, FORGE 3, DEFORM 3D, HYPERWORKS, LS-DYNA, SYSWELD. Однако термомеханические модели, построенные в DEFORM-3D и ABAQUS, более качественно описывают термомеханические деформации и поток пластического течения материала в СТП [1].

### Список литературы

[1]. *Vinayak Malik, Sanjeev N. K., H. Suresh Hebbar, Satish V. Kailas*. Investigations on the Effect of Various Tool Pin Profiles in Friction Stir Welding Using Finite Element Simulations. *Procedia Engineering*, 2014, pp. 1060-1068.

[2]. *Iordache M, Badulescu C, Iacomì D, Nitu E, Ciuca C*. Numerical simulation of the friction stir welding process using coupled EulerianLagrangian method. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 145(2):022017. 2016.

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

**Научный руководитель: Зыбин Игорь Николаевич**. МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: igor1zybin@yandex.ru

## **СЕКЦИЯ 3.**

# **ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

Е.А. Кудряшов, А.А. Шурыгин

## **АНАЛИЗ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МДП-СТРУКТУР**

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

В настоящее время для исследования зарядового состояния приборов со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) широко применяется метод измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ)[1-4]. Известно, что данный метод позволяет получить значения ряда параметров, характеризующих зарядовое состояние МДП-структуры. Наличие на границе раздела неоднородностей, обусловленных дефектами различного рода, приводит к изменению энергетического спектра электрона на поверхности по сравнению с объемом полупроводника. Наиболее полная информация о состоянии границы раздела содержится в энергетическом спектре плотности поверхностных состояний (ППС). Для его расчета, как правило, используют вольтфарадные характеристики (ВФХ), измеренные на низкой (НЧ) или высокой (ВЧ) частотах. Использование для расчета ППС той или иной ВФХ имеет свои преимущества и недостатки [1].

Основным преимуществом метода НЧ ВФХ по сравнению с методом ВЧ ВФХ является возможность определения ППС в более широком диапазоне энергий в запрещенной зоне. В отличие от ВЧ метода, метод НЧ позволяет исследовать не только в области обеднения-обогащения, но и сильной инверсии. Несмотря на это предпочтительнее использовать ВЧ метод по следующим причинам:

- Измерения ВЧ ВФХ характеристик технически реализуется проще.
- Максимально достижимая чувствительность определения ППС в ВЧ методе составляет  $10^8 \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$  (в НЧ методе –  $10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ ).
- Для использования ВЧ свойств полупроводников можно использовать характеристики МДП-структур с диэлектриком, имеющим сквозные токи порядка  $10^{-9} \text{ А/мм}^2$  (в НЧ методе ток утечки не должен превышать  $10^{-15} \text{ А/мм}^2$ ).

Целью данной работы является рассмотрение основных методик исследования зарядового состояния МДП-структур на основе их ВЧ ВФХ.

### **Определение типа проводимости полупроводниковой подложки**

При обогащении основными носителями емкость МДП-структуры максимальна и определяется емкостью диэлектрика. В инверсии же емкость МДП-структуры минимальна. Таким образом, если максимум емкости ВФХ лежит в более положительных напряжениях, чем минимум, то подложка изготовлена из полупроводника n-типа, если же ВФХ находится в более отрицательных напряжениях, то подложка изготовлена из полупроводника p-типа.



### Определение толщины подзатворного диэлектрика

Поскольку емкость МДП-структуры определяется только геометрической емкостью диэлектрика, то:

$$C = C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}\varepsilon_0}{d_{ox}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{ox}$  – диэлектрическая проницаемость оксида.

Отсюда следует, что:

$$d_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}\varepsilon_0}{C_{ox}}, \quad (2)$$

где  $C_{ox}$  – удельная емкость подзатворного диэлектрика – емкость на единицу площади.

Для подстановки в экспериментальных значений необходимо сначала пронормировать емкость, т.е. разделить экспериментальное значение емкости на площадь МДП-структуры [2].

### Метод Термана

В предположении однозарядового поверхностного состояния (ПС) ППС может быть определена по сдвигу экспериментальной ВФХ относительно расчетной. Если все зарядовые центры, локализованные вблизи границы раздела, как со стороны полупроводника, так и со стороны диэлектрика, «собрать» на границу раздела, то спектр ППС ( $N_{ss}(E)$ ) может быть определен с помощью следующего выражения:

$$N_{ss}(y_s) = \frac{C_{ox}}{q} \frac{d\Delta V(C)}{dy_s}, \quad (3)$$

где  $C_{ox}$  – емкость диэлектрика,  $q$  – элементарный кулоновский заряд,  $y_s$  – безразмерный поверхностный потенциал,  $\Delta V(C)$  – разность напряжений между теоретической и экспериментальной ВФХ при заданном значении емкости [3].

Как следует из выражения, для построения зависимости  $N_{ss}(y_s)$  необходимо выполнить следующие операции:

- по экспериментально найденным значениям емкости МДП-структуры в режиме обогащения и сильной инверсии построить теоретическую ВФХ при отсутствии каких-либо ПС;
- сравнивая экспериментальную и теоретическую ВФХ, определить зависимость  $\Delta V(C)$ ;
- с помощью теоретической ВФХ  $C(y_s)$  из зависимости  $\Delta V(C)$  построить  $\Delta V(y_s)$ ;
- продифференцировав по поверхностному потенциалу зависимость  $\Delta V(y_s)$  и используя выражение выше, построить спектр поверхностных состояний  $N_{ss}(y_s)$ .

### Определение величины и знака встроенного заряда

Зная толщину подзатворного диэлектрика  $d_{ox}$ , концентрацию легирующей примеси  $N_a$ , работу выхода материала затвора, теоретическое значение емкости плоских зон ( $C_{FB}$ ) МДП-структуры и напряжения плоских зон можно определить величину и знак встроенного заряда. Проводя сечение  $C = \text{const} = C_{FB}$  (теоретическое), мы получаем при пересечении этой кривой с экспериментальной ВФХ напряжение, соответствующее  $\psi_s = 0$ , т.е. экспериментальное напряжение плоских зон  $V_{FB}$  (эксп.)

$$V_{FB \text{ эксп.}} - V_{FB \text{ теор.}} = \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} + \frac{qN_{ss}}{C_{ox}} \varphi_0 . \quad (4)$$

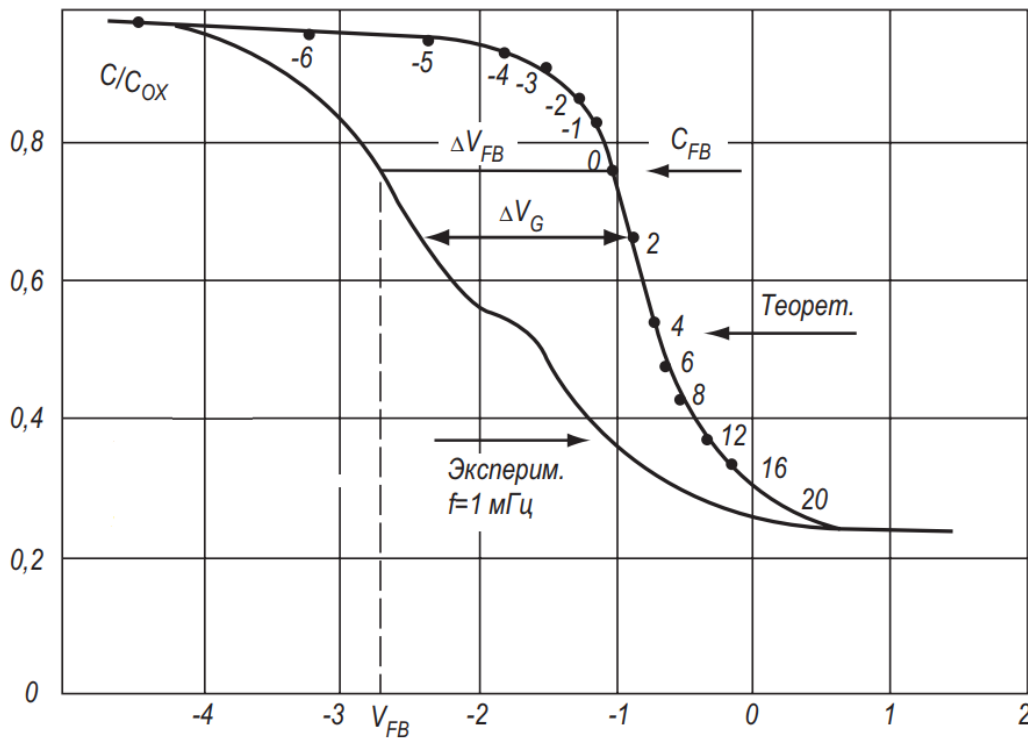


Рис. 1. Экспериментальная и теоретическая ВФХ для МДП-структуры

Если  $Q_{ox} > 0$ , то  $V_{FB \text{ эксп.}} > V_{FB \text{ теор.}}$ , верно и обратное. Таким образом, знак и величина суммарного заряда в плоских зонах определяются соотношением однозначно. Для вычленения заряда в поверхностных состояниях воспользуемся тем, что он обусловлен основными носителями (р-тип,  $Q_{ss}(\psi_s = 0) > 0$  и n-тип,  $Q_{ss}(\psi_s = 0) < 0$ ), захваченными на поверхностные состояния. Зная величину  $N_{ss}$ , можно рассчитать величину заряда в поверхностных состояниях  $Q_{ss}$  и таким образом из выражения можно определить величину и знак встроенного в диэлектрик заряда  $Q_{ox}$ .

### Определение величины и профиля концентрации легирующей примеси

Для определения величины легирующей концентрации воспользуемся следующим свойством высокочастотных ВФХ МДП-структур: их емкость в области инверсии достигает минимальной величины  $C_{\min}$  и определяется только емкостью области ионизованных доноров  $C_B$  и емкостью диэлектрика  $C_{ox}$ . При этом

$$\frac{1}{C_{\min}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_B} \quad (5)$$

Используя для емкости окисла  $C_{ox}$  выражение для емкости области ионизованных акцепторов, получаем:

$$C_{\min} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{ox}}{d_{ox} + \frac{\varepsilon_s W}{\varepsilon_{ox}}} \quad (6)$$

Использование выражения (6) совместно с выражением для емкости ОПЗ ионизованных акцепторов приводит к выражению для концентрации-легирующей примеси:

$$N_A = \frac{2 \left( 2\varphi_0 - \frac{kT}{q} \right)}{\varepsilon_s \varepsilon_0 q} \cdot \left( \frac{C_{ox} - 1}{C_{\min}} \right)^{-2} \quad (7)$$

Таким образом, в работе были рассмотрены основные методики исследования зарядового состояния МДП-структур на основе их ВЧ ВФХ.

### Список литературы

- [1] В.Н. Давыдов, П.Е. Троян, Н.Г. Зайцев. «Программа расчета параметров мдп структуры по методу термана». Всеросс. конф. – Томск, 2006.– 12с.
- [2] Гуртов В. А. Твердотельная электроника: Учеб. пособие / В. А. Гуртов; ПетрГУ. – Петрозаводск, 2008. – 512 с.
- [3] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. – М.: Мир, 2007.
- [4] Engström O. The MOS System. Cambridge University Press, 2014, 355 p.

**Кудряшов Евгений Александрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: jeksonklg@gmail.com

**Шурыгин Александр Андреевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Iron-muscle1996@yandex.ru

**Научный руководитель: Андреев Дмитрий Владимирович.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dandreevic@gmail.com

О.Н. Вовченко

## **АНАЛИЗ ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{SiO}_2$ И НИТРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК $\text{SiO}_2$**

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

**Введение.** Подзатворный диэлектрик является наиболее чувствительным узлом МОП-структур, поэтому при производстве схем с высокой степенью интеграции необходимо оптимизировать технологию формирования таких диэлектрических пленок. Качество МОП-приборов в основном обусловлено электрофизическими характеристиками подзатворного диэлектрика и границы раздела кремний-окисел (поверхностные состояния, ловушки захвата, встроенный и подвижный заряд в окисле).

Качество подзатворного диэлектрика можно оценить по вольт-фарадным и вольт-амперным характеристикам, пороговому напряжению, эффективному заряду в окисле и др.

В настоящее время в качестве тонких подзатворных диэлектриков широко используют нитрированные пленки оксида кремния  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ . В технической литературе по данной теме приводятся в описываются два основных метода нитрирования поверхности [1,2].

**Постановка задачи.** Разработать технологический процесс формирования тонкопленочного конденсатора на основе оксинитрида кремния в структуре МДП (с поликремниевым затвором). Замерить и проанализировать полученные вольт-фарадные характеристики.

**Методика эксперимента.** Эксперимент проводился на двух ранее полученных пластинах «спутниках», имевших обозначение С1 и С2 монокристаллического кремния 100 КЭФ 4,5 (100). На данных пластинах был сформирован подзатворный диэлектрик на основе термически выращенной пленке диоксида кремния при температуре  $850^\circ\text{C}$  в среде сухого кислорода  $\text{O}_2/\text{HCl}$ . А на пластине С2 после формирования пленки диоксида кремния проводили ее отжиг в атмосфере аммиака – нитрирование поверхности окисла. И контроль параметров: замер толщины окисла, коэффициента преломления, напряжение отсечки.

После формирования слоя диэлектрика, данные пластины прошли технологический процесс по формированию верхней обкладки тонкопленочного конденсатора:

1. Осаждение слоя поликремния ( $\text{Si}^*$ )
2. Легирование слоя поликремния фосфором.
3. Фотолитография (создания топологии для замера конденсатора).
4. Контроль С-V характеристик полученных структур.

**Результаты и обсуждения.** Полученные значения параметров подзатворного диэлектрика (толщина пленки, коэффициент преломления, напряжение отсечки) указаны в таблице 1 [2].

Таблица 1

Контролируемый параметр	Параметры пленки оксида кремния		
	Пластина С1	Пластина С2	
		до отжига в NH <sub>3</sub>	после отжига в NH <sub>3</sub>
Толщина пленки $h(\text{SiO}_2)$ , Å	(140±10)Å	(150±10)	(150±10)Å,
Коэффициент преломления $k$	1,5	1,5	1,5
Напряжение отсечки $U_{отс}$ , В	(-0,65±0,15) В	(-0,78±0,1) В	(-0,36±0,1) В

Для исследования зарядовых характеристик полученных МДП-структур использовался метод инъекции заряда в диэлектрик из кремниевой подложки (положительная полярность напряжения на затворе) в режиме поддержания постоянного инъекционного тока [1]. Типичные зависимости напряжения, падающего на МДП-структуре при сильнополевой инъекции заряда плотностью постоянного инъекционного тока  $10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> для образцов с различных пластин, представлены на рис. 1.

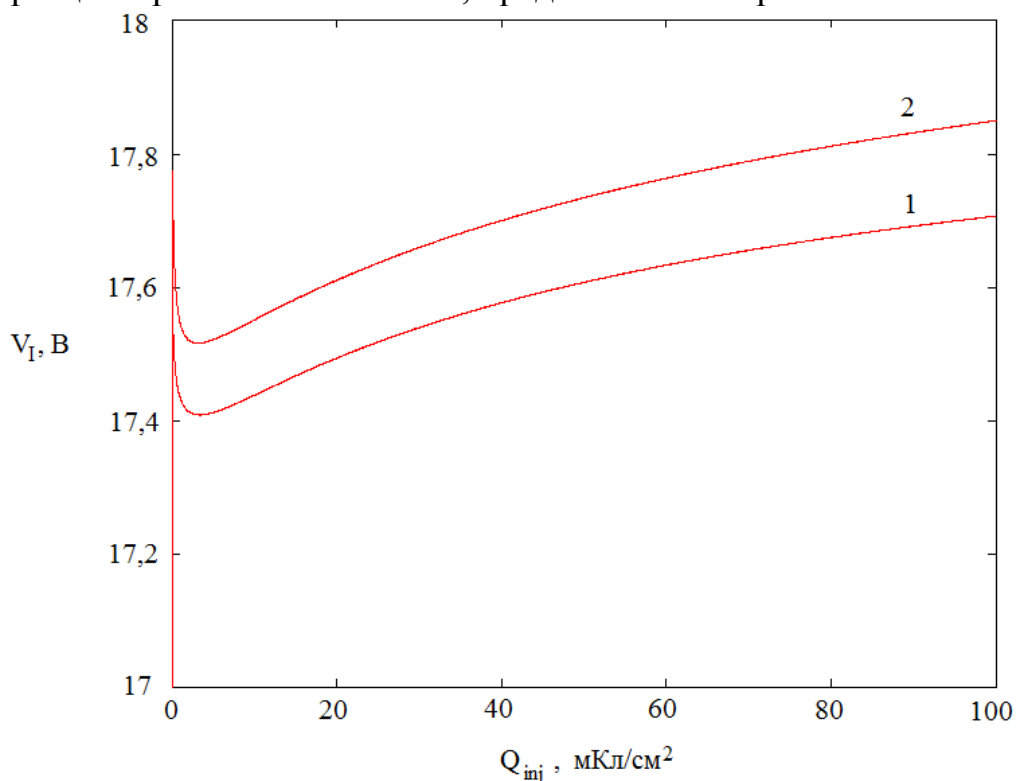


Рис. 1. Напряжение, падающее на МДП-структуре при сильнополевой инъекции заряда при положительном напряжении на затворе в режиме протекания постоянного инъекционного тока плотностью  $10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> для образцов с различных пластин:  
1 – пластина С1; 2 – пластина С2 (с отжигом в аммиаке)

Как видно из рис. 1, значения напряжения, при которых протекала инжекция для второй пластины, были немного выше, чем для первой. Причиной этого явления могло быть увеличение потенциального барьера на инжектирующей границе раздела вследствие нитрирования диоксида кремния.

Сравнение кинетики изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика при сильнополевой инжекции электронов проводилось из анализа кривых на рис. 2, полученных путем перестроения данных, приведенных на рис. 1.

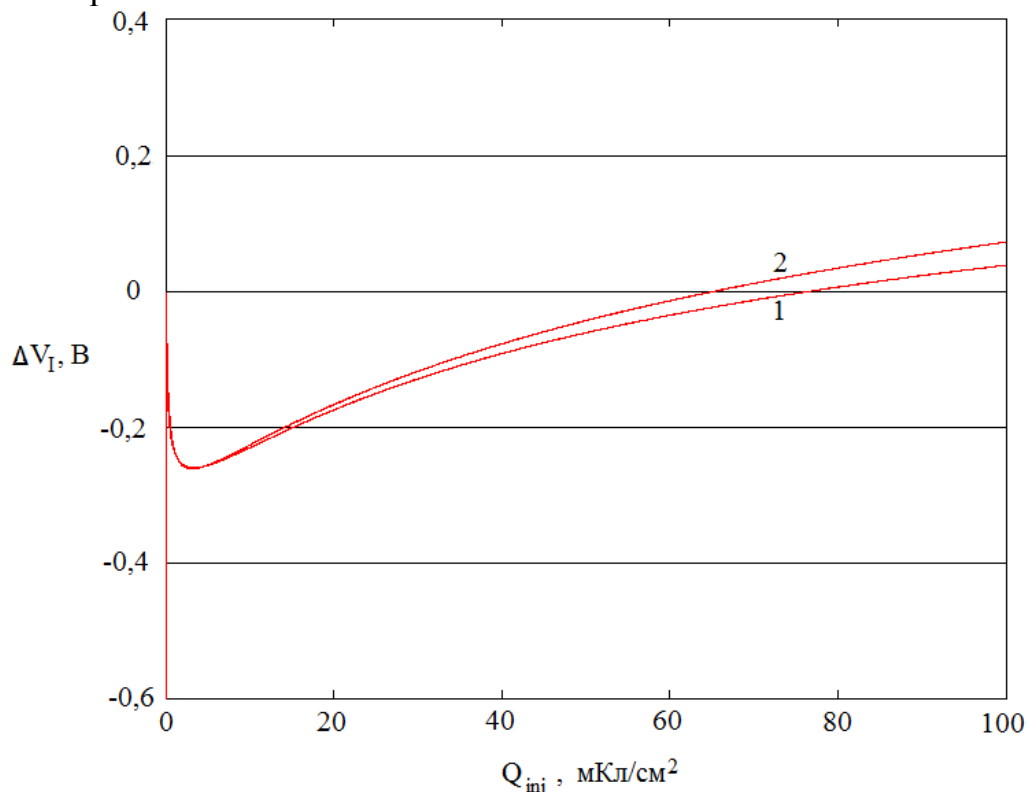


Рис. 2. Изменение напряжения на МДП-структуре при сильнополевой инжекции заряда при положительном напряжении на затворе в режиме протекания постоянного инжекционного тока плотностью  $10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> для образцов с различных пластин: 1 – пластина С1; 2 – пластина С2 (с отжигом в аммиаке)

Как видно из рис. 2, отжиг диоксида кремния в аммиаке начинает сказываться при инжекции заряда более 10 мКл/см<sup>2</sup> и приводит к возрастанию скорости генерации новых электронных ловушек в подзатворном диэлектрике. При этом средняя величина заряда, инжектированного до пробоя, на пластинах С1 и С2 имела близкие значения - примерно 5 Кл/см<sup>2</sup>.

Измерения высокочастотных C-V характеристик показали, что МДП-структуры с пластин, как проходивших, так и на проходивших отжиг в аммиаке, имели близкие параметры.

**Выводы.** В результате проведенной работы был использован ранее разработанный технологический процесс по получению достаточно чистых, по своему составу, пленок диоксида кремния с малым количеством дефектов, позволяющий увеличить среднее напряжение пробоя и уменьшить статистический разброс напряжений пробоя.

Найдены режимы нитрирования диоксида кремния путем отжига в аммиаке, не приводящие к ухудшению зарядовых характеристик МДП-структур. Показано, что отжиг в аммиаке может немного повышать напряжение на МДП-структуре, при котором начинается сильнополевая инжекция электронов в диэлектрик. Отжиг в аммиаке приводит к незначительному возрастанию скорости генерации новых электронных ловушек в подзатворном диэлектрике.

### Список литературы

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

[2] *Андреев В.В., Вовченко О.Н.* Получение ультра тонких пленок SiO<sub>2</sub> с последующим нитрированием поверхности для получения подзатворного окисла МОП-транзистора//Региональная научно-техническая конференция.// Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.

[3] *Готра З.Ю.* Технология микроэлектронных устройств. Справочник. - М.: Радио и связь, 1991.

[4] *Корзо В.Ф., Черняев В.Н.* Диэлектрические плёнки в микроэлектронике — М., 1997г..

[5] *Королев М.А., Красюков А.Ю., Поломошнов С.А.* Учебное пособие по дисциплине «Современные проблемы технологии нанозлектроники». - М.: МИЭТ, 2011.

[6] *Sze S. M, Lee M. K.* Semiconductor Devices. Physics and Technology // John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 3rd ed., 2013. 582 p.

[7] *Strong A., Wu E., Vollertsen R., Sune J., Rosa G., Rauch S., Sullivan T.* Reliability Wearout Mechanisms in Advanced CMOS Technologies. IEEE Press Series on Microelectronic Systems. Wiley, 2009. 624 p.

**Вовченко Ольга Николаевна** – студент, магистрант КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана. E-mail: luckyfox13@mail.ru

**Научный руководитель: Андреев Владимир Викторович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

В.А. Караханян

## АНАЛИЗ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСХЕМЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПАРЫ ТРАНЗИСТОРОВ

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

Рассмотрим существующую структуру кристалла микросхемы. Произведем анализ конструкции и электрофизических параметров и выявим достоинства и недостатки данной микросхемы. Дадим обоснование для переработки существующей конструкции и представим результаты, обеспечиваемые новой структурой кристалла.

Структура микросхемы представляет собой «склейку» из двух частей: носитель (подложка) и кремниевая структура с диэлектрической изоляцией, с выходом скрытого  $n^+$  слоя на поверхность структуры. Глубина залегания базы достигает 2.6 мкм. Осуществление загонки примеси производилось диффузионным методом. Структура представлена на рис. 1.

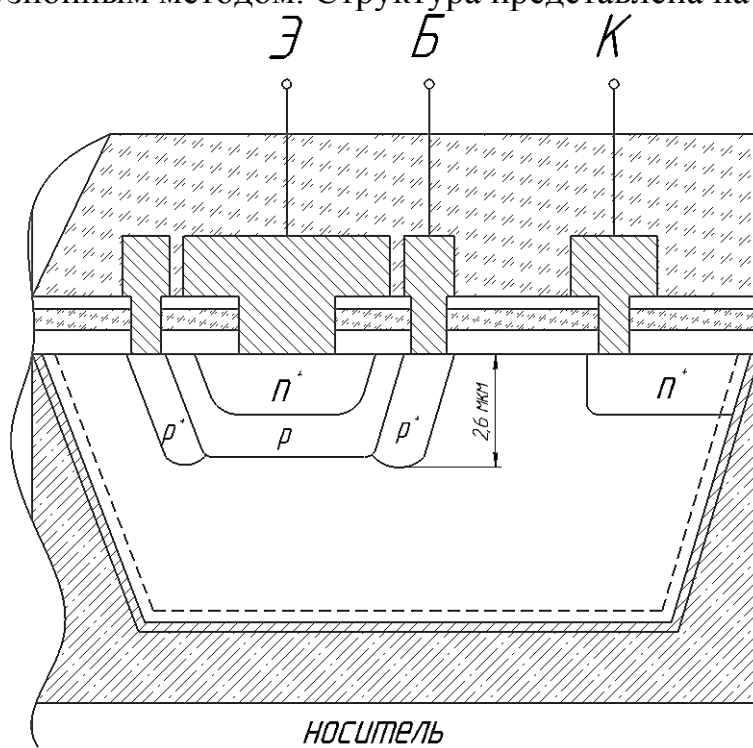


Рис. 1. Текущая структура кристалла

Данная структура, не обеспечивала прямое падение напряжения  $U_{03}=0.75$  В, при низких коэффициентах усиления по току  $\beta=50\div 60$ . А также, не обеспечивала модуль коэффициента усиления на высокой частоте [1]. При коэффициенте усиления по току  $\beta=120$ , модуль коэффициента усиления достигал значения  $|h_{21э}| \leq 3.4$ . Вследствие чего, не было возможности полу-



чения группы «В», с модулем коэффициента усиления равным  $|h_{21э}| \approx 4.5$  при коэффициенте усиления по току  $\beta > 88$  (табл. 1).

Таблица 1

Нормы разбраковки микросхемна группы

Группа	Коэффициент усиления по току	Модуль коэффициента усиления
А	33÷81	2.5
Б	60÷160	3.5
В	>88	4.5

Также существовал эффект оттеснения базы транзистора, во время разгонки примеси фосфора, при котором, на переходе база-эмиттер происходило расширение области пространственного заряда от эмиттера в стороны базы. А появление горячих носителей приводило к так называемому «проколу» базы, что в свою очередь приводило к уменьшению пробивного напряжения транзистора, при малых коэффициентах усиления по току и ухудшению электрофизических параметров схемы [2].

В следствие необеспечения существующей структурой микросхемы требуемыми электрофизическими параметрами был осуществлен пересмотр топологии и произведено изменение конструкции микросхемы.

Исходная структура микросхемы осталась прежней, но изменился профиль базы транзистора и глубина ее залегания достигает 2 мкм. Структура представлена на рис. 2.

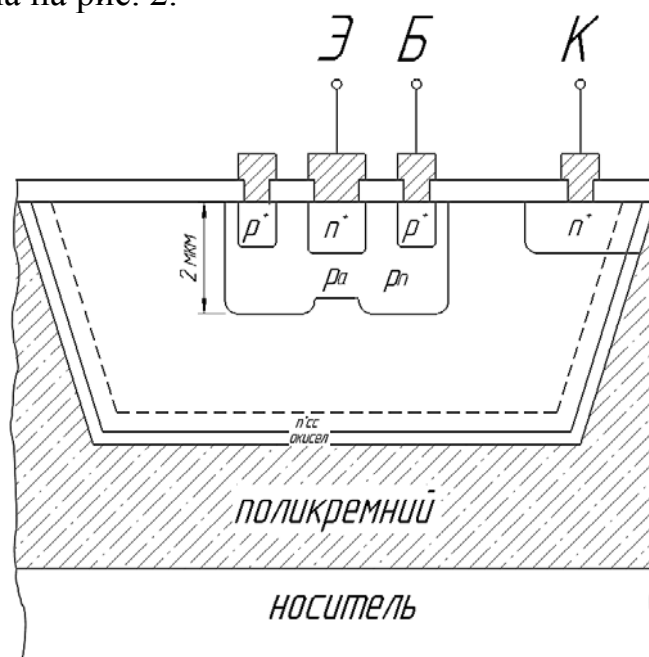


Рис. 2. Новая структура кристалла

Загонка примеси транзистора выполняется ионным легированием, в отличие от текущей структуры, в которую примесь загонялась диффузионным методом.

За счет изменения топологии, на схеме было исключено возникновение эффекта «оттеснения» базы. На этапе формирования базы, фотолито-

графия проводилась таким образом, что вскрывалась полностью область активной базы и легировалась малой дозой, затем, через маску фоторезиста подлегировались области краев эмиттера более высокой дозой и при разгонке примеси в базе, возникал профиль, представленный на рисунке 2. За счет такого конструкторского исполнения обеспечивалось повышение пробивного напряжения транзистора.

Повышение  $\rho_s$  активной базы, привело к увеличению модуля коэффициента усиления по току на высокой частоте.

За счет уменьшения  $\rho_s$  пассивной базы и подлегирования  $p^+$  области, уменьшилось сопротивление контакта к базе и уменьшилось само сопротивление базы. И, как следствие, это привело уменьшению прямого падения напряжения база-эмиттер, при коэффициенте усиления  $\beta=50$  прямое напряжение база-эмиттер упало до значения  $U_{\text{бэ}}=0.734$  В (рис. 3) [3].

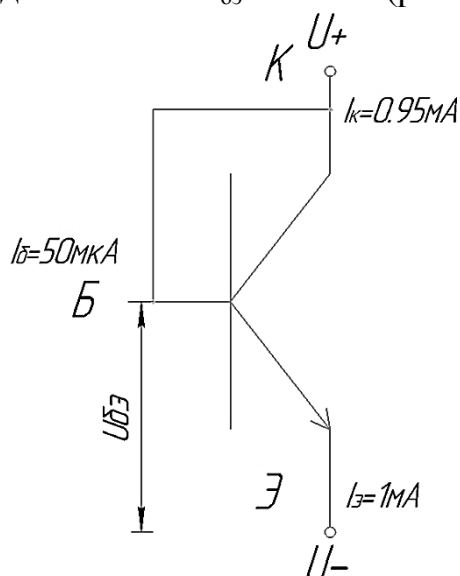


Рис. 3. Схема транзистора, при приложении разности потенциалов

Еще одним плюсом данной схемы, является стабильность работы транзистора на предельных режимах [4]. При включении перехода эмиттер-база в обратном направлении, замеряется вольт-амперная характеристика транзистора. При подаче тока порядка  $8 \div 16$  мА, коэффициент усиления по току падает незначительно. Что не наблюдалось, на текущей конструкции микросхемы.

И так, за счет переработки конструкции и технологии изготовления микросхемы, произошел ряд изменений ее электрофизических параметров. Поверхностное сопротивление активной базы увеличилось до значения  $\rho_s=400$  Ом/□, что привело к увеличению модуля коэффициента усиления на высокой частоте. Поверхностное сопротивление пассивной базы приняло значение  $\rho_s=100$  Ом/□ и поверхностное сопротивление области  $p^+$  составило  $\rho_s=20$  Ом/□. Произошло уменьшение сопротивления контакта к базе и сопротивление базы, что в последствие привело к уменьшению прямого напряжения база-эмиттер.

### Список литературы

[1] *Сенаторов К.Я.* Частотные и переходные характеристики биполярных транзисторов.

URL:[www.osc.phys.msu.ru/mediawiki/upload/5/5c/ /Perehod1.pdf](http://www.osc.phys.msu.ru/mediawiki/upload/5/5c/ /Perehod1.pdf) (дата обращения 15.03.2019).

[2] *Особенности ВАХ* реального транзистора. URL:<https://studfile.net/preview/332134/> (дата обращения 15.03.2019).

[3] *Блихер А.* Физика силовых биполярных и полевых транзисторов.- М.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986.-248 с.

[4] *Предельные режимы работы* биполярного транзистора. URL:<https://studfiles.net/preview/5396909/page:9/> (дата обращения 15.03.2019).

**Караханян Виолетта Андреевна** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [vetka2930@gmail.com](mailto:vetka2930@gmail.com)

**Научный руководитель: Шагаев Владимир Васильевич.**  
КФ МГТУ им Н.Э Баумана. E-mail: [shagaev-vv@yandex.ru](mailto:shagaev-vv@yandex.ru)

М.А. Саввин

## ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ АНТЕННЫ ТИПА «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ»

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

**Введение.** Антенна «волновой канал», известная также как антенна Яги-Уда, представляет собой расположенные вдоль линии излучения параллельно друг другу активный и несколько пассивных вибраторов. Она относится к классу антенн бегущей волны. Антенна «волновой канал» широко применяется в диапазоне УКВ в качестве направленных излучателей и приемных антенн радиовещательных станций [1]. Одним из главных параметров влияющим на коэффициент усиления является количество пассивных вибраторов. С увеличением их количества коэффициент усиления также возрастает, однако это приводит к ухудшению массогабаритных показателей. Поэтому при проектировании антенн Яги-Уда важно предварительно оценить соотношение между количеством директоров и коэффициентом усиления на рабочей частоте антенны. Для проведения предварительного анализа была выбрана САПР для электродинамического моделирования HFSS, потому что в ней наиболее полно реализован метод конечных элементов [2].

**Экспериментальная часть.** Для сравнительного анализа были созданы две антенны из трех и девяти элементов, длины элементов которых рассчитаны для частоты 150 МГц по методике из книги «Антенны» Ротхаммеля [1]. Условные чертежи, размеры и созданные в среде HFSS модели антенн приведены на рисунках ниже. В качестве материала для изготовления были выбраны медные стержни диаметром три мм.

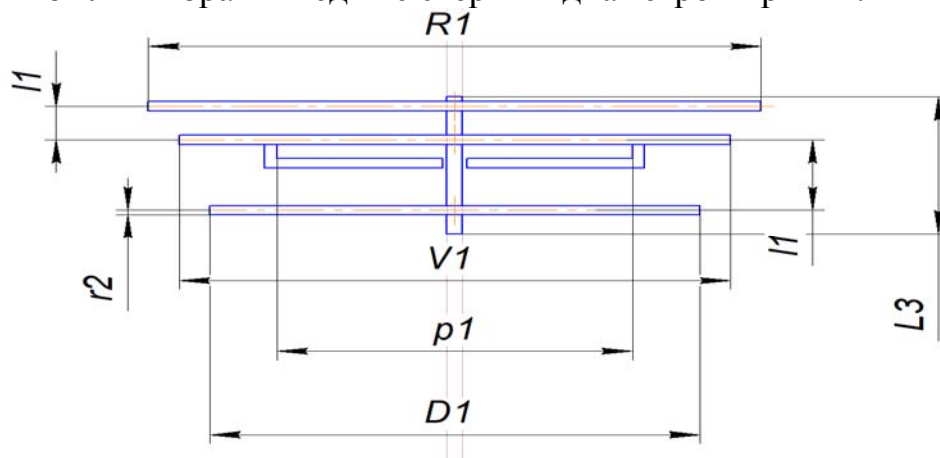


Рис. 1. Условный чертеж трех элементной антенны.

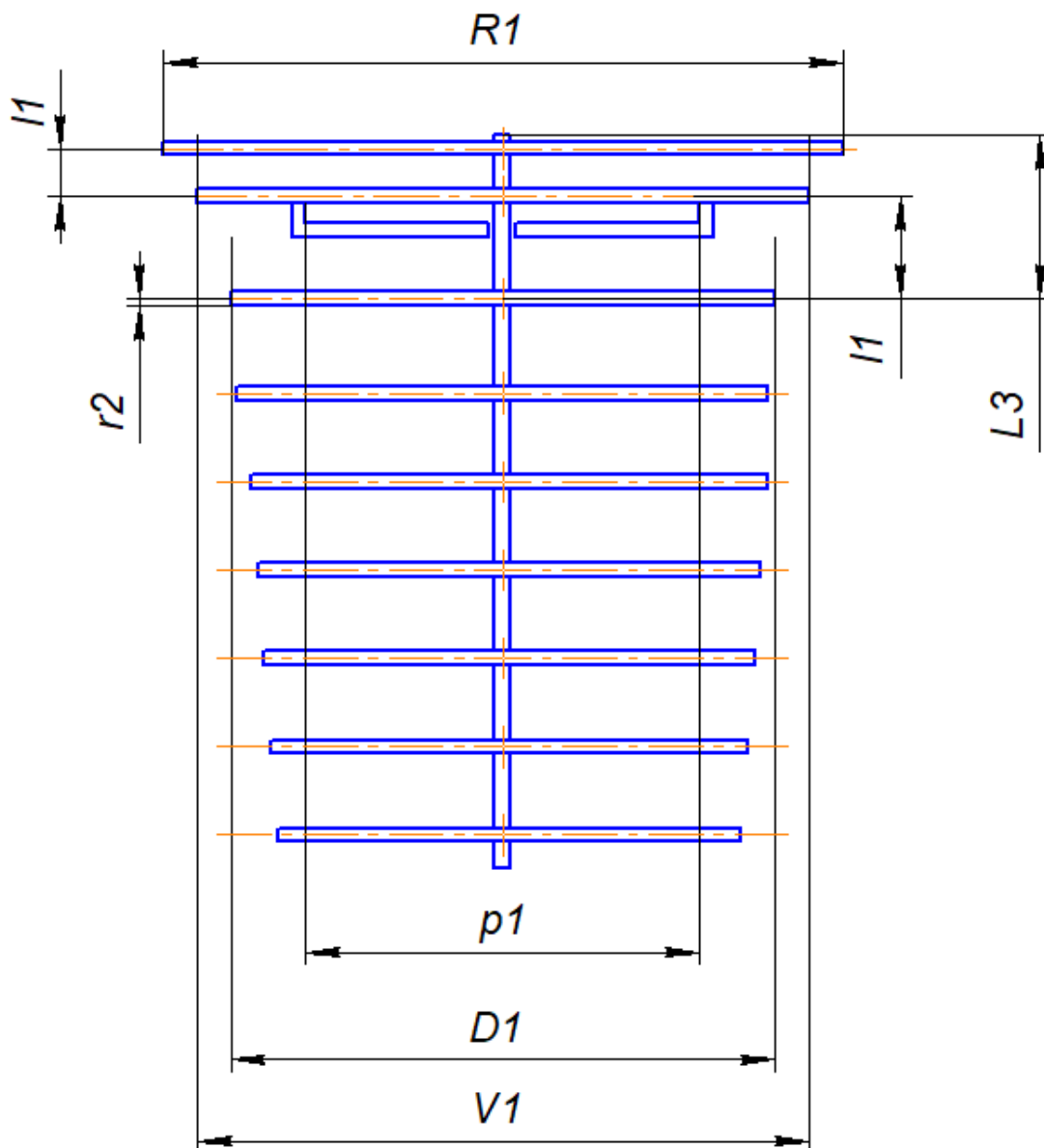


Рис. 2. Условный чертеж девяти элементной антенны.

Обозначения на чертеже:  $R1$  – длина рефлектора,  $V1$  – длина активного вибратора,  $D1$  – длина первого директора (длины директоров со второго по седьмой условно не показаны),  $l1$  – расстояние рефлектор – вибратор,  $l2$  – расстояние вибратор – директор,  $L3$  – общая длина антенны,  $r2$  – радиус всех элементов антенны,  $p1$  – длина T-образной схемы согласования.

Результаты расчетов для трех элементной антенны сведены в табл. 1, а девяти элементной антенны в табл. 2.

Таблица 1

Переменные, мм $f1$ , МГц	$R1$	$V1$	$D1$	$l1$	$l2$	$L3$	$p1$
150	997	947	900	422	793	828	459

Таблица 2

Переменные, мм f1, МГц	R1	V1	D1	l1	l2	L3	p1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
150	1017	944	881	505	200	1935	607	871	857	842	828	813	803

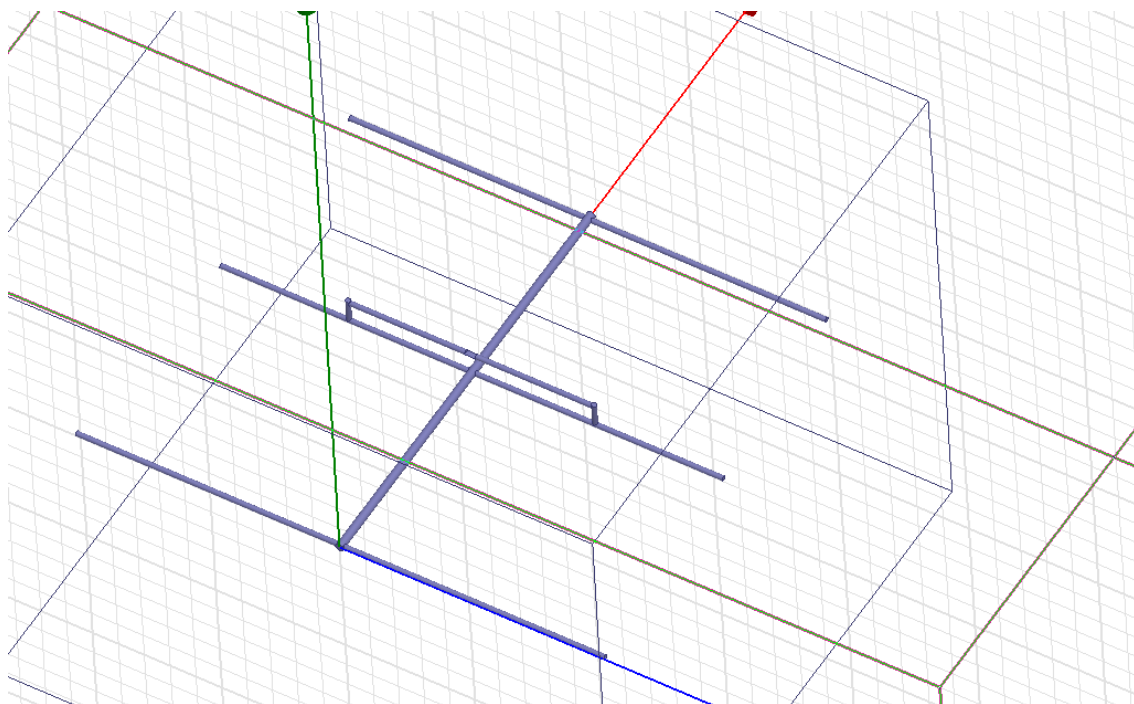


Рис. 3. Модель трех элементной антенны.

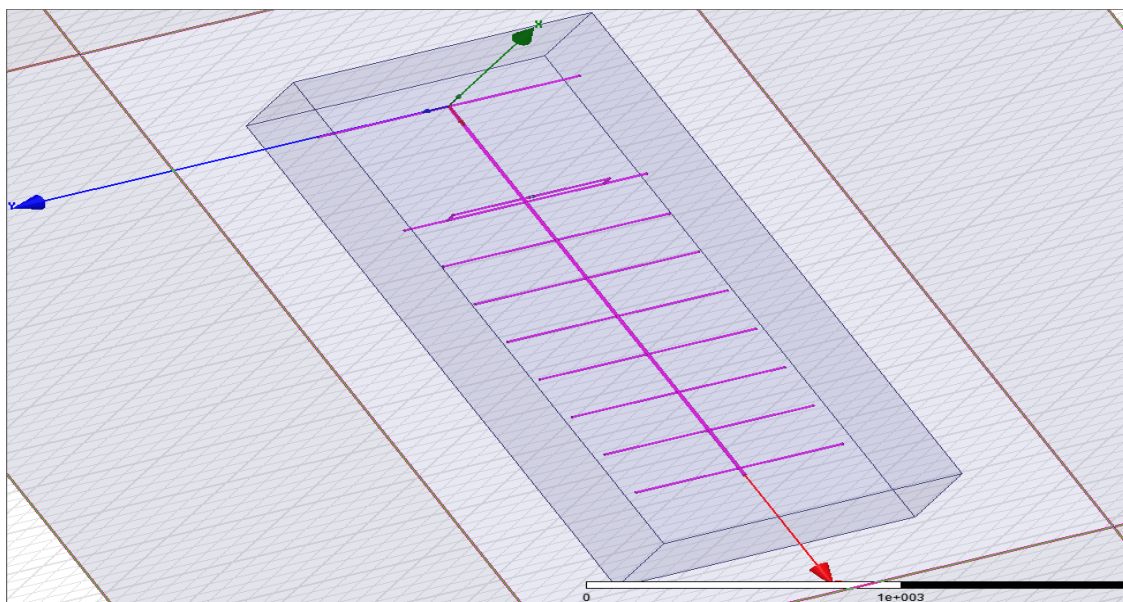


Рис. 4. Модель девяти элементной антенны.

Графики с расчетами коэффициента усиления приведены ниже.

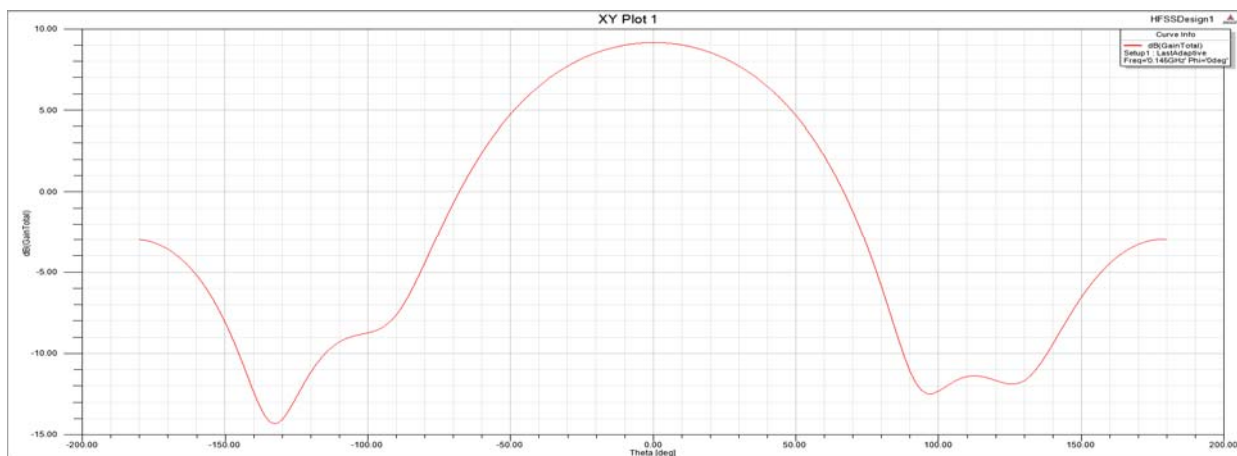


Рис. 5. График КУ для трех элементной антенны.

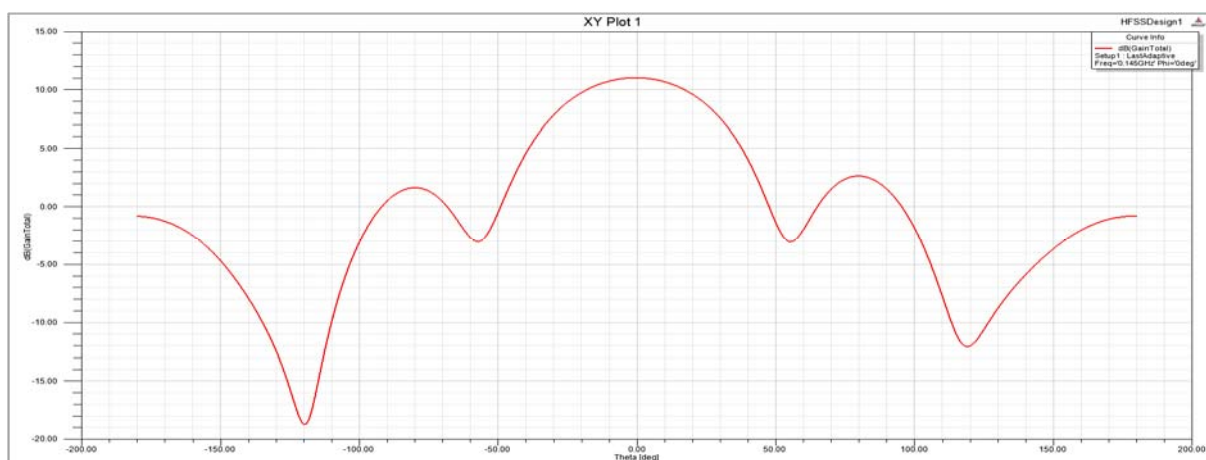


Рис. 5. График КУ для девяти элементной антенны.

Как видно из выше приведенных рисунков КУ девяти элементной антенны выше на 2 dB КУ трех элементной антенны, что хорошо согласуется с литературными источниками[1].

**Заключение.** В результате выполнения работы был проведен сравнительный анализ двух моделей антенн типа «волновой канал» с разным количеством директоров. Зависимость КУ от количества пассивных элементов совпадает с приведенной в литературных источниках.

### Список литературы

- [1]. Ротхаммель К. Антенны. В 2-х т. М. : Лайт-ЛТД, 2007. 410 с.
- [2] Банков С.Е., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств и антенн с Ansoft HFSS – М, 2009, 736 с.

**Саввин Михаил Александрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. 79108644148@yandex.ru

**Научный руководитель: Драч Владимир Евгеньевич.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: Drach@bmstu-kaluga.ru

Т.Ф. Гатауллин

## **ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОБРАТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ PIN ДИОДА НА ОСНОВЕ GaAlAs**

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

Целью работы являлось измерение времени обратного восстановления pin диода GaAlAs. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи [1-]:

- Разработать эскиз оснастки для измерения времени обратного восстановления pin диода на основе GaAlAs
- Произвести измерение времени обратного восстановления pin диода на основе GaAlAs

### **Измерение времени обратного восстановления pin диода на основе GaAlAs**

Смонтированная схема драйвера начинает работать при длительности импульса 60 нс, при этом амплитуда импульса составляет 4,5 В. При амплитуде равной 10 В, драйвер запускается с 40 нс. Емкость перехода чипа составила 10 пФ[3].

Оборудование и приборы:

- генератор Г5-56
- БП MASTECH NY3003-2
- БП MASTECH NY3003F
- Осциллограф RIGOL DS1202CA
- Микросхема по питанию IRF 4427
- ПТ IRF 7470

Напряжение питания схемы 12 В, с возможностью поднятия до 20 В, обратное напряжение 5 В, аналогично до 10 В. Режим измерения, время импульса 100 нс, амплитуда 10 В.

Для измерения времени обратного восстановления требуется выполнить ряд условий[3]:

1. Температура окружающей среды при измерении должна быть  $(25 \pm 5)$
2. Прямой ток, обратное напряжение или обратный ток, должны соответствовать установленным стандартам.
3. Необходимо подавать постоянный или импульсный прямой ток от первого генератора, в течение времени, достаточного для установления в измеряемом диоде неравновесных носителей заряда.
4. Подать от второго генератора импульс обратного напряжения, запирающий измеряемый диод.
5. Осциллографом измерить отрезок времени от момента прохождения через нуль тока диода до момента, в который уменьшающийся обрат-



ный ток диода становится равным заданному отсчетному значению обратного тока[1].

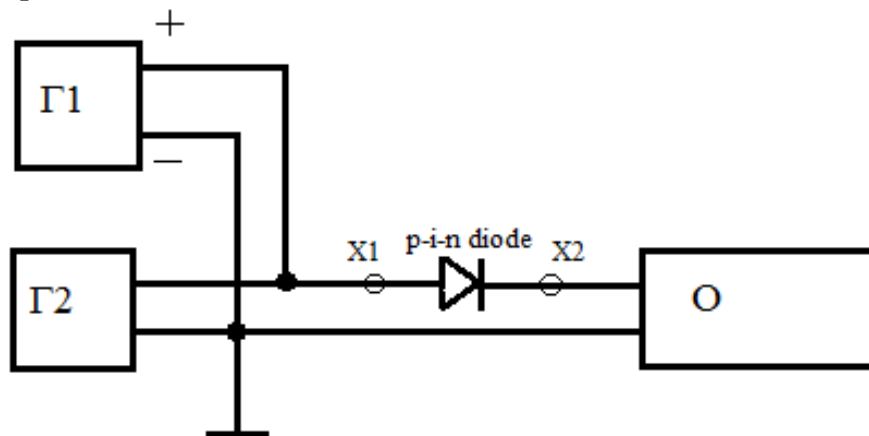


Рис.1. Схема включения диода

Время обратного восстановления измеряется на экране осциллографа как отрезок времени от момента прохождения прямого тока через нулевое значение до момента пересечения оси времени с прямой, проходящей через две точки на кривой уменьшения обратного тока с ординатами 90 и 25% от его амплитуды[2].

Считается, что диод выдержал испытание, если время обратного восстановления и заряд восстановления не превышают установленных норм.

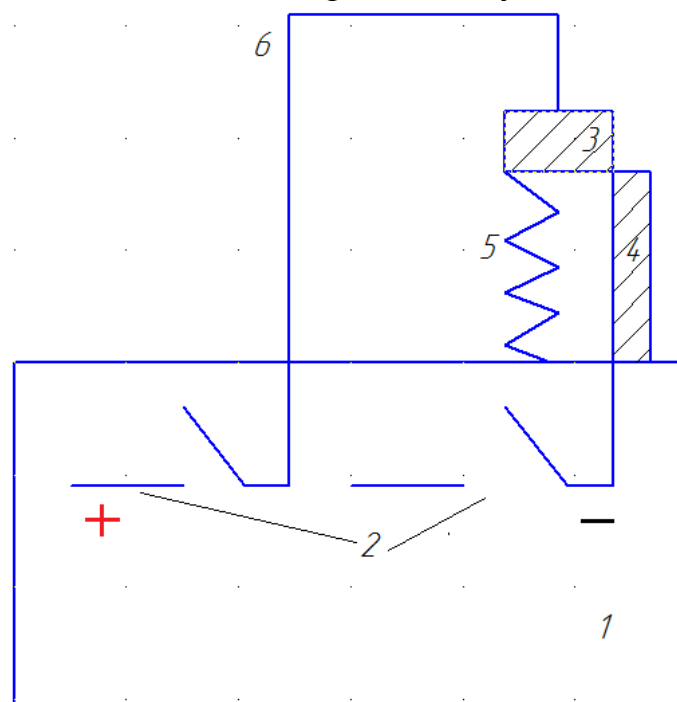


Рис.2. Эскиз, необходимая оснастка для измерения характеристик рiп – диода. 1 - контактная группа, 2 - контакты, 3 - чип, 4 - медная фольга, нижний контакт, 5 - пружина, 6 - проволока, верхний контакт

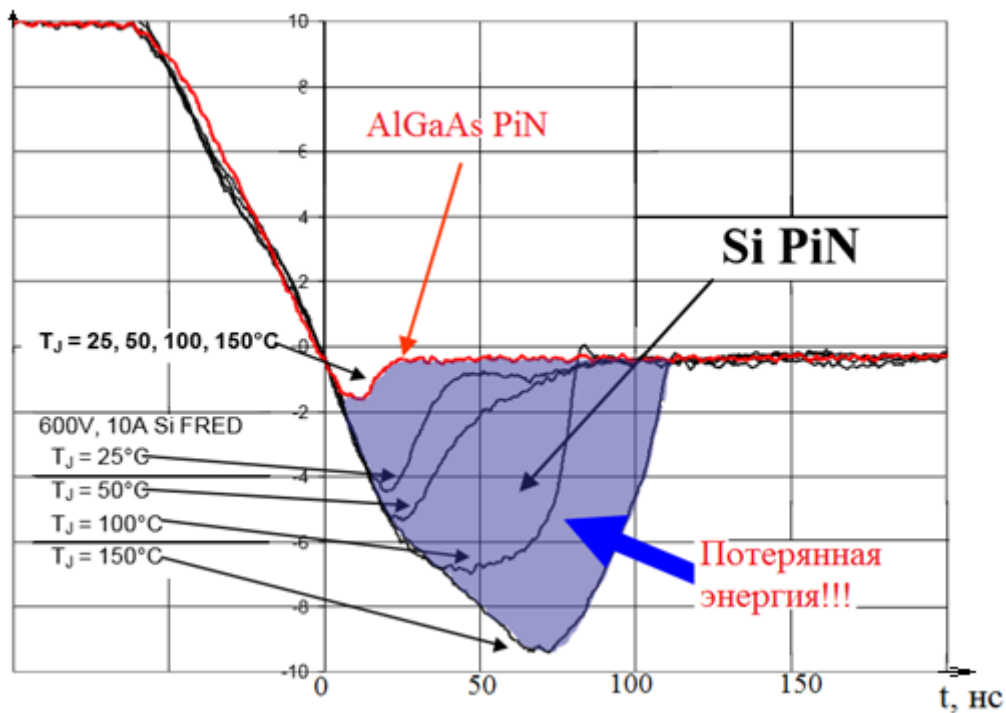


Рис.3. Прогнозируемые характеристики от исследуемого pin –диода

Результаты времени обратного восстановления для чипа с топологическим размером 3x3 мм приведены ниже.



Рис.4. Время обратного восстановления для pin – GaAlAs 3x3 мм, составило 40 нс.

**Вывод.** В результате проделанных измерений можно сделать выводы о том, что образцы на основе гетероструктуры GaAlAs, для чипа с топологическим размером 3x3 мм превышают показатели аналогов по таким параметрам как:

- время обратного восстановления составило 40 нс.
- предельная рабочая температура 250 °С.

### Список литературы

[1] *Грехов И.В.* Силовая полупроводниковая электроника и импульсная техника. Вестник РАН, 2008, т. 78, № 2, С. 106-131. <https://b-ok.org/book/2992192/92241d>

[2] *В.П.Ланцов, С.А.Эраносян.* Электронная компонентная база электронных устройств. Часть 1 «Силовая электроника», №5, 2009, С. 4-7. [https://power-e.ru/2010\\_2\\_08.php](https://power-e.ru/2010_2_08.php)

[3] *Крюков В.Л., Крюков Е.В.* Перспективная технология получения высоковольтных р-і-п слоев GaAs-AlGaAs для силовой электроники, журнал «Наукоемкие технологии» т. 15, №2, 2014. <http://www.radiotec.ru/article/14236>

**Гатауллин Тимур Фагирович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [komrad.gataullin2010@yandex.ru](mailto:komrad.gataullin2010@yandex.ru)

**Научный руководитель: Адарчин Сергей Александрович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [adarchin@rambler.ru](mailto:adarchin@rambler.ru)

А.А. Конохов

## ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

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

В современном мире лазеры находят своё применение во многих областях медицины и промышленности, в военной области и в быту. В связи с этим крайне важно точно определять энергетические параметры каждого лазера. Для этих целей существует множество методов, одним из которых является фотоэлектрический метод.

В основе данного метода измерения энергетических параметров лежит переход носителей заряда под действием фотонов исследуемого лазерного излучения на более высокие энергетические уровни. Первичным фотоэлектрическим измерительным преобразователем в данном случае служат фотоприемники, которые делятся на две группы: с внешним и внутренним фотоэффектом. Энергия электрического поля в фотоприемниках преобразуется в электрическую, которую далее измеряют. Таким образом, выходной электрический сигнал фотоприемника зависит не от мощности падающего лазерного излучения, а от количества квантов излучения и от энергии каждого кванта [1].

В общем случае выражение преобразования входного оптического сигнала в выходной электрический, которое осуществляется посредством первичного измерительного преобразователя, можно представить в следующем виде:

$$I = I_{\Phi\Pi} + I_T = S_1 P + I_T,$$

где  $I$  – полный ток, протекающий через фотоприемник;  $I_{\Phi\Pi}$  – ток через фотоприемник, вызванный падающим излучением;  $I_T$  – темновой ток;  $S_1$  – спектральный коэффициент преобразования;  $P$  – мощность падающего на фотоприемник излучения.

Наиболее широкое распространение получили фотоприемники на основе внутреннего фотоэффекта, такие как фототранзисторы, МДП-фотоприемники, фотодиоды, а также другие полупроводниковые фотоприемники. Измерение энергетических параметров лазерного излучения чаще всего используются фоторезисторы и фотодиоды.

В основе действия фоторезисторов лежит эффект фотопроводимости, который заключается в том, что в результате попадания оптического излучения на поверхность полупроводника возникают свободные носители заряда. Фотопроводимость влечет за собой уменьшение электрического сопротивления, а, следовательно, и увеличение тока, который протекает через фоторезистор[2].

Выражение абсолютной спектральной чувствительности фоторезистора может иметь следующий вид:

$$S_{\lambda} = eVQ\mu\tau \frac{u\lambda}{l^2 \cdot 1,24},$$

где  $e$  – заряд электрона;  $Q$  – квантовый выход внутреннего фотоэффекта;  $V$  – объем освещенности части полупроводника;  $\mu$  – подвижность фотоносителей;  $u$  – напряжение, приложенное к фоторезистору;  $\tau$  – время жизни фотоносителей;  $l$  – расстояние между контактами;  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения.

Фоторезисторы способны перекрывать широкий спектральный диапазон (от 0,4 до 25 мкм), однако обладают достаточно большой инерционностью и высокой чувствительностью, что несколько ограничивает их применение в области измерения энергетических параметров лазерного излучения.

Наиболее широкое применение для данных целей имеют германиевые и кремниевые фотодиоды. Возникающие под действием излучения неосновные носители диффундируют через  $p$ - $n$ -переход, за счет чего ослабляют электрическое поле, что влечет за собой изменение электрического тока в цепи. Фототок в широких пределах линейно зависит от интенсивности падающего излучения и практически не зависит от напряжения смещения. Для измерения энергетических параметров излучения обычно используют фотодиодный режим, поскольку при этом диапазон линейности и быстродействие гораздо больше, чем в фотовольтаическом режиме.

Абсолютная спектральная чувствительность фотодиода имеет следующий вид:

$$S_{\lambda} = tgQ\lambda(1 - r),$$

где  $t$  – коэффициент пропускания окна прибора;  $g$  – коэффициент собирания носителей;  $r$  – коэффициент отражения.

Область спектральной чувствительности кремниевых фотодиодов составляет от 0,4 до 1,2 мкм, германиевых – от 0,3 до 1,8 мкм.

Фотодиоды обладают следующими основными преимуществами: небольшие габариты, низковольтное питание, высокая надежность и механическая прочность, достаточно высокая стабильность чувствительности, низкий уровень шумов, а также помехозащищенность от электрических и магнитных полей[3].

Таким образом, с помощью фотоэлектрического метода можно с большой точностью измерить как временные параметры лазерного излучения, так и его мощность.

## Список литературы

[1]. *Иващенко П.А.* Измерение параметров лазеров. — М.: Издательство стандартов, 1982. — 168 с.

[2]. *Котюк Л.Ф.* Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения. — М.: Радио и связь, 1981.— 188 с.

[3]. *Хирд Г.* Измерение лазерных параметров.: Пер. с англ.//Под ред. Ф.С. Файзуллова. — М.: Мир, 1970.— 540 с.

**Конохов Алексей Александрович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: James672@yandex.ru

**Научный руководитель: Адарчин Сергей Александрович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: adarchin@rambler.ru

С.С. Крисанов

## **ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ СТЕНД КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА.**

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

Выпуск серийной продукции на производстве сопровождается большим числом контрольных точек, одной из которых является проверка электрических параметров. Для проверки такой проверки используются измерительные комплексы, блоки и стенды. Комплексы позволяют решать большинство задач, но потребляют много энергии, имеют большие массогабаритные показатели, обладают плохой ремонтпригодностью и не способны к модификации под уникальные задачи [3]. Компенсировать это недостатки позволяют блоки и стенды, рассчитанные на узкое применение. Но благодаря развитию современной электроники возможно сочетать достоинства обеих систем.

Решением этой задачи может являться стенд контроля электрических параметров, представляющий из себя микроконтроллер, функционирующий по загружаемой программе. В его работу входит управление коммутацией согласно тестовых таблиц и сбор, преобразование, дальнейшее хранение данных о результатах измерений. Помимо работы согласно программе можно самостоятельно задавать какие и куда сигналы подавать.

Частота работы современных микроконтроллеров позволяет производить большой объём вычислений с данными от измерителей или же просто хранить данные [1]. При связи с ЭВМ способен выводить статистические данные (но это заслуга больше ЭВМ, чем прибора). Частота работы микроконтроллера превышает в несколько раз частотные возможности большинства коммутационных элементов, при которых обеспечивается режим измерений. Это позволяет проводить промежуточные расчетов между выполнениями тестов, что полезно в тех случаях, когда при проверке микросхемы необходимо отслеживать статистику, сравнение с другими проверяемыми схемами или же отслеживать динамику.

На рис. 1 и 2 приведены графики с осциллографа, которые показывают задержку между сигналом на микроконтроллере (МК) из семейства Atmega 328P-PU (красная линия) и коммутирующей частью, реализованной на 5 вольтовых электромагнитных реле марки НК4100f-DC5V-SHG (синяя линия) при включении и выключении соответственно. Стоит учитывать и тот факт, что реле управляется не напрямую от микро контроллера, а по средствам полевого МОП транзистора с крутизной характеристики 370, включенного последовательно с источником в 9V и якорем реле [2].

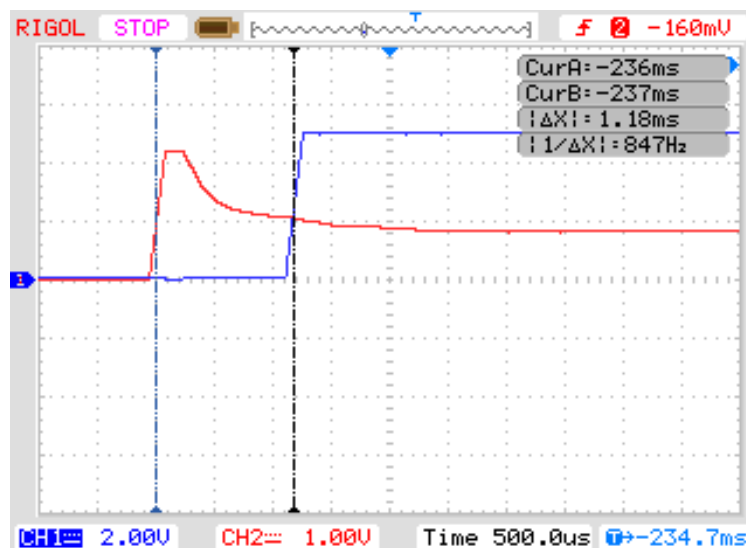


Рис. 1. Время задержки при включении

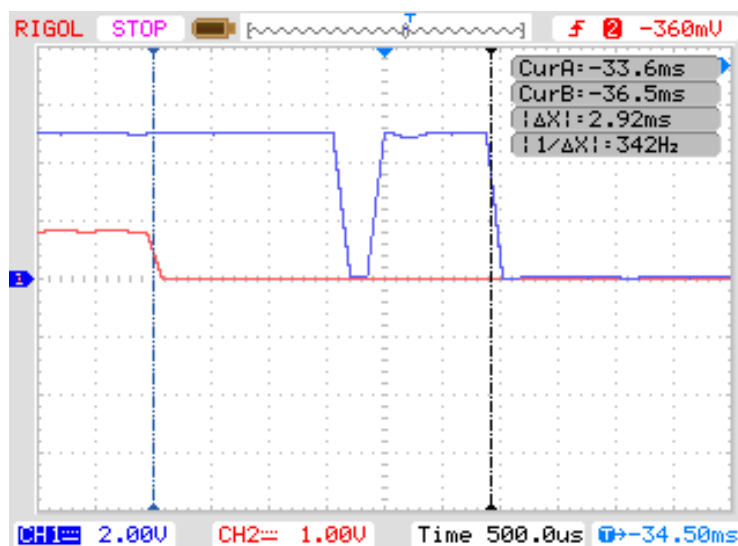


Рис. 2. Время задержки при выключении

Можно наблюдать переходные процессы на управлении при выключении, но их продолжительность составляя несколько миллисекунд, за которые реле не успеет отреагировать на сигнал, поэтому они не влияют на работу прибора. При размыкании цепи коммутации выводов видно, что сигнал на МК имеет потенциал земли, а реле еще не успела отреагировать на это измерения, наблюдается дребезг в цепи коммутации, связанный с собственным дребезгом реле. Дребезг не имеет выплесков напряжений выше нормы, поэтому является допустимым. Для уменьшения дребезга необходимо специальное включение, но оно отразится на скорости работы схемы.

Если принять рис.1 за включение схема, а рис.2 – за выключение, то время включения (разница между изменением управляющего сигнала и реакции реле на него) будет составлять 1.18 мс, а выключения 2.92 мс. При одновременном включении 16 ключей (при проверке 16-выводных микро-



схем) время включения падает до 6 мс (если судить по самому долго ключу). Следовательно, минимальным временем переключения схемы можно принять 10 мс. Это позволяет производить более 100 измерения в секунду. К сожалению, надо учитывать и время насыщения проверяемой микросхемы, до появления устойчивого состояния. Это замедляет скорость проверки до 4-6 тестов в секунду, а иногда и более. Исходя из этого, появляется логичный вопрос: а зачем же гнаться за быстродействием измерительного устройства, если время реакции схемы вносит основной вклад во время работы? Ответом могут являться две точки зрения:

1. Если использовать блок в условиях массового производства, (производство миллиона микросхем) с контролем по 100 тестам, на каждом из которых сэкономлено 1 миллисекунда, время на проверку сократится 27 часов.

2. Минимальное время позволяет обеспечивать необходимый фронт нарастания сигнала, который необходимо учитывать для обеспечения условий измерения.

Рассмотренный стенд проверки интегральных схем в условиях производства позволяет минимизировать трудоёмкость при подготовке производства и измерении интегральных схем. При его использовании становится возможным измерять схемы различных серий с достаточной точностью, а так же обеспечивать условия измерений

### Список литературы

[1] Драч В.Е., Родионов А.В. Перспективные технологии производства элементной базы телекоммуникационных устройств // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 10. С. 85-92.

[2] Зайчик И.Ю., Зайчик Б.И. Практикум по электрорадиоизмерениям: Учеб. пособие для учащихся радиотехн. техникумов.-2-е изд., переработка. и доп. – М.: Высш. шк., 1985.-239с.

[3] Мирский Г.Я. Радиоэлектронные измерения. Изд. 2-е, перераб. и доп., М.: Энергия, 1965.-528с.

**Крисанов Сергей Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: SerjW0r@yandex.ru

**Научный руководитель: Драч Владимир Евгеньевич.** Кандидат технических наук, доцент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: drach@bmstu-kaluga.ru

В.С. Зайончковский, И.А. Прохоров, Аунг Чжо Чжо,

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННЫХ ПОДСЛОЕВ МЕДИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПЛЕНОК С ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫМ СЛОЕМ Fe-Cr-Co НА КРЕМНИИ**

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

**Введение.** В современной электронике различные активные и пассивные элементы реализуются, в основном, в пленочном исполнении. При этом вещества этих слоев могут быть созданы также в объемном виде. Но имеются материалы, традиционно получаемые в объемном исполнении, которые не могут быть реализованы в пленочном исполнении, ввиду строгих физических или химических ограничений. При этом, при попытках нанесения таких материалов в пленочном исполнении на подложки, или проведении отжига структур с этими пленками происходят нарушения сплошности пленок (появление трещин либо отслоение от подложек).

Одним из таких ограничений является реализация, в определенных материалах, спинодального распада. Спинодальный распад, приводящий к существенным механическим повреждениям пленок, является нежелательным процессом.

В сплавах составов на основе Fe-Cr-Co, легированных элементами Mo, Al, W, Nb, V и другими, при проведении специальных отжигов имеет место спинодальный распад, при котором формируется мелкодисперсная структура кристаллитов. Эти сплавы до отжига являются ферромагнитными, а после отжига с реализацией спинодального распада, содержат ферромагнитную и парамагнитную фазы, при этом размеры кристаллитов ферромагнитной фазы составляют не более сотни нанометров, что приводит к резкому повышению твердости и коэрцитивной силы этих составов, [1].

**Описание образцов и технологии их получения.** В нашей работе, пленки, содержащие слои состава Fe-Cr-Co, легированных элементами, приводящими при отжиге к высококоэрцитивному состоянию, получались магнетронным напылением на постоянном токе в модифицированной установке УВН-71ПЗ, имеющей три магнетронных источника. В качестве подложек использовались монокристаллические образцы кремния, вырезанные из полированных с двух сторон пластин кремния КДБ-10 толщиной 485 мкм с ориентацией поверхности (111), при этом разориентация составляла не более  $0.2^\circ$ . Все образцы имели в плане форму квадратов со стороной 15 мм. Эти пленки, содержащие слои Fe-Cr-Co напылялись на сторону образцов кремния, имеющих небольшие риски. Размеры пленок в плане составляли  $12 \times 12 \text{ мм}^2$ . Для достижения высококоэрцитивного состояния пленки отжигались в установке фотонного отжига в вакууме, лучше, чем  $10^{-3}$  Па. При

этом остаточная атмосфера была восстановительной в связи с применением диффузионного насоса с маслом Адиол для получения высокого вакуума. Отжиг пластин в установке фотонного отжига производился при условии изохронного отжига – время нахождения образцов на максимальной температуре для данной экспериментальной точки было равным одной минуте. Попытки получения пленок, указанных выше составов, с добавками указанных выше элементов, на пластинах кремния являются успешными, но при проведении отжигов с целью реализации высококоэрцитивного состояния имеет место нарушение сплошности пленок. Так наблюдалось, что слой указанного выше состава толщиной 1 мкм, повреждал кремниевую монокристаллическую подложку на глубину до 10 мкм, [2].

В литературе описаны приемы использования компенсационного слоя алюминия, для предотвращения разрушения пленки, содержащей два несовместимых по коэффициенту термического расширения слоя, [3].

В этих приемах используют многослойные пленки с компенсирующим слоем, расположенным между несовместимыми между собой слоями, что дает возможность реализовать пленочные композиции, в которых отсутствуют трещины и отслоения.

Выбор оптимальной толщины компенсирующего слоя является непростой задачей, т.к. возможны случаи, при которых разрушение пленок происходило несколько недель спустя. Характер разрушения пленок представлен на рис. 1.

Для проведения спинодального распада составов основе Fe-Cr-Co используют диапазон температур (550÷700)°С, что не позволяет использовать в качестве компенсирующего слоя алюминий, имеющий температуру плавления 660°С. Этот слой должен быть изготовлен из пластичного металла. Из недорогих металлов на первом месте по уровню пластичности (величине относительного удлинения при растяжении при температуре ниже температуры рекристаллизации), находится медь.

В работе [4] представлены магнитные свойства структур с толщиной слоя Fe-Cr-Co порядка 100 нм. Слой меди в нашей структуре выполняет компенсационные функции, Структура пленки, напыленной в магнетронном разряде на постоянном токе, представлена на рис. 1.

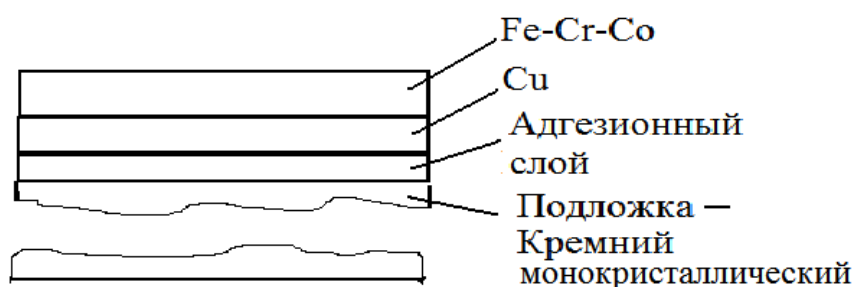


Рис. 1

Для определения степени деформации образцов пленок на квадратных подложках были проведены измерения радиуса кривизны изгиба с помощью двухкristального рентгеновского дифрактометра ДРОН-3М в режиме определения радиуса кривизны пластин с помощью метода, описанного в работе [5]. Максимально возможный радиус кривизны монокристаллов, определяемый этим способом – 250 м. В работе [6] выполнены измерения радиусов кривизны структур, содержащих слои Fe-Cr-Co толщиной сотни нанометров.

**Экспериментальные результаты.** Выбор оптимальной толщины компенсирующего слоя является непростой задачей, т.к. возможны случаи, при которых разрушение пленок после отжига происходило после того, как проходило несколько (до 2-3-х) недель. Характер предразрушения пленок (в зоне вблизи зоны разрушения) представлен на рис. 2. На этом же рисунке дан фрагмент объект-микрометра, для оценки размеров трещин в пленке вблизи зоны разрушения (в зоне предразрушения).

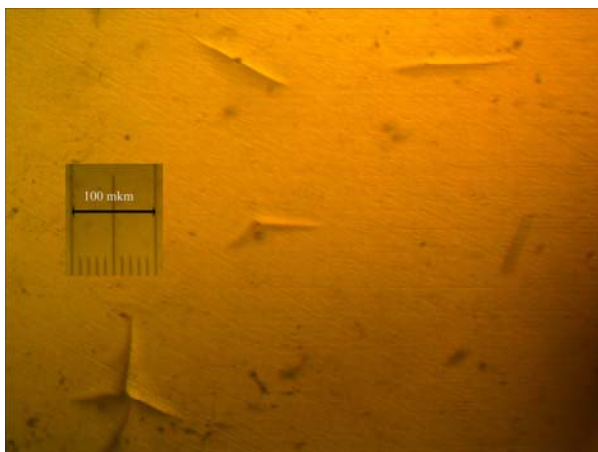


Рис. 2 Трещины в пленке в зоне вблизи зоны разрушения

На рисунке показан мерный отрезок – кусок шкалы объект-микрометра на отражение.



Рис. 3 Вид зоны разрушения пленки

Полученные образцы кремниевых подложек с пленками, содержащими магнитоактивный слой Fe-Cr-Co, были изогнутыми, при этом пленки на подложках подвергались растяжению. Направление изгиба у всех образцов одинаковое – вогнутость со стороны пленки.

Параметры образцов и полученные радиусы их кривизны изгиба представлены в таблице 1.

Таблица 1

№п/п	Толщина слоев, мкм		Температура отжига, град Цельсия	Радиус кривизны R, м
	Cu	Fe-Cr-Co		
1	1.9	3.6	Без отжига	- (не измерялся)
			600	Частичное разрушение
			610	Частичное разрушение
			630	Частичное разрушение
2	3.8	3.6	Без отжига	7.9
			600	5,8
			630	5.0
			650	4.9
			670	- (не измерялся)
			690	Частичное разрушение
3	1.9	1.8	Без отжига	14.4
			600	9.6
			630	6.7
			650	5.8

### Выводы

1. Доказана возможность получения пленок, содержащих слой дисперсионно-твердеющего состава с толщиной сравнимой с верхней границей диапазона толщин тонких пленок (условно принятой равной величине 5 мкм).

2. Определены условия высоковакуумного фотонного отжига, для которого набора толщин магнитоактивного и компенсационного слоев, при которых соблюдается целостность пленок.

### Список литературы

[1] Кекало И.Б. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами: Учебник для вузов./ И.Б. Кекало, Б.А. Самарин - М.: Металлургия, 1989, 496 с.

[2] Зайончковский В.С. Особенности деформации структур с многослойными металлическими пленками. / В.С. Зайончковский, Аунг Чжо Чжо, И.А. Прохоров, // Научно-технические технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе. Материалы Региональной научно-технической конференции: 17 - 19 апреля 2018 г., Т2, с. 143-148

[3] Gaydaychuk V.A. The dynamic sublayers for improving adhesion of CVD Diamond films on copper/ V.A. Gaydaychuk, S.A. Linnik, V.V. Okhot-

nikov//5th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects 2016. IOP Publishing – IOP Conf. Series: Journal of Physics:Conf.Series 830 (2017) 012102 doi:10.1088.1742-65996/830/1/012102.

[4] *Аунг Чжо Чжо*. Многослойная тонкая пленка для продольного смещения магниторезистивных преобразователей. / Аунг Чжо Чжо, В.С. Зайончковский, Н.С. Перов, И.М. Миляев. // Труды XXV Научно-технической конференции с участием зарубежных представителей, Крым, Судак, 16-12 сентября 2018 г., с. 160-165.

[5] *Прохоров И.А., Захаров Б.Г.* Рентгенодифракционные исследования особенностей релаксации и распределения макронапряжений в эпитаксиальных структурах. / И.А. Прохоров, Б.Г. Захаров// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 1999. №2. С. 106-109.

[6] *Зайончковский В.С.* Особенности деформации структур с многослойными металлическим пленками. / В.С. Зайончковский, И.А. Прохоров, Аунг Чжо Чжо // Научно-технические технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе. Материалы Региональной научно-технической конференции: 17 - 19 апреля 2018 г., Т2, С. 143-148

**Зайончковский Вячеслав Станиславович** – доцент, канд. физ.-мат. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [zajonc4340@gmail.com](mailto:zajonc4340@gmail.com)

**Прохоров Игорь Алексеевич** – доцент, канд. физ.-мат. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, старший научный сотрудник Лаборатории Космического материаловедения ИК РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Калуга. E-mail: [igor.prokhorov@mail.ru](mailto:igor.prokhorov@mail.ru)

**Аунг Чжо Чжо** – аспирант КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, E-mail: [akkyaw.bmstu.50@gmail.com](mailto:akkyaw.bmstu.50@gmail.com).

А.О. Терских

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ЧАСТОТЫ КМОП ОУ ПУТЁМ КОСВЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

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

Обратная связь – это мощный метод, который находит широкое применение в аналоговых схемах. С высоким усилением обеспечивает закрытую передаточную характеристику с отрицательной обратной связью независимую от коэффициента усиления операционного усилителя (ОУ). Тем не менее, достаточное усиление является ключевым требованием, чтобы использовать данный метод [1].

Компенсация, при которой ток компенсации подаётся обратно косвенно от выхода на внутренний узел высокого импеданса, называется косвенной обратной связью [2]. При этом, конденсатор компенсации соединяет выход и внутренний узел низкого импеданса, который косвенно подаёт ток к узлу  $A$  высокого импеданса (рис.1.).

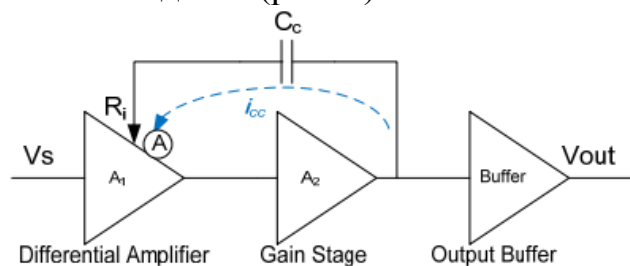


Рис.1 Блок-схема косвенной обратной связи

В свою очередь схема принципиальная показана на Рис.2.

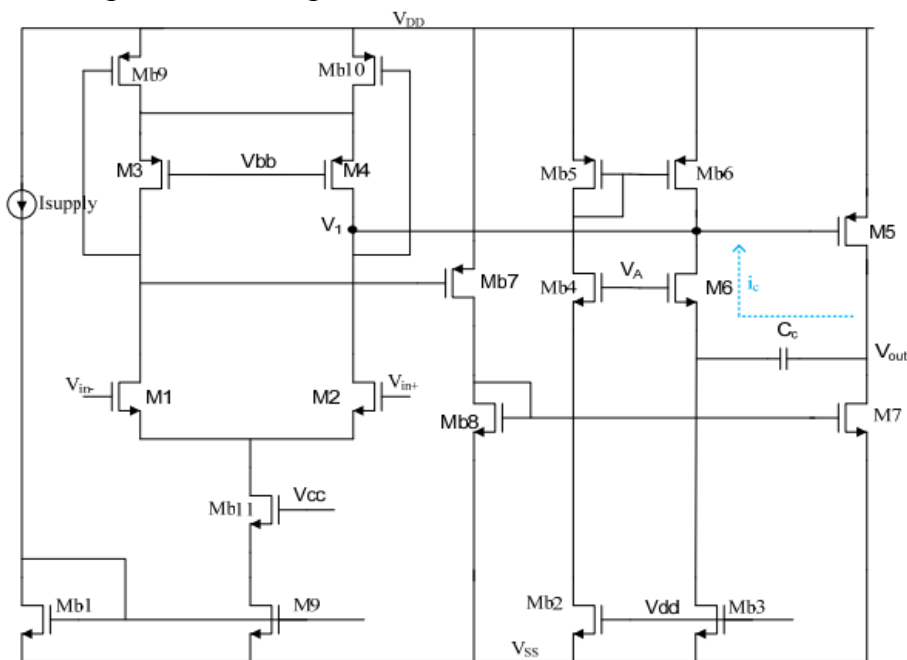


Рис.2 Схема принципиальная ОУ с косвенной обратной связью

ОУ, принципиальная схема которого изображена на рис.2, имеет дифференциальный входной каскад, и поэтому нуждается в отрицательной обратной связи. Выходной каскад является классом АВ, что позволяет достигнуть высокой скорости нарастания, при больших ёмкостных нагрузках, порядка 100 пФ и более [3].

Выполним расчёт ёмкости обратной связи  $C_C$  по следующей формуле:

$$C_C = \frac{K_U}{2} \cdot \pi \cdot f_{EY}$$

где  $K_U$  – коэффициент усиления ОУ;  $f_{EY}$  – ширина полосы пропускания.

Получаем  $C_C = 5$  пф, а для обычной схемы с отрицательной обратной связью (ООС) требуется конденсатор  $C_C = 35$  пф. Отсюда следует, что конденсатор меньший по ёмкости, также имеет меньшую площадь на кристалле.

Выполнив моделирование нашего ОУ получим следующую выходную АЧХ (рис.3.).

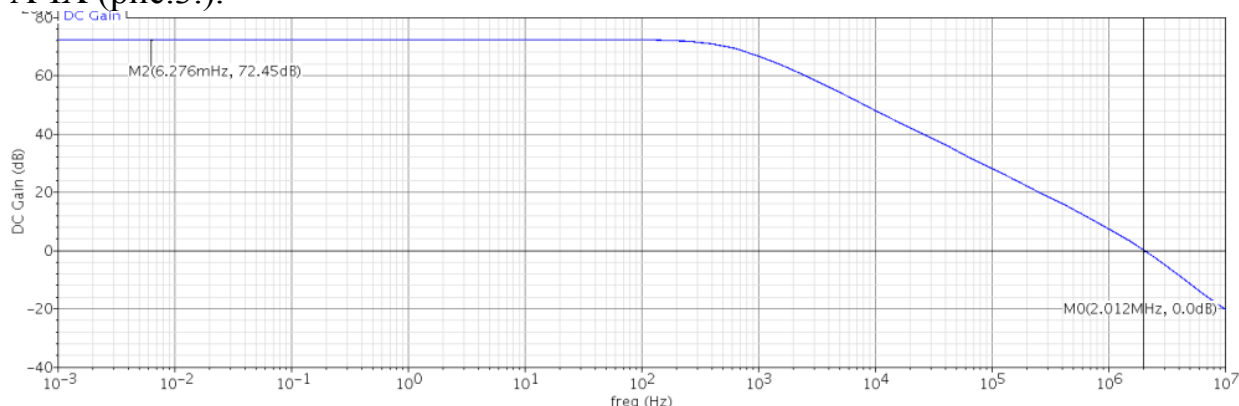


Рис.3. Выходная АЧХ

На полученной выходной АЧХ видим, что ширина полосы пропускания составляет 2,01 МГц. Для обычной схемы с ООС ширина полосы пропускания составляет 209,11 кГц. Составим сравнительную таблицу параметров схем с обычной и косвенной ООС.

Таблица 1.

Параметры схем

	Схема с обычной ООС	Схема с косвенной ООС
, МГц	0,2	2,01
$C_C$ , пФ	35	5

Метод косвенной обратной связи, обсуждаемый в данной работе, является практичной и превосходной схемой компенсации для ОУ, и позволяет создавать усилители с гораздо более высокой скоростью и более мелкими областями. ОУ, разработанный по методу косвенной обратной связи, достигает чрезвычайно высокую производительность по сравнению с исходным ОУ. Достигается широкая полоса пропускания даже при большой нагрузке около 100 пФ, при использовании малых токов. По сравнению с



простым методом компенсации, достигается ширина полосы пропускания до 10 раз больше, а конденсатор компенсации до 7 раз меньше, требующий гораздо меньшую площадь.

### **Список литературы**

[1]. *Мамий А.Р., Тлячев В.Б.* Операционные усилители. – Майкоп: АГУ, 2005. – 192 с.

[2]. *Операционные усилители и компараторы.* Справочник–М.: Издательский дом ДООЭКА–ХХІ, 2001. – 560 с.

[3]. *Шило В.Л.* Популярныe микросхемы КМОП: Справочник–М.: Горячая линия–Телеком, 2001–112 с.

**Терских Алексей Олегович** – Студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: axel@traseur.ru

**Научный руководитель: Андреев Владимир Викторович.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

Е.А. Лутовин

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОДГОНКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ, ИСКЛЮЧАЮЩИХ ДЕГРАДАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИС ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

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

### **Введение**

При исследовании деградационных процессов в ИС операционных усилителей было установлено, что быстрый нагрев и последующее охлаждение резистивной пленки, а также разрушение материала, находящегося непосредственно у края выжженного лазером места и не подвергавшегося стабилизации или пассивации, приводят к нестабильности во времени пленочного строения, вызывающей послеподгоночный дрейф характеристик. В результате сопротивление точно подогнанного резистора может выйти за пределы допуска, меняется также и температурный коэффициент сопротивления. Применение типовых видов реза для минимизации повреждений и эффекта послеподгоночного дрейфа в нашем случае не позволили решить эту проблему.

### **Технологический способ исключения деградации тонкопленочных резисторов**

Решением проблемы деградации резистивной пленки по периметру выжженного лазером места, приводящей к возникновению температурного дрейфа  $U_{i0}$  со временем наработки, стал подбор режима работы лазерной установки позволяющей при подгонке резистора не сжигать защитное покрытие кристалла по периметру отверстия выжигаемого лазером, а всего лишь оплавливать его, что позволило защитить периметр отверстия от внешних воздействий и деградации и как следствие избавиться от температурного дрейфа  $U_{i0}$ .

Длина волны излучения на установке лазерной подгонки подбирается по цвету резистивной пленки, таким образом, чтобы лазерное излучение не отражалось от нее. Мощность излучения, для получения необходимого прожига, подбиралась изменением тока накачки с шагом в 200мА.

Из рис. 1,а видно, что при заданном токе накачки в 20А лазер не оказывает заметного влияния на тонкопленочный резистор. На рис. 1,б можно увидеть, что при токе накачки 20,2А лазер оплавляет защитное покрытие на поверхности тонкопленочного резистора, но также как и при токе 20А не оказывает влияние на саму резистивную пленку. Рис. 1,в показывает результат лазерной подгонки при заданном токе накачки 20,4А, здесь видно, что вся площадь лазерного реза не имеет дефектов, а защитный диэлектрик оплавился и защищает границы отверстий прожженных

лазером. На рис. 1,2 представлен внешний вид тонкопленочного резистора после лазерной подгонки при токе накачке 20,6 А, при данном режиме также как и при токе 20,4 А вся площадь лазерного реза не имеет дефектов, но защитный диэлектрик сгорает и не защищает границы отверстий прожженных лазером, что в свою очередь приводит к деградации резистора со временем эксплуатации. На рис. 1,д представлен фрагмент топологии тонкопленочного резистора после лазерной подгонки при токе 20,8 А, данный режим подгонки приводит к нарушению диэлектрического слоя под резистивной пленкой и приводит к нарушению работоспособности ИС в целом. Таким образом, проанализировав полученные результаты можно сделать вывод, что оптимальным является режим лазерной подгонки при токе накачки 20,4 А, позволяющий обеспечить максимальную стабильность параметров пленочных резисторов после подгонки их параметров.

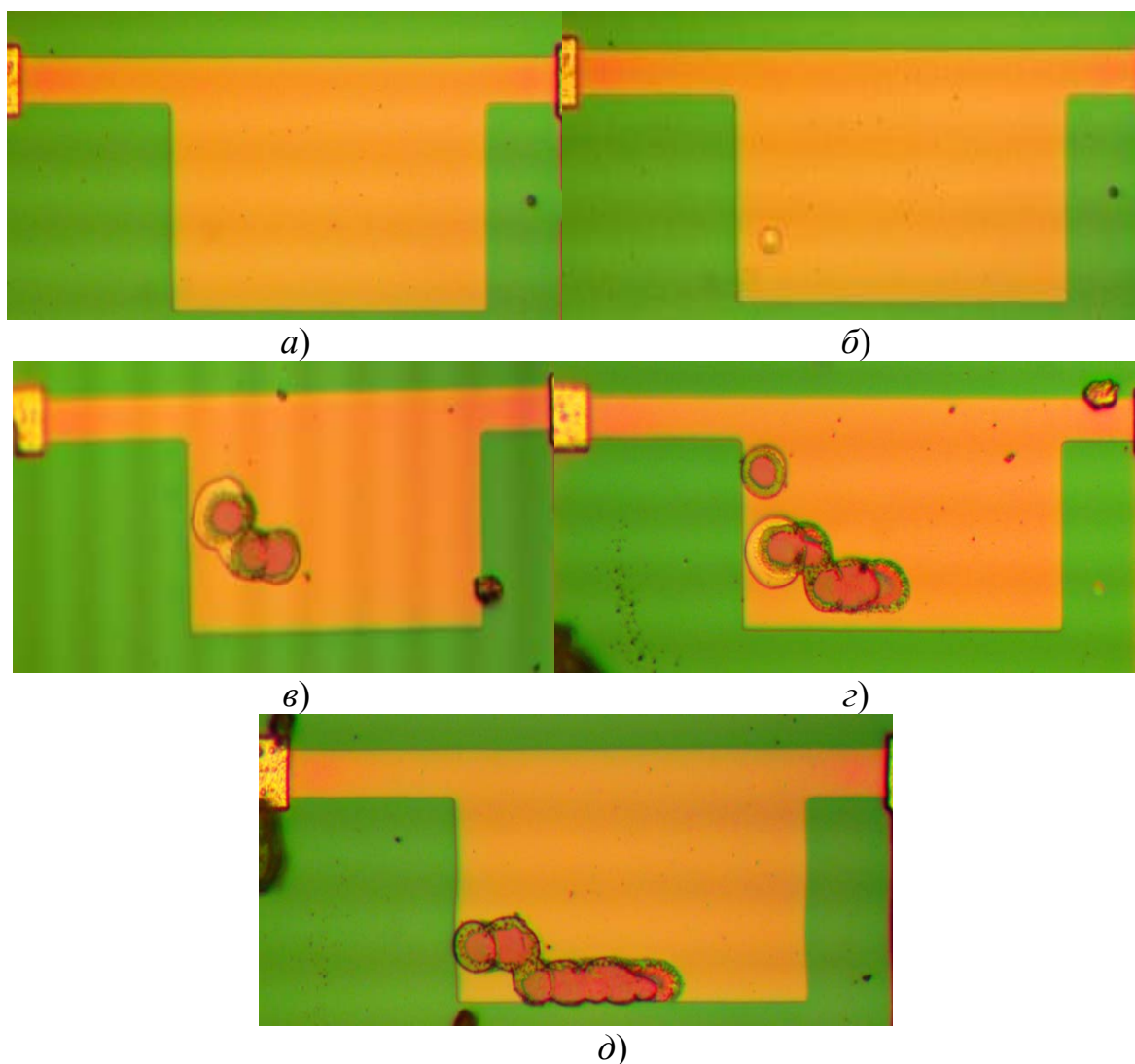


Рис.1. Внешний вид тонкопленочного резистора после лазерной подгонки:  
*a)* подгонка при токе накачки 20А; *б)* подгонка при токе накачки 20,2А;  
*в)* подгонка при токе накачки 20,4А; *г)* подгонка при токе накачки 20,6А;  
*д)* подгонка при токе накачки 20,8А.

## Выводы

В результате выполнения работы опытным путем был подобран и обоснован оптимальный режим формирования тонкопленочных резисторов для получения таких заданных параметров, как температурный коэффициент сопротивления, удельное поверхностное сопротивление и контактное сопротивление. Установлено, что дрейф напряжения смещения нуля возникает при деградации пленки непосредственно у не защищенных краев лазерного реза. Подобран режим лазерной подгонки, позволяющий не сжигать защитное покрытие с поверхности тонкопленочного резистора, а оплавливать его и тем самым защищать края лазерного реза от внешних воздействий и последующей деградации при эксплуатации микросхем.

## Список литературы

- [1]. *Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А.* Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник — М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2004.
- [2]. *Андреев В.В.* Физические основы наноинженерии // учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению 152200 "Наноинженерия" / В. В. Андреев, А. А. Столяров; под ред. В. А. Шахнова. Москва, 2011. Сер. 16 Библиотека "Наноинженерия": комплект учебно-методических комплексов дисциплин по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети "Наноинженерия": в 17 кн.
- [3]. *Andreev V.V., Maslovsky V.M., Andreev D.V., Stolyarov A.A.* Method of stress and measurement modes for research of thin dielectric films of MIS structures // Proc. SPIE. Vol. 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016, (December 30, 2016). P.1022429(1-8).
- [4]. *Lugin A.N.* Electrical parameters of thin-film resistor voltage dividers // Measurement Techniques. 2013. Т. 56. № 3. С. 304-308.
- [5]. *Deepu Roy.* Characterization of electrical contacts for phase change memory cells, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2011. URL: <https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/6034886> (дата обращения 19.02.2018).
- [6]. *Кузин С.М., Павасюк В.И., Мокеров В.Г., Исаев В.В.* Обзоры по электронной технике, Сер.8 Управление качеством, Метрология, Испытания. Электрический тестовый контроль на этапах создания интегральных микросхем. Центральный научно-исследовательский институт «ЭЛЕКТРОНИКА», 1989, №8, с.1-33.
- [7]. *Сурменко Л.А., Соколова Т.Н., Конюшин А.В., Самаркин Ю.Д., Калмыков А.В.* Обзоры по электронной технике, Сер.7, Технология, организация производства и оборудование. Лазерная функциональная подгонка элементов и узлов изделий электронной техники. Центральный научно-исследовательский институт «ЭЛЕКТРОНИКА», 1987, №13, с.1-63.

**Лутовин Евгений Анатольевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: lutovine@gmail.com

**Научный руководитель: Андреев Дмитрий Владимирович.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dandreevic@gmail.com

О.И. Кацапов

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ BETASoft**

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

Практически во всех электронных устройствах для структурирования компонентов применяются печатные платы.

Трассировка печатных плат оказывает существенное воздействие на тепловые режимы работы установленных на плате электрорадиокомпонентов (ЭРЭ) [1]. Одним из вариантов предварительной оценки правильности размещения ЭРЭ на печатной плате, является моделирование тепловых процессов. Тепловое проектирование важно для повышения надежности работы устройства, так как параметры ЭРЭ зависят от температуры и многие полупроводники чувствительны к перегреву [2].

В данной работе моделирование тепловых процессов выполнено с помощью системы автоматизированного проектирования (САПР) BETASoft компании DynamicSoftAnalisys. САПР представляет собой современную, мощную и удобную систему теплового анализа электронных устройств. Модуль BETASoft-Board содержит около 2500 встроенных библиотечных компонентов. При расчете используется более 50 уравнений, позволяющих провести полноценное трехмерное моделирование явлений теплопередачи на плате. При проведении моделирования используются численные методы, основанные на принципах конечных элементов с адаптивными сетками, генерирующие адаптивные местные сетки, для того чтобы не допускать снижения точности на мелких деталях проекта. Преимущество расчета по конечно элементной схеме – повышенное быстродействие анализа при высокой точности. При анализе печатных плат с большим числом компонентов возможен импорт проектов, разработанных в популярных САПР ACCEL (P-CAD и Tango), Allegro, Cadstar, Mentor, Protel, OrCAD, PADS, VeriBest, Visula и других.

В качестве примера на рис. 1 и 2 приведена модель печатной платы в системе автоматизированного проектирования BETASoft. Элементы платы охарактеризованы размерами, местоположением, выделяемой мощностью.

В ходе моделирования был получен анализ мощности выделяемой элементами, который приведен на рис. 3.

Рис. 4 показывает нагрев каждого элемента на печатной плате.

На рис. 5 представлена карта распределения температур печатной платы.

Из результатов моделирования можно выделить наиболее теплонагруженные области печатной платы. Карта позволяет сделать выводы о не-

обходимости применения дополнительного охлаждения элементов с температурой, выходящей за пределы эксплуатационных требований.

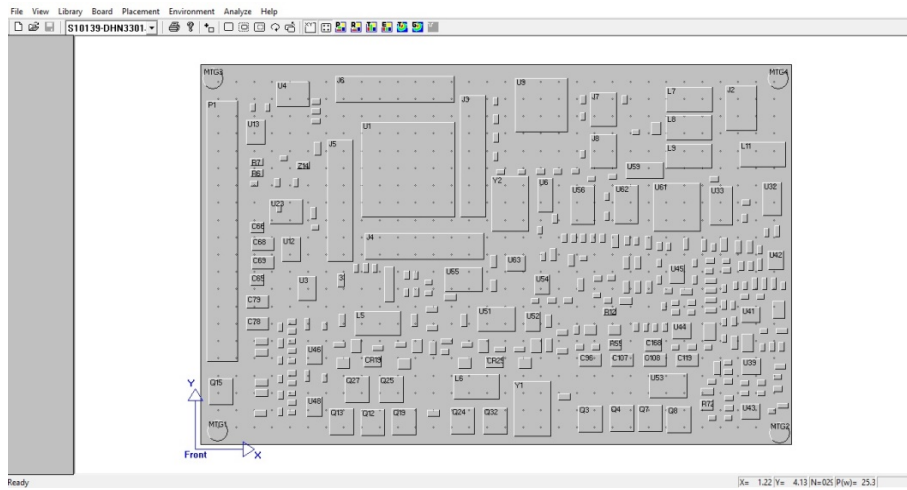


Рис. 1. Печатная плата с размещенными компонентами в САПР ВЕТАSoft

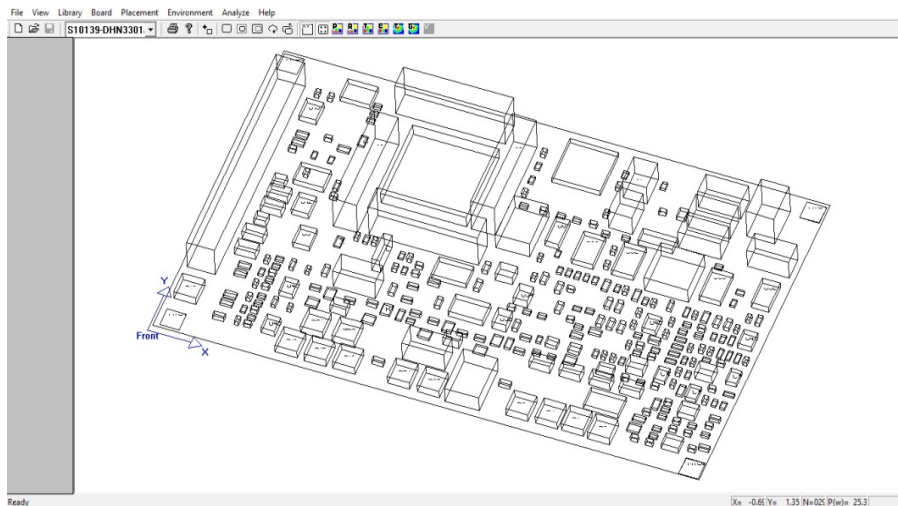


Рис. 2. 3-х мерная модель печатной платы с размещенными компонентами в САПР ВЕТАSoft

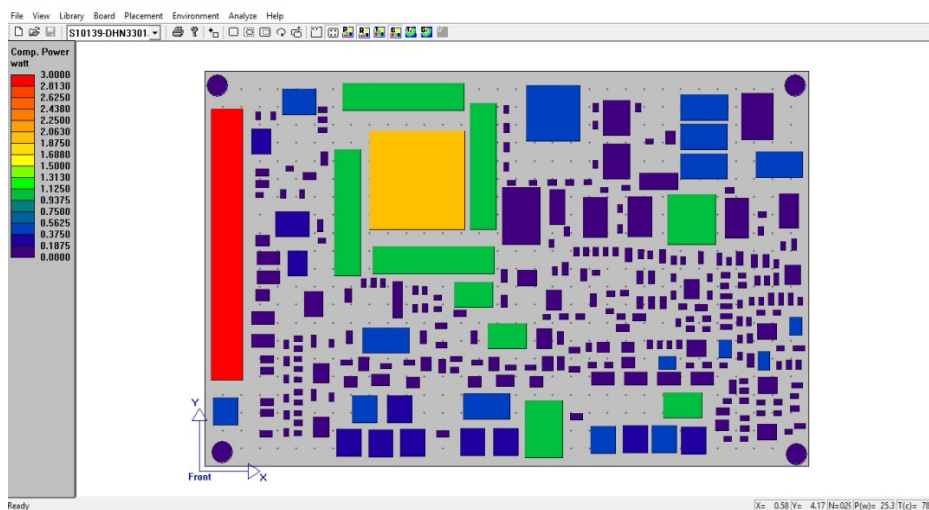


Рис. 3. Анализ мощности выделяемой элементами

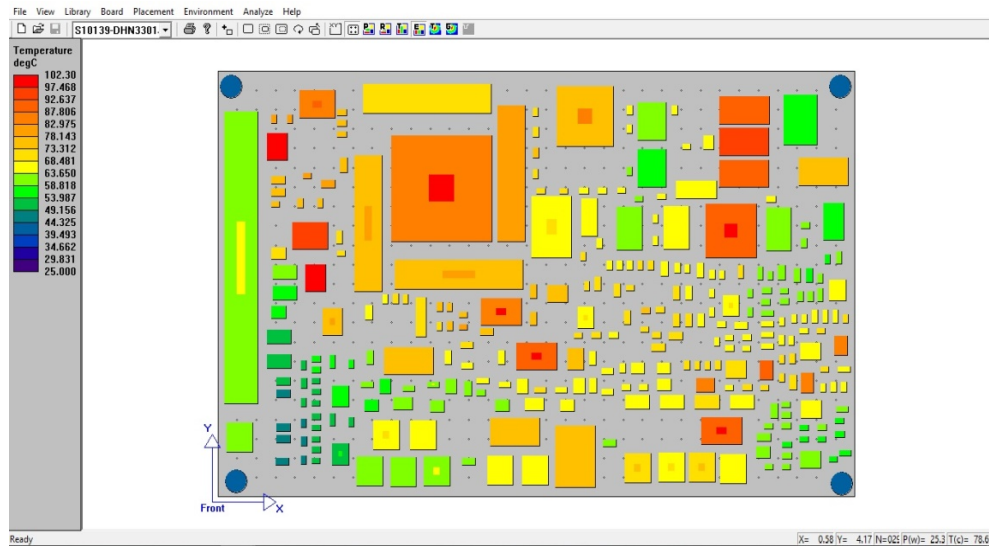


Рис. 4. Нагрев отдельных элементов на печатной плате

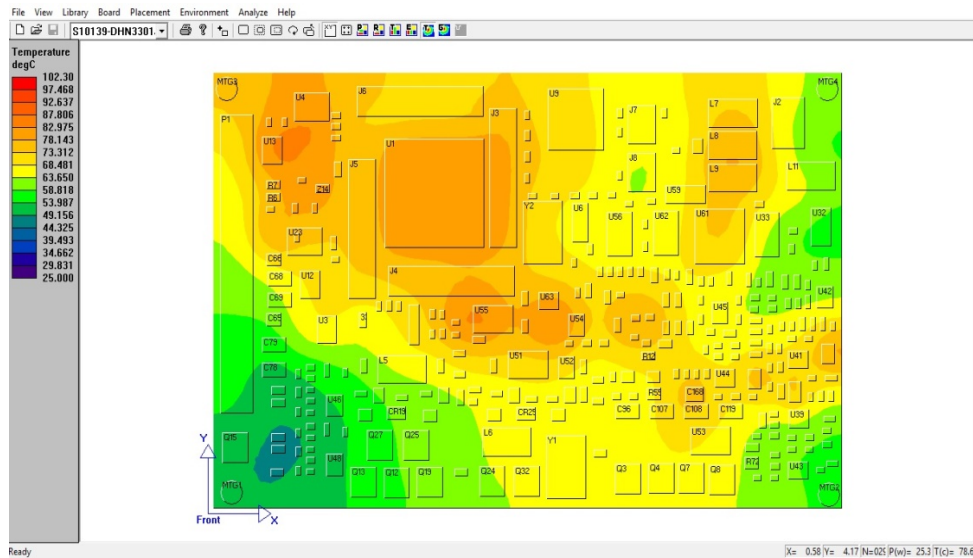


Рис. 5. Карта распределения температур печатной платы.

Таким образом, система автоматизированного проектирования ВЕ-TASoft является эффективным средством прогнозирования тепловых режимов электронных устройств.

### Список литературы

- [1] Дульнев Г.Н. Методы расчёта тепловых режимов прибора / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфёнов, А.В.Сигалов. – М.:Радиоисвязь, 1990.–312с.
- [2] Жаднов В.В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств / В. В. Жаднов, А. В. Сарафанов. – М. :СОЛОН-Пресс, 2004. – 464с.

**Кацапов Олег Игоревич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: OlegK461@yandex.ru



**Научный руководитель: Шагаев Владимир Васильевич.**  
КФ МГТУ им Н.Э Баумана. E-mail: Shagaev-vv@yandex.ru

Д.А. Романов, И.А. Прохоров, В.Г. Косушкин

## **ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИИ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ ГЕРМАНИЯ И АЛМАЗА**

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

**Введение.** Получение совершенных по структуре эпитаксиальных плёнок различных материалов сопряжено с известными трудностями, причина которых заключается, прежде всего, в многообразии факторов, влияющих как на рост, так и на структуру плёнок. Наряду со структурным совершенством, чистотой и качеством подготовки поверхности подложек, существенное влияние на структуру плёнок оказывают процессы, проходящие в системе плёнка – подложка в процессе роста, связанные, в частности, с релаксацией упругих напряжений, возникающие в эпитаксиальных структурах (ЭС) из-за несоответствия периодов кристаллических решеток подложки и пленки.

Релаксация упругих напряжений в ЭС посредством пластической деформации начинается при толщинах плёнок, превышающих критические [1], и сопровождается образованием вблизи межфазной границы (в нейтральных системах) дислокаций несоответствия (ДН). Это приводит к значительному повышению плотности дислокаций в пленках, а при определенных условиях к формированию деформационных микродвойников и дефектов упаковки [2]. И хотя к настоящему времени образования ДН в гомоэпитаксиальных структурах алмаза не обнаружено [3], релаксационные процессы могут оказывать существенное влияние на дополнительную генерацию дислокаций и ухудшение структурных параметров CVD-плёнок алмаза, особенно при выращивании толстых плёнок. Тем более что в ЭС германия, кремния (кристаллографических аналогах алмаза) и других полупроводниковых материалов эти процессы играют важнейшую роль в формировании реальной структуры [2, 4].

В настоящее время, для изучения напряженного состояния эпитаксиальных пленок широко используют рентгеноструктурные методы исследования, позволяющие, в отдельных случаях, получать детальную информацию о таких важнейших параметрах композиций, как величина несоответствия, уровень упругой и скачки пластической деформаций на границах раздела фаз даже в многослойных гетероструктурах [5]. Однако в ряде случаев использование существующих подходов изучения релаксационных процессов затруднено. В частности, это относится к эпитаксиальным структурам алмаза, высокая твердость и химическая инертность которого значительно затрудняют проведение структурных исследований этих кристаллов. Учитывая, что алмаз является кристаллографическим аналогом

германия, можно ожидать, что процессы релаксации в этих материалах проходят схожим образом.

В работе проведены сравнительные исследования реальной структуры гомоэпитаксиальных пленок алмаза и германия, для которого такого рода методы исследования хорошо развиты. Выявлен ряд особенностей пластической деформации в этих материалах, обусловленных спецификой распределения упругих напряжений в ЭС.

**Методика исследований.** Монокристаллические пленки алмаза получены в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН методом осаждения из газовой фазы на специализированном реакторе ARDIS-100 в плазме СВЧ разряда (частота 2.45 ГГц) в смесях метан-водород при температуре  $T \sim 950^\circ\text{C}$  [6, 7]. В качестве подложек для осаждения CVD слоев использовали пластины ориентации  $\{001\}$  с линейными размерами  $\sim 5 \times 5$  мм и толщиной (0.5 – 0.9) мм, изготовленные из монокристаллов алмаза типа Ib, выращиваемых в аппаратах высокого давления (метод **НРНТ** – *highpressure, hightemperature*). Скорость роста составляла около 9 мкм/час. Синтез изотопически модифицированных пленок алмаза  $^{13}\text{C}$  проводили с использованием обогащенного по изотопу  $^{13}\text{C}$  до 99,96% метана ( $^{13}\text{CH}_4$ ) при следующих условиях: содержание метана в смеси – 6%, давление в камере реактора 130 Торр, СВЧ мощность 2,2 кВт.

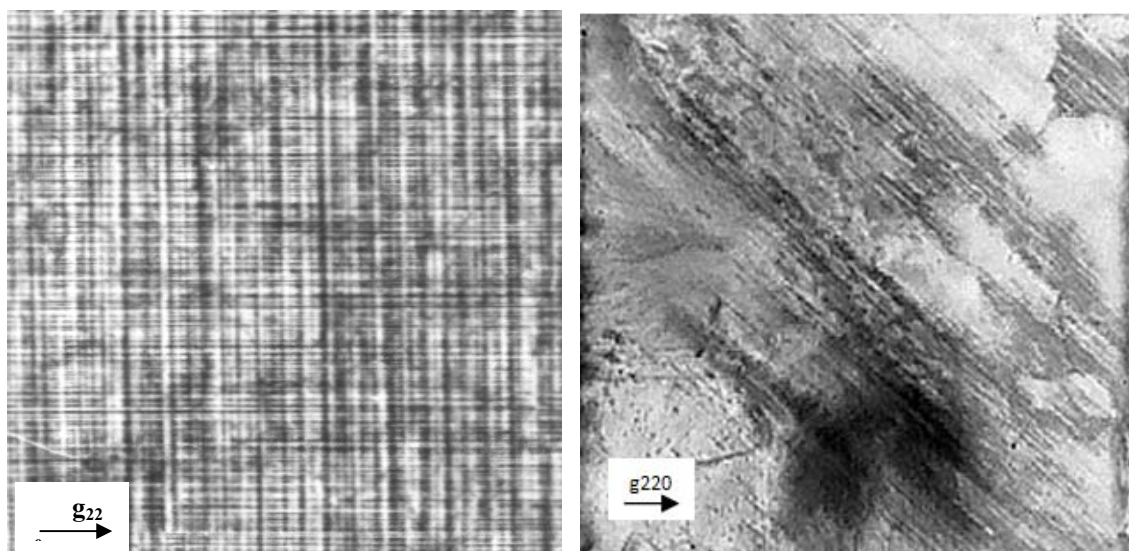
Гомоэпитаксиальные пленки германия толщиной  $t \sim (1 - 200)$  мкм, легированные бором до концентрации  $\sim 8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , были выращены газотранспортным методом в хлоридной системе при температуре  $T \sim 820^\circ\text{C}$  на подложках из германия марки ГДГ-3 с ориентацией (001). Исследованы ЭС с толщиной пленки  $t \sim 23$  мкм (образец ЭГС-1) и  $t \sim 200$  мкм (образец ЭГС-2).

Исследования методами двухкristальной рентгеновской дифрактометрии и топографии проводили на двухкristальном рентгеновском дифрактометре в  $\text{CuK}_{\alpha 1}$ -излучении. Для расширения пучка и формирования почти плоской волны использовали сильно асимметричное отражение 511 от монокристалла из высокосовершенного бездислокационного германия (угол Брэгга  $\theta \sim 45,07^\circ$ , фактор асимметрии отражения  $b \sim 0.01$ , расходимость пучка после монокристалла составляет  $\sim 0.5''$ ). Исследования пластин алмаза проводили в отражении 113 (угол Брэгга  $\theta \sim 45,75^\circ$ ), хорошо согласующемся по межплоскостному расстоянию с отражением 511 от германия. Радиус кривизны пластин  $R$  определяли с использованием двойной щели по методике [8] с чувствительностью до  $R \sim 500$  м.

Однокристалльные рентгенотопографические исследования в геометрии Лауэ (на просвет) с выявлением особенностей распределения дефектов в объеме кристаллов проводили методом Ланга с использованием  $\text{MoK}_{\alpha 1}$ -излучения.

**Результаты и обсуждение.** Прежде всего, следует отметить существенное различие в протекании релаксационных процессов в ЭС германия и

алмаза. Процесс релаксации упругих напряжений в структурах германия при толщинах пленок, превышающих критические, сопровождается формированием на межфазной границе сетки 60 - градусных ДН [4] (рис. 1,*a*). Следов пластической деформации с образованием ДН в ЭС  $^{13}\text{C}/^{nat}\text{C}$  (001) с толщиной пленки  $\sim 80$  мкм, почти на два порядка величины, превышающей критическое значение  $t_c \sim 1.1$  мкм [9], на рентгеновской топограмме (рис. 1,*б*) не наблюдается.



*a*

*б*

Рис.1. Рентгеновские топограммы эпитаксиальных структур Ge(B)/Ge (001) (*a*),  $^{13}\text{C}/^{nat}\text{C}$  (001) (*б*)

Выявляются лишь следы механической обработки на обратной стороне подложки, идущие вдоль направления [100], являющегося направлением легкой полировки алмаза [10] (рис. 2).

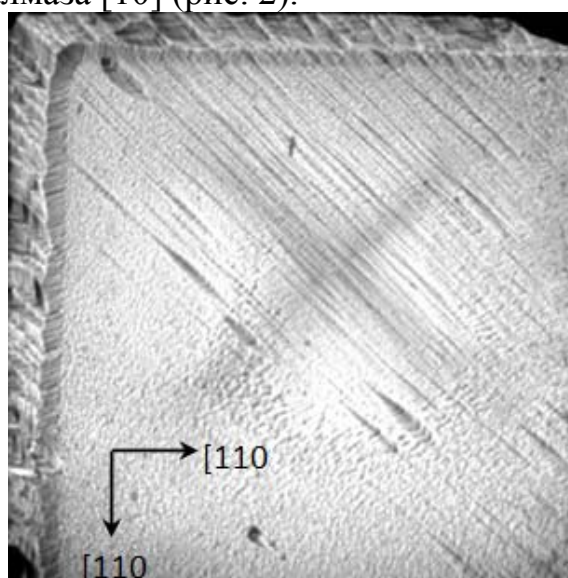


Рис.2. Микрофотография ЭС алмаза  $^{13}\text{C}/^{nat}\text{C}$  (001)

Причина отсутствия следов пластической деформации, по-видимому, связана с тем, что температура эпитаксии  $950^{\circ}\text{C}$  мала, по сравнению с температурой плавления алмаза, дислокации мало подвижны и эффективная пластическая деформация, наблюдаемая в ЭС германия, в пленке алмаза не происходит.

Также следует отметить значительный изгиб ряда исследованных пластинок алмаза с радиусом кривизны  $R \sim 4$  м [11]. Формирование остаточного изгиба эпитаксиальных CVD-пленок алмаза, отделенных от подложки лазерной резкой, с радиусом кривизны до  $R \sim 1,5$  м наблюдался экспериментально в ряде работ [12, 13].

В результате релаксации упругих напряжений, в эпитаксиальных структурах формируется достаточно сложное распределение дислокаций, обусловленное неоднородной по толщине пластической деформацией. Это, в частности, проявляется в остаточном изгибе первоначально однородных неизогнутых подложек Ge после стравливания эпитаксиальной пленки. На рис. 3 представлены экспериментальные данные по изменению кривизны  $\alpha = 1/R$  структуры Ge(B)/Ge (образец ЭГС-1) при ее послойном стравливании со стороны пленки. Стравливание осуществляли до толщины  $\xi = \xi_0$ , минимальное значение которой ограничено разрушением образца и невозможностью надежного определения его кривизны при меньших толщинах. В исходном состоянии толщина пленки составляла  $t = 23$  мкм, общая толщина ЭС  $H = 465$  мкм. Радиус кривизны равнялся в среднем  $R \sim 13$  м. Наличие остаточного изгиба подложки после стравливания пленки, и сложный характер изменения кривизны подложки при ее дальнейшем послойном утонении свидетельствует о значительных пластических изменениях, прошедших в первоначально однородной неизогнутой подложке.

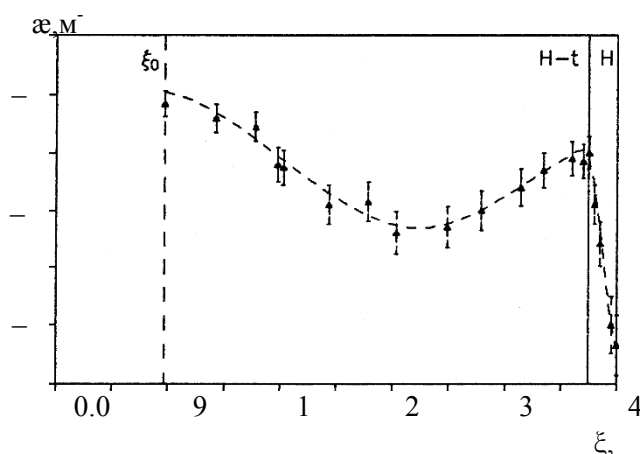


Рис. 3. Изменение кривизны ЭС Ge(B)/Ge при послойном стравливании со стороны пленки

Таким образом, разом, эксперименты на ЭС германия объясняют появление остаточного изгиба подложек и пленок за счет неоднородной по толщине пластической деформации при движении дислокаций в знакопеременном поле упругих напряжений с формированием специфических распределений и конфигураций дислокаций.

В ЭС алмаза эффективная пластическая деформация при температуре эпитаксии не происходит. Поэтому на данном этапе исследований возможны лишь предположительные объяснения наблюдаемого изгиба CVD-пленок алмаза, отделенных от подложки.

**Выводы.** Можно выделить следующие возможные механизмы появления остаточного изгиба пленок алмаза.

- Перераспределение точечных дефектов (легирующей и/или фоновой примеси) при выращивании толстых пленок. Атомам, имеющим большой атомный объем, в неоднородно деформированной области энергетически целесообразно переместиться в растянутую область, а имеющим меньший атомный объем в сжатую область кристалла [14]. Однако их концентрация, по крайней мере, в нелегированных пленках мала, чтобы вызвать наблюдаемые деформационные эффекты.

- Непрерывное увеличение плотности дислокаций по мере роста пленки [13] и их возможное перераспределение под действием упругих напряжений. Однако высокая плотность дислокаций в пленке, порядка  $10^6 \text{ см}^{-2}$ , не позволяет с необходимым для анализа разрешением выявить рентгено-топографически детали дислокационной структуры.

- Нельзя исключить из рассмотрения и возможность появления изгиба из-за несимметричной (с различной шероховатостью) обработки поверхностей пластины. В таком твердом и хрупком материале как алмаз трудно механически обработать поверхность без нанесения приповерхностных нарушений. При механической полировке алмаза, несомненно, возникает нарушенный слой, толщина которого по оценкам [10] составляет порядка 1 мкм.

Однако все эти вопросы нуждаются в дополнительном более детальном рассмотрении.

Авторы выражают благодарность сотруднику Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН А.Э. Волошину за помощь в проведении топографических исследований и сотрудникам Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН В.Г. Ральченко и А.П. Большакову за предоставление образцов синтетических алмазов.

### Список литературы

[1] *Matthews J.W., Mader S., Light T.B.* // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. P. 3800.

[2] *Stenin S.I.* // Phys. Stat. Sol. a. 1979. V. 55. P. 519.

[3] *Gaukroger M.P., Martineau P.M., Crowder M.J., et al.* // *Diamond Relat. Mater.* 2008. V. 16. P. 262.

[4] *Prokhorov I.A., Zakharov B.G., Man'shin V.S., Shul'pina I.L.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1993. V. 26. A76.

[5] *Ханачев Ю.П., Чуховский Ф.Н.* // *Кристаллография.* 1989. Т. 34. № 3. С. 776.

[6] *Ральченко В.Г., Большаков А.П.* CVD-алмаз: синтез и свойства // в книге «Углеродная фотоника» под ред. Конова В.И., М.: Наука, 2017. С. 9.

[7] *Bolshakov A.P., Ralchenko V.G., Yurov V.Y., et al.* // *Diamond Relat. Mater.* 2016. V. 62. P. 49.

[8] *Прохоров И.А., Захаров Б.Г.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* 1999. №2. С. 106.

[9] *Прохоров И.А., Волошин А.Э., Ральченко В.Г., и др.* // *Кристаллография.* 2016. том 61. № 6. С. 945.

[10] *Yurov V., Bushuev E. Bolshakov A., et al.* // *Phys. Status Solidi A* 2017, 00, 1700177.

[11] *Prokhorov I.A., Ralchenko V.G., Bolshakov A.P., et al.* // *Crystallogr. Rep.* 2013. V. 58. № 7. P. 1010.

[12] *Bauer T., Schreck M., Härtwig J. et al.* // *phys. stat. sol. (a).* 2006. V. 203. No. 12. P. 3056.

[13] *Bauer Th., Schreck M., Stritzker B.* // *Diamond Relat. Mater.* 2006. V.15. P. 472.

[14] *Гегузин А.Е.* // *УФН.* 1986. Т. 149. Вып. 1. С. 149.

**Романов Даниил Алексеевич** – Аспирант КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана. E-mail: [Oxly13@mail.ru](mailto:Oxly13@mail.ru)

**Прохоров Игорь Алексеевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент. Лаборатория Космического материаловедения ИК РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Калуга. E-mail: [igor.prokhorov@mail.ru](mailto:igor.prokhorov@mail.ru)

**Косушкин Виктор Григорьевич** – д-р техн. наук, профессор КФ МГТУ им. Н.Э.Баумана. E-mail: [kosushkin@gmail.com](mailto:kosushkin@gmail.com)

**Научный руководитель: Прохоров Игорь Алексеевич.** Лаборатория Космического материаловедения ИК РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Калуга. E-mail: [igor.prokhorov@mail.ru](mailto:igor.prokhorov@mail.ru)

В.Э. Толоконников

## ПОЛУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНОГО РЕГУЛИРУЕМОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО СТАБИЛИЗАТОРА

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

Стабилизатор напряжения – это специальное устройство, предназначенное для поддержания с определенной точностью выходного напряжения. Одним из типов стабилизаторов являются линейные стабилизаторы напряжения. Они могут выпускаться в виде интегральных микросхем. Микросхемы таких стабилизаторов напряжения являются функционально законченными устройствами. ИМС стабилизаторов производятся как на фиксированное напряжение, так и могут быть регулируемыми (управляемыми) [3].

Одним из наиболее популярных линейных регулируемых интегральных стабилизаторов является LM317. Это регулируемый низковольтный трехвыводной стабилизатор положительного напряжения. С максимальным током нагрузки 1,5 А, и возможностью регулировать выходное напряжение в диапазоне от 1,25 В до 37 В. Для его работы требуется лишь два внешних резистора [4].

Для того, чтобы определить работоспособность ИМС LM317 в источниках вторичного электропитания требуется произвести контроль соответствующих электрических характеристик:

- минимальное выходное напряжение;
- нестабильность по напряжению;
- нестабильность по току.

Для проведения измерений необходимо использовать источник питания, вольтметр для измерения и контроля входного и выходного напряжений, а также блок нагрузки для задания выходного тока.

Нестабильность по напряжению и нестабильность по току определяются расчётным путём.

*Нестабильность по напряжению определяют по формуле:*

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ2} - U_{ВЫХ1}}{U_{ВЫХ1} \cdot (U_{ВХ2} - U_{ВХ1})} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $K_U$  – нестабильность по напряжению, [%/В];  $U_{ВХ1}$ ,  $U_{ВХ2}$  – входное напряжение при первом и втором режиме измерений соответственно, [В];  $U_{ВЫХ1}$ ,  $U_{ВЫХ2}$  – выходное напряжение при  $U_{ВХ1}$  и  $U_{ВХ2}$  соответственно, [В].

*Нестабильность по току определяют по формуле:*

$$K_I = \frac{U_{ВЫХ2} - U_{ВЫХ1}}{U_{ВЫХ1} \cdot (I_{ВЫХ2} - I_{ВЫХ1})} \cdot 100\%, \quad (2)$$



где  $K_I$  – нестабильность по току, [%/А];  $I_{ВЫХ1}$ ,  $I_{ВЫХ2}$  – выходной ток при первом и втором режиме измерений соответственно, [А].

В виде источника питания и измерителя входного напряжения применим программируемый линейный источник питания. Для того чтобы задать выходной ток воспользуемся электронной нагрузкой. Выходное напряжение так же будем контролировать цифровым мультиметром. Всё применяемое измерительные оборудование обладают возможностью подключения к ПК. Кроме того, данное оборудование имеет набор команд для работы в среде программирования LabVIEW.

LabVIEW – ПО для системного проектирования в отраслях, в которых необходимо проведение испытаний, измерений и осуществление управления, а также быстрый доступ к оборудованию и результатам анализа данных. LabVIEW используется в системах сбора и обработки данных, а также для управления техническими объектами и технологическими процессами [1].

Программа специально разработана с целью конфигурирования различных измерительных приборов, анализа измерений и оформления результатов.

Из всего выше описанного следует, что выбор LabVIEW как среды для получения и обработки данных с измерительного стенда является рациональным, поскольку позволит упростить и автоматизировать измерения электрических характеристик в несколько раз, а также исключить из погрешности измерений человеческий фактор [2].

Посредством разработанного программно-аппаратного комплекса проведем измерения электрических параметров линейного стабилизатора напряжения LM317 в следующих режимах при температуре  $25 \pm 10$  °С (табл.1).

Таблица 1.

Режимы и условия измерения

Параметр, единица измерения	Буквенное обозначение	Норма		Режим измерения		
		Не менее	Не более	$U_{ВХ}$ , В	$U_{ВЫХ}$ , В	$I_{ВЫХ}$ , А
Минимальное выходное напряжение, [В]	$U_{ВЫХ \min}$	1,20	1,30	5	–	0,010
Нестабильность по напряжению, [%/В]	$K_U$	–	0,04	5	1,2-1,3	0,010
				35	1,2-1,3	0,010
Нестабильность по току, [%/А]	$K_I$	–	0,50	5	1,2-1,3	0,010
				5	1,2-1,3	1,5

Результаты проведенной серии измерений представлены в табл. 2.:

Таблица 2.

## Результаты серии измерений

№ измерения	Нестабильность по напряжению ( $I=0,01$ А), [%/В]			Нестабильность по току ( $U_{вх}=5$ В), [%/А]		
	$U_{ВЫХ1}$ , [В] ( $U_{ВХ1}=5$ В)	$U_{ВЫХ2}$ , [В] ( $U_{ВХ2}=35$ В)	$K_U$	$U_{ВЫХ1}$ , [В] ( $I_{ВЫХ1}=0,01$ А)	$U_{ВЫХ2}$ , [В] ( $I_{ВЫХ2}=1,5$ А)	$K_I$
1	1,2426	1,243	0,0011	1,2426	1,2413	0,0702
2	1,2599	1,2604	0,0013	1,2599	1,2591	0,0426
3	1,2498	1,2502	0,0011	1,2498	1,2475	0,1235
4	1,2593	1,2597	0,0011	1,2593	1,2587	0,0320
5	1,2569	1,2573	0,0011	1,2569	1,2556	0,0694
6	1,2591	1,2595	0,0011	1,2591	1,2578	0,0693
7	1,2587	1,2591	0,0011	1,2587	1,2574	0,0693
8	1,2566	1,257	0,0011	1,2566	1,2545	0,1122
9	1,2616	1,2621	0,0013	1,2616	1,2598	0,0958
10	1,2565	1,2568	0,0008	1,2565	1,2537	0,1496

Из таблицы можно сделать вывод, что исследуемая ИМС линейного стабилизатора является работоспособной, так как её измеренные электрические параметры удовлетворяют заявленным в технической документации.

Поскольку, в разных режимах минимальное выходное напряжение измеряется при различных значениях входного напряжения  $U_{вх}$  и выходного тока  $I_{вых}$ , то построим графики зависимости минимального выходного напряжения от входного напряжения (рис.1) и минимального выходного напряжения от выходного тока (рис.2).

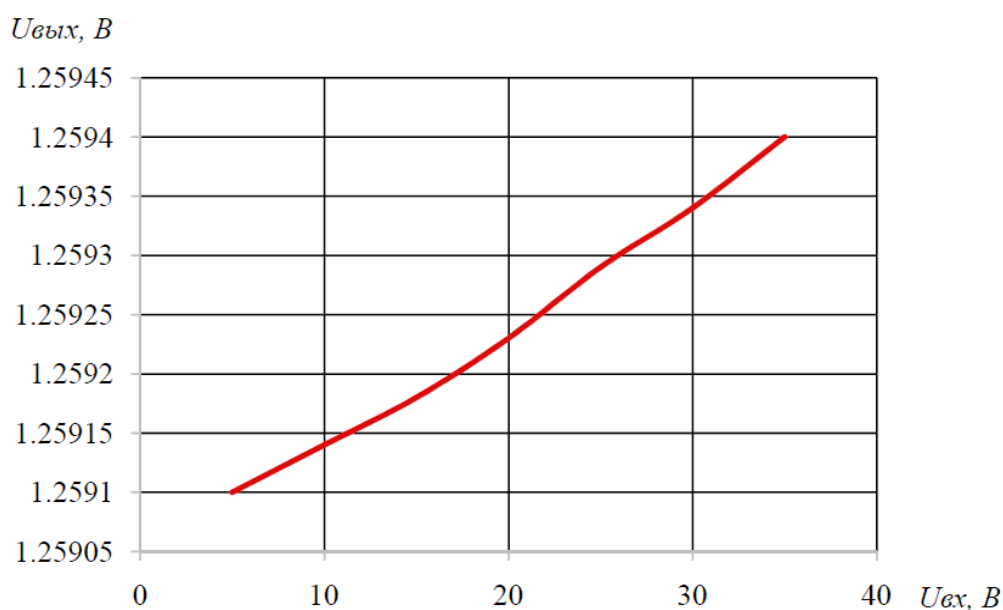


Рис. 1. График зависимости минимального выходного напряжения от входного напряжения

Данный график наглядно отображает, что с увеличением питающего напряжения минимальное выходное напряжение будет тоже увеличиваться, но незначительно при неизменном значении выходного тока.

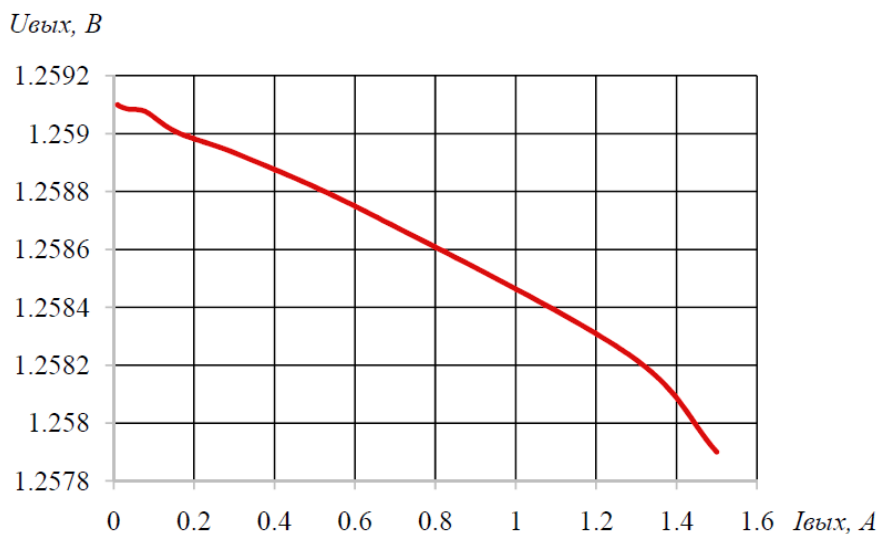


Рис. 2. График зависимости минимального выходного напряжения от выходного тока

График на рис.2 демонстрирует, что увеличение выходного тока нагрузки приводит к увеличению падения напряжения на стабилизаторе, а следовательно к уменьшению минимального выходного напряжения при постоянном напряжении питания микросхемы.

В данной работе с помощью разработанного комплекса были выполнены измерения электрических характеристик линейного регулируемого интегрального стабилизатора LM317 и проведен анализ полученных результатов.

### Список литературы

[1] Баран Е.Д. LabVIEW FPGA. Реконфигурируемые измерительные и управляющие системы/ Е.Д. Баран. — Электрон. дан. — Москва : ДМК Пресс, 2009. — 448 с. <https://e.lanbook.com/book/1095> (дата обращения 20.03.2019).

[2] Батоврин В.К. LabVIEW: практикум по основам измерительных технологий: учебное пособие — Электрон. дан. — Москва : ДМК Пресс, 2009. — 232 с. <https://e.lanbook.com/book/1096> (дата обращения 28.03.2019).

[3] Гейтенко Е.Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет: учебное пособие / Е.Н. Гейтенко. — Электрон. дан. — Москва : СОЛОН-Пресс, 2008. — 448 с. <https://e.lanbook.com/book/13765> (дата обращения 21.03.2019).

[4] Перебаскин А.В. Интегральные микросхемы: Микросхемы для линейных источников питания и их применение. — М.: Додэка, 2016.

**Толоконников Вадим Эдуардович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vadimtv1994@gmail.com

**Научный руководитель: Лоскутов Сергей Александрович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: SergeL-75@yandex.ru

П.В. Кондрашов

## **РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДОЗИРОВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

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

При изготовлении печатных плат используются различные травильные растворы. Закупают их для производства уже готовыми или смешивают на производстве, дозируя компоненты вручную, что требует высоких финансовых или человеческих ресурсов. Однако данный процесс можно сравнительно легко автоматизировать, используя для дозирования компонентов дозатор, состоящий из насосов и блока управления.

Одним из авторов данной статьи было разработано устройство для данной цели. Сразу следует сказать, что применение такого прибора одним лишь производством печатных плат не ограничивается. Его можно использовать в химическом производстве для дозирования реактивов, а также как устройство для автоматического полива растений в оранжереях и теплицах. Устройство позволяет через определенные промежутки времени смешивать различные компоненты. Промежутки времени определяются расходом получившейся смеси, и подобраны таким образом, чтобы в наличии всегда было нужное количество травильного раствора. Точное количество компонентов также задается промежутками времени, на которые запускается дозирующий насос, таким образом получая высокую точность отсчета объема компонентов.

На основании изложенного была разработана электрическая схема устройства, изображенная на рис. 1. Ее основой является микроконтроллер DD3. Количество его выводов позволяет подключать к системе до восьми дозирующих устройств. В его память с помощью кнопок SB1-SB3 заносятся данные об интервале включения насосов и времени работы каждого насоса.

При включении устройства загорается светодиод VD1, сигнализируя о нормальной работе устройства. Нажатием кнопки SB1 устройство переключается на выбор насоса, параметры которого надо настроить. Выбор производится с помощью кнопок SB2, SB3. Повторным нажатием установочной кнопки включается установка интервала времени включения насоса, от 0 до 99 ч. Интервал также регулируется кнопками SB2 и SB3. Еще одним нажатием кнопки установки регулируется время работы включенного насоса, от 0 до 99 с. И наконец, при последнем нажатии SB1 система запоминает выбранные параметры и переводится в рабочий режим. Контроль параметров дозирования при установке производится с помощью сдвоенного семисегментного индикатора HG1, подключенного к микроконтроллеру через дешифратор DD1. Транзисторы VT1, VT2 обеспечивают работу динамической индикации.

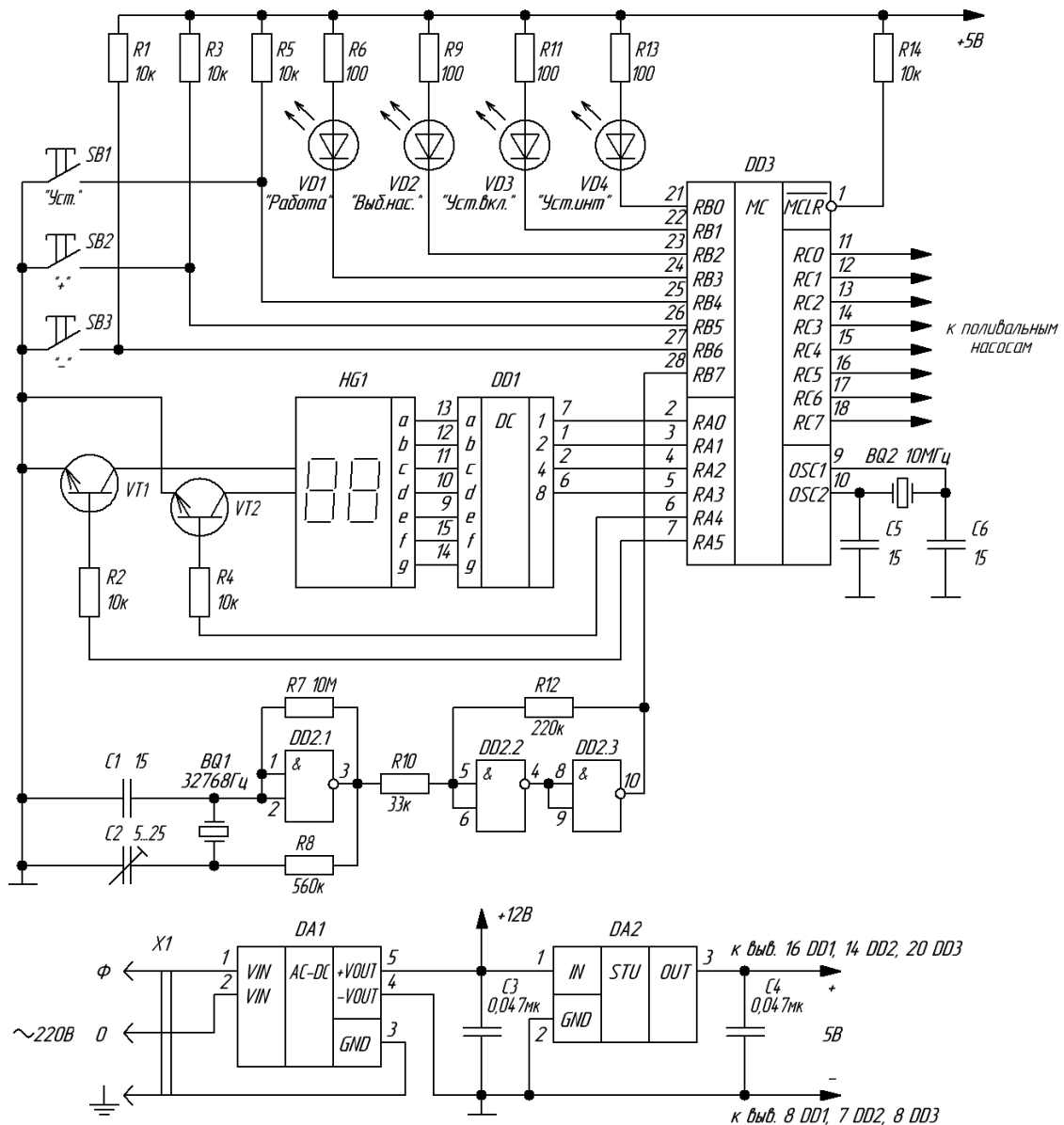


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная автоматического устройства полива

Для отсчета интервалов времени с высокой точностью необходим стабильный генератор тактовых импульсов. Сделать такой на базе встроенного осциллятора микроконтроллера довольно проблематично, поэтому для данной цели используется внешний генератор. Собран он по схеме Пирсана одним из элементов «И» микросхемы DD2. Конденсатор C2 используется подстроечный, для точной подгонки стандартной часовой частоты 32768 Гц. На выходе генератора Пирса, как правило, сигнал заметно отличается от прямоугольного, поэтому для формирования меандра правильной формы используется триггер Шмитта на элементах DD2.2, DD2.3. Выходной сигнал подается на один из входов микроконтроллера. В микроконтроллере производится счет поступающих импульсов и сравнение получившейся суммы с

числами, записанными в память при установке интервалов полива. Как только число поступивших импульсов сравнивается с числом, записанным для какого-либо насоса при установке интервала, последний включается. Начинается счет времени работы насоса и сравнение его с временем, заданным при установке. При достижении равенства этих переменных, насос отключается и начинается следующий цикл работы.

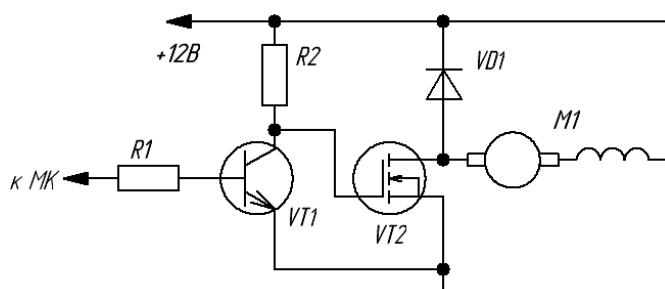


Рис. 2. Схема выходной цепи для подключения насоса

С выходов порта С микроконтроллера управляющий сигнал подается на транзисторный ключ, изображенный на рис. 2. Поскольку напряжения высокого уровня недостаточно для достаточного отпирания одностороннего ключа, то применен ключ на двух транзисторах. Однако такое включение имеет один недостаток: ключ становится инвертирующим, т.е. при подаче на его вход лог. 1 ключ запирается и наоборот. Данный недостаток устранен в программном коде микроконтроллера.

Питание прибора осуществляется с помощью импульсного преобразователя DA1, на выходе которого образуется стабилизированное напряжение 12В. Для питания цифровой части устройства напряжением 5В собран стабилизатор напряжения на микросхеме DA2.

Таким образом, была разработана электрическая схема устройства автоматического дозирования компонентов, пригодная для изготовления и решения поставленной в начале статьи проблемы.

### Список литературы

- [1] Шило В.Л. Популярныe цифровые микросхемы: Справочник. – М: Радио и связь, 1987. – 352 с.
- [2] PIC16F72 Data Sheet. 28-pin, 8 bit CMOS FLASH Microcontroller with A/D Converter. Microchip technology Inc., 2002

**Кондрашов Павел Вячеславович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: p.kondrashov.radio@yandex.ru

**Научный руководитель: Андреев Владимир Викторович.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

А.А. Сидоров

## РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОМПОНЕНТОВ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

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

Целью работы являлась разработка библиотеки математических моделей компонентов датчика температуры. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи[1-2]:

- произвести математическое моделирование,
- описать статические режимы работы транзистора.

### Разработка библиотеки математических моделей компонентов датчика температуры

Математическое моделирование производилось в программах схемотехнического моделирования OrCAD и Multisim.

#### Математические модели биполярных транзисторов

Для моделирования биполярных транзисторов используется схема замещения в виде адаптированной модели Гуммеля-Пуна (рис. 1). Эта модель упрощается до модели Эберса-Молла, если опустить некоторые параметры (рис. 2).

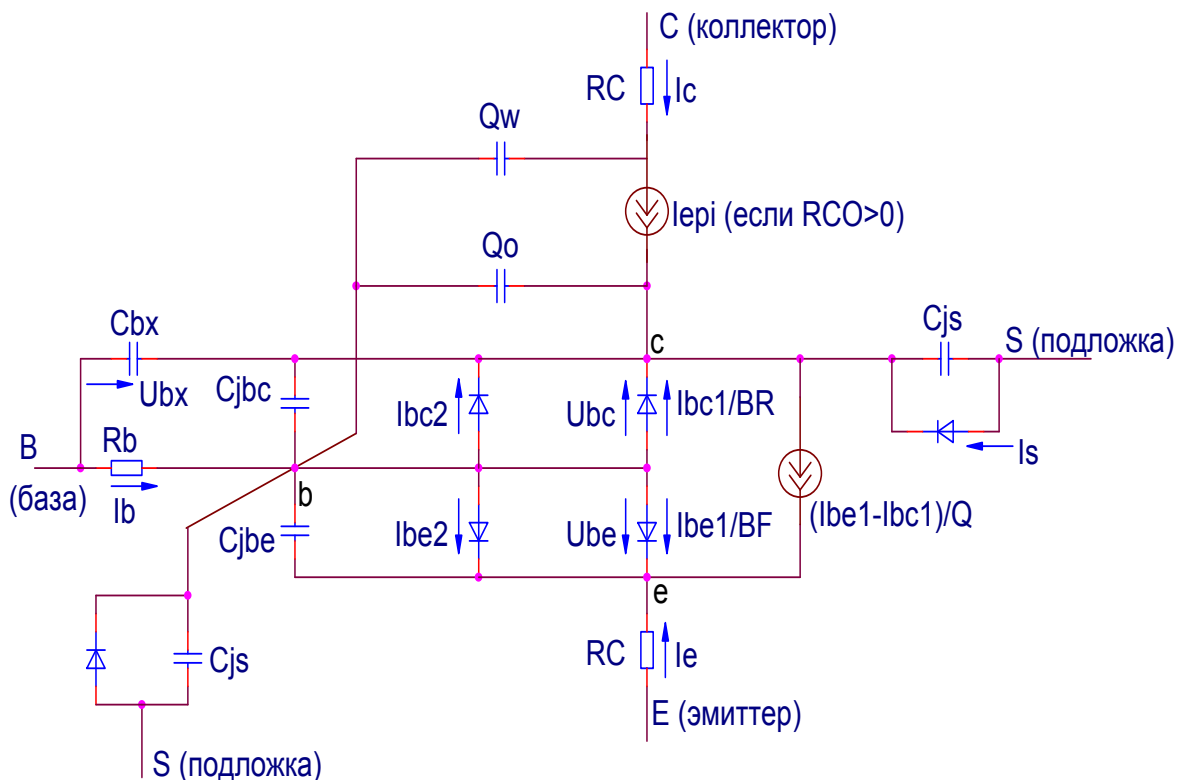


Рис.1. Модель биполярного n-p-n транзистора Гуммеля-Пуна



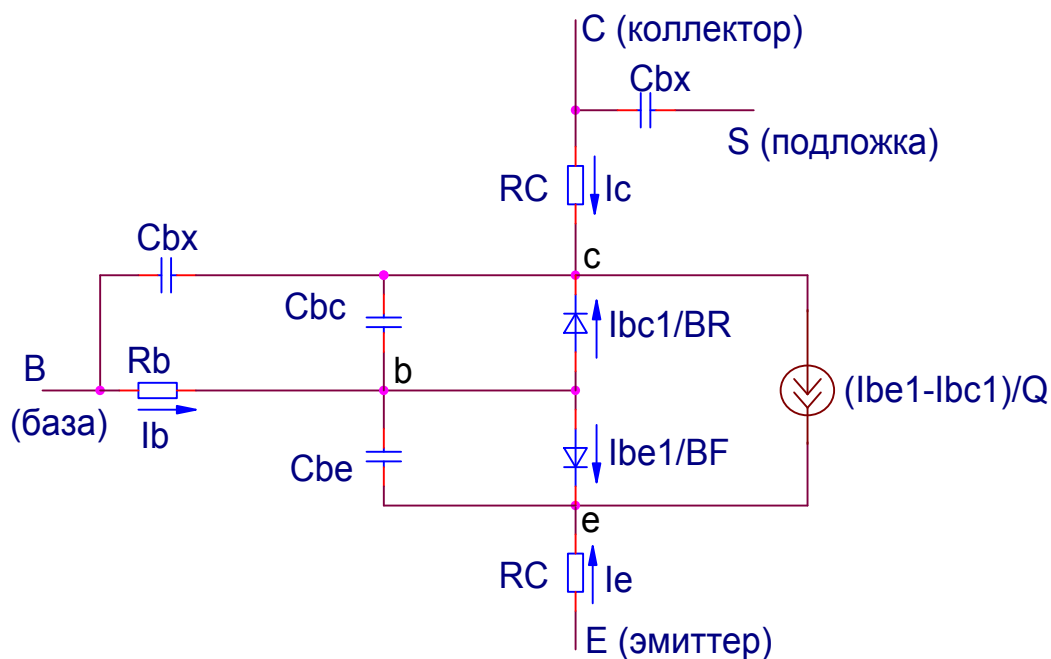


Рис.2. Модель биполярного транзистора Эберса-Молла.

На рис. 1 и 2 используются следующие обозначения:

- $I_b$  – ток базы;
- $I_c$  – ток коллектора;
- $I_e$  – ток эмиттера;
- $I$  – ток подложки;
- $I_{be1}, I_{bc1}$  – токи коллектора в нормальном и инверсном режиме соответственно;
- $I_{be2}, I_{bc}$  – составляющие тока перехода база-эмиттер, вызванные неидеальностью перехода;
- $U_{be}, U_{bc}$  – напряжения на переходе ‘внутренняя база’-эмиттер и ‘внутренняя база’-коллектор;
- $U_{bx}$  – напряжение база-‘внутренний коллектор’;
- $C_{jbc}, C_{jbe}$  – барьерные составляющие емкостей переходов база-коллектор и база-эмиттер;
- $C_{bx}$  – емкость между внешним выводом базы и коллектором;
- $C_{js}$  – емкость коллектор-подложка;
- $Q_o, Q_w$  – заряды емкостей (учитываются в режиме квазинасыщения, но в нашем случае не учитываются).

Статический режим работы транзистора описывается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
 I_b &= I_{be1}/BF + I_{be2} + I_{bc1}/BR + I_{bc2}; \\
 I_c &= I_{be1}/Q_b - I_{bc1}/Q_b - I_{bc1}/BR - I_{bc2}; \\
 I_{be1} &= IS * [\exp(U_{be}/(NF * U_t)) - 1]; \\
 I_{be2} &= ISE * [\exp(U_{be}/(NE * U_t)) - 1]; \\
 I_{bc1} &= IS * [\exp(U_{bc}/(NR * U_t)) - 1];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{bc2} &= ISC * [\exp(U_{bc}/(NC * U_t)) - 1]; \\
Q_b &= Q_1 * [1 + (1 + 4Q_2)^{NK}] / 2; \\
Q_1 &= 1 / (1 - U_{bc}/VAF - U_{be}/VAR); \quad Q_2 = I_{be1}/IKF + I_{bc1}/IKR; \\
I_s &= ISS * [\exp(U_{js}/(NS * U_t)) - 1].
\end{aligned}$$

Динамические свойства переходов учтены включением в модель емкостей коллектора (с<sub>jc</sub>), эмиттера (с<sub>je</sub>) и подложки (с<sub>js</sub>), которые имеют диффузионные и барьерные составляющие.

**Вывод.** В ходе выполнения были разработаны библиотеки математических моделей компонентов датчика температуры и описаны статические режимы работы транзистора.

### Список литературы

- [1]. *Богомяков А.А.* Основы силовой электроники. Силовые полупроводниковые приборы, - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2012, - 25с.
- [2]. *Болотовский Ю.И.* OrCad, Моделирование, Поваренная книга, - М.: СОЛОН-Пресс, 2005, - 199с.
- [3]. *Дьяконов. В.П.* Сверхскоростная твердотельная электроника. Т. 1: Приборы общего назначения, - М.: ДМК Пресс, 2013, - 600с.

**Сидоров Андрей Андреевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: sidorov.andreyu@gmail.com

**Научный руководитель: Шагаев Владимир Васильевич.**  
КФ МГТУ им Н.Э Баумана. E-mail: shagaev-vv@yandex.ru

С.С. Крисанов

## **СИНТЕЗ SPICE МОДЕЛИ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ПО ТЕСТОВЫМ ТАБЛИЦАМ**

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

В настоящее время невозможно представить мир без интегральной микросхемы (ИМС). Являясь незаменимой частью любого современного электронного устройства, она выполняющего различные задачи: от включения и выключения светодиодов [1] до сложных математических расчетов [2]. Это стало возможным благодаря совершенствованию производственных технологий [2] и непрекращающемуся приложению усилий к повышению качества выпускаемой продукции. Основные параметры по качеству, надежности, устойчивости к различным факторам, а так же реальные технические характеристики закладываются на этапе опытно-конструкторских работ (ОКР) [4]. Одним из основных этапов, предшествующих выпуску ИМС, является ее моделирование в специализированных программах, которые основаны на использовании spice модели элементов. Но результаты моделирования и реальные не совпадают, а в определенных случаях различаются на порядки, что в свою очередь требует переработки результатов моделирования.

Для снижения времени построения spice модели на основе реальных данных и приближению полученной модели как можно ближе к реальному изделию можно использовать результаты тестирования микросхемы. Такой подход позволяет получать модели с точностью до элемента, в зависимости от схемотехники ИМС, а так же не требует наличия дополнительного дорогостоящего оборудования, т.к. все можно реализовать на одном рабочем месте с использованием персонального компьютера [3].

Получить точную spice модель, используя тестовую таблицу, предназначенную для проверки параметров микросхемы, не всегда является возможным. Схожесть модели и реального устройства зависит от ряда факторов:

- сложность конструкции ИМС
- количества повторяемых блоков в схемотехнике ИМС
- количества тестов, связанных с проверкой ИМС выполнять задачи согласно определенным функциям (к примеру по таблице истинности)
- наличие уникальных транзисторов (с очень малым отношением длины и ширины канала, нагрузочные транзисторы)

Для повышения схожести необходимо применения дополнительных мер:

1. Использовать специальные тестовую таблицу, которая составленная таким образом, что бы получить максимальное количество данных для

spice модели. Такая таблица может быть интегрирована в основную тестовую таблицу, пока идут ОКР по освоению ИМС.

2. Уникальные транзисторы, которые применяются единожды в схеме, при возможности необходимо дублировать в виде тестового транзистора. Дублированием можно осуществлять как на самой поверхности ИМС, так и на тестовых модулях, с возможностью подключения к ним при помощи игл.

3. Выносить дополнительные контактные площадки от узлов ИМС, в которых применяются уникальные элементы. В определённых случаях, при числе элементов менее 50, одна контактная площадка, позволяющая коммутироваться к узлу ИМС, позволяющую построить точную модель.

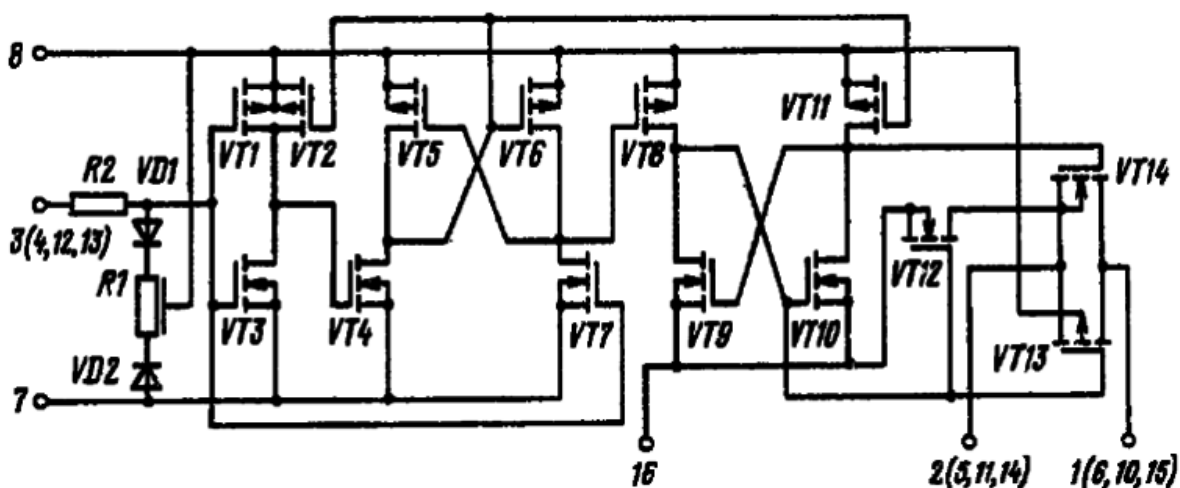


Рис. 1. Схема ИМС на КМОП

Рассмотрим ситуацию, приведенную на рис. 1, когда имеется ИМС, состоящая из 14 транзисторов. Будем считать, что транзистор VT1 является уникальным, с малым соотношением длины и ширина канала, а все остальные транзисторы являются кольцевыми. Резисторами и диодами будем пренебрегать, т.к. построение их spice модели не вызывает трудностей при данной схемотехнике. Очевидно, что для построения точной модели ИМС необходимо иметь 2 модели транзисторов: кольцевого и VT1. Для этого удобнее всего использовать входной инвертор, состоящий из транзистора VT1 и VT3. Чтобы снять выходной сигнал, необходима дополнительная контактная площадка, которая подключена к цепи соединяющей стоки этих транзисторов, а так же площадка, подключенная к затвору VT2. Такая конструкция позволит составить точную spice модель всех элементов схемы.

Окончательного построения модели требует знание технологических параметров, таких как доз легирования, сопротивления областей и т.д. Необходимые недостающие данные можно получить по результатам измерений тестовых элементов на самом кристалле ИМС или на тестовом модуле все пластины.

Данный подход хорошо поддается автоматизации при использовании измерительных устройств, для реализации тестовых таблиц, обладающих возможностью обработки результатов измерений. Это позволяет автоматизи-

зировать процесс составления spice модели по средствам языков программирования.

Рассмотренная методика синтеза spice модели МОП-транзисторов по тестовым таблицам позволяет минимизировать трудоёмкость при анализе интегральных микросхем, а также снизить затраты на разработку, освоение и производство продукции. При ее использовании становится возможным составлять точные spice модели ИМС даже в автоматическом режиме.

### Список литературы

[1] Лоскутов С.А., Драч В.Е., Корчикова А.Е. Драйвер светодиодного светильника // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21. № 10. С. 43-49.

[2] Драч В.Е., Родионов А.В. Перспективные технологии производства элементной базы телекоммуникационных устройств // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 10. С. 85-92.

[3] Готра З.Ю., Николаев И.М. Контроль качества и надежность микросхем. – М.: Радио и связь, 2007. — 168 с.

[4] Дракин А.Ю. Контроль параметров аналоговых микросхем, силовых диодов и транзисторов. – М.: Лань, 2018. – 284с.

**Крисанов Сергей Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: SerjW0r@yandex.ru

**Научный руководитель: Драч Владимир Евгеньевич.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: drach@bmstu-kaluga.ru

В.И. Карпов

## УМЕНЬШЕНИЕ ТОКА ПОТРЕБЛЕНИЯ МИКРОСХЕМЫ ЧЕТЫРЁХКАНАЛЬНОГО АНАЛОГОВОГО КЛЮЧА

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

Одним из основных параметров микросхем, является ток потребления ( $I_{CC}$ ). Снижение тока потребления, без ухудшения остальных параметров микросхемы является важной задачей, направленной на улучшение эксплуатационных характеристик аналоговых ключей [1-6]. Одним из путей решения этой задачи является создание математической модели микросхемы аналогового ключа для последующего моделирования и оптимизации конструкторских и топологических решений, направленных на снижение тока потребления микросхемы [7].

Целью данной работы является оптимизация конструкции промышленно выпускаемых микросхем четырёхканального аналогового ключа со схемой управления.

Измерение тока потребления интегральной микросхемы четырёхканального аналогового ключа со схемой управления проводилось с использованием схемы подключения приборов (рис.1).

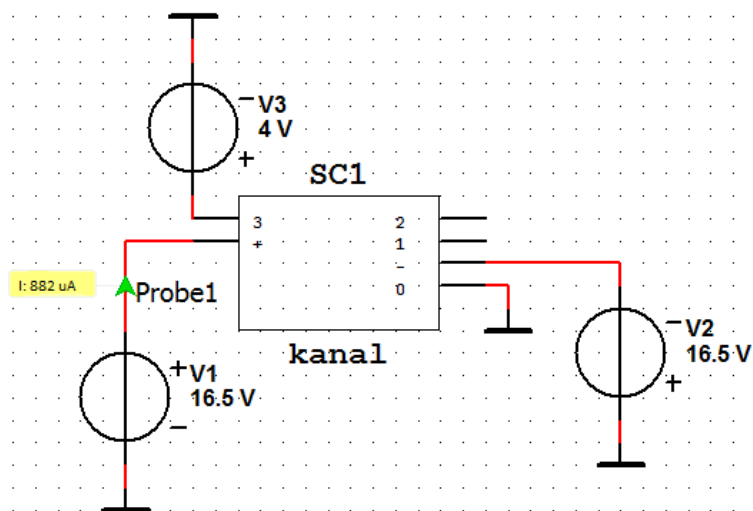


Рис.1. Структурная схема включения интегральной микросхемы при измерении тока потребления

Результаты измерения тока потребления микросхемы четырёхканального аналогового ключа в различных цепях схемы представлены ниже (рис.2).

По результатам измерения тока потребления микросхемы можно сделать вывод, что максимально потребляющим каскадом является входной каскад преобразования уровня. Схема электрическая принципиальная данного каскада представлена ниже (рис. 3).

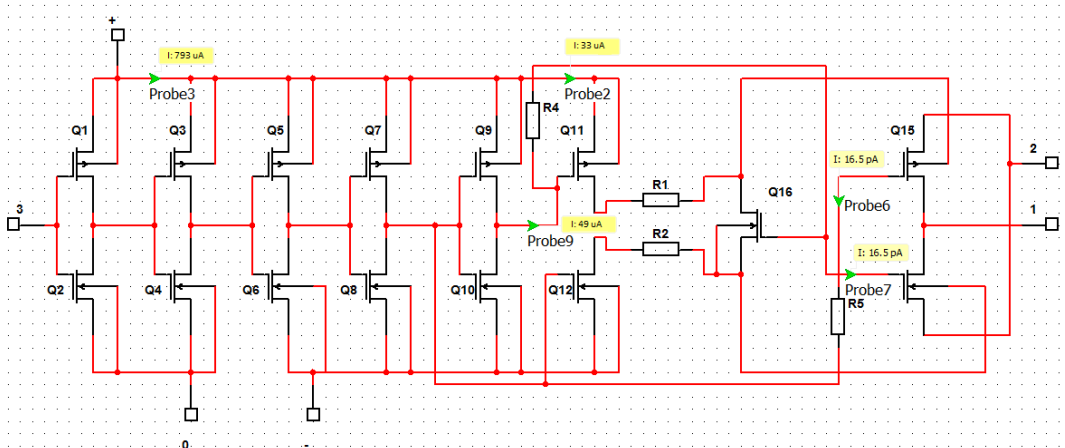


Рис.2. Схема электрическая принципиальная, на которой представлены результаты измерения тока потребления интегральной микросхемы в различных цепях

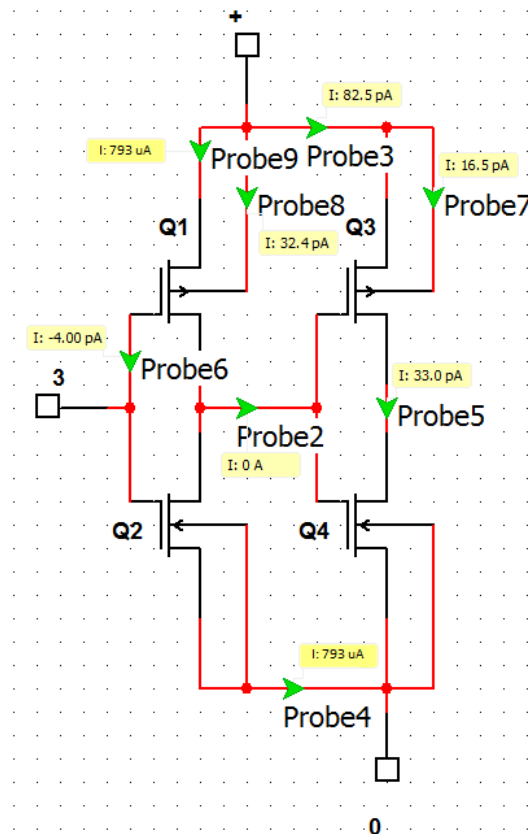


Рис.3. Схема электрическая принципиальная входного каскада интегральной микросхемы

По результатам измерения тока потребления входного каскада интегральной микросхемы можно сделать вывод, что наиболее потребляющим транзистором является Q1. Проведём измерение тока потребления микросхемы, изменяя при этом длину канала транзистора Q1. Построим график зависимости тока потребления микросхемы от длины канала транзистора Q1 (рис.4). Из графика зависимости видно, что, уменьшая длину канала транзистора Q1, можно существенно снизить потребляемый микросхемой ток.

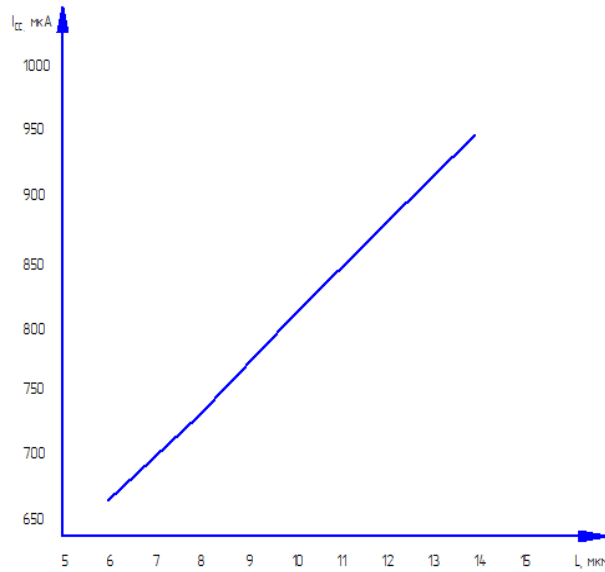


Рис. 4. График зависимости тока потребления микросхемы от длины канала транзистора Q1

Оценим зависимости уровня включения интегральной микросхемы от длины канала транзистора Q1 с использованием схемы подключения приборов (рис. 5).

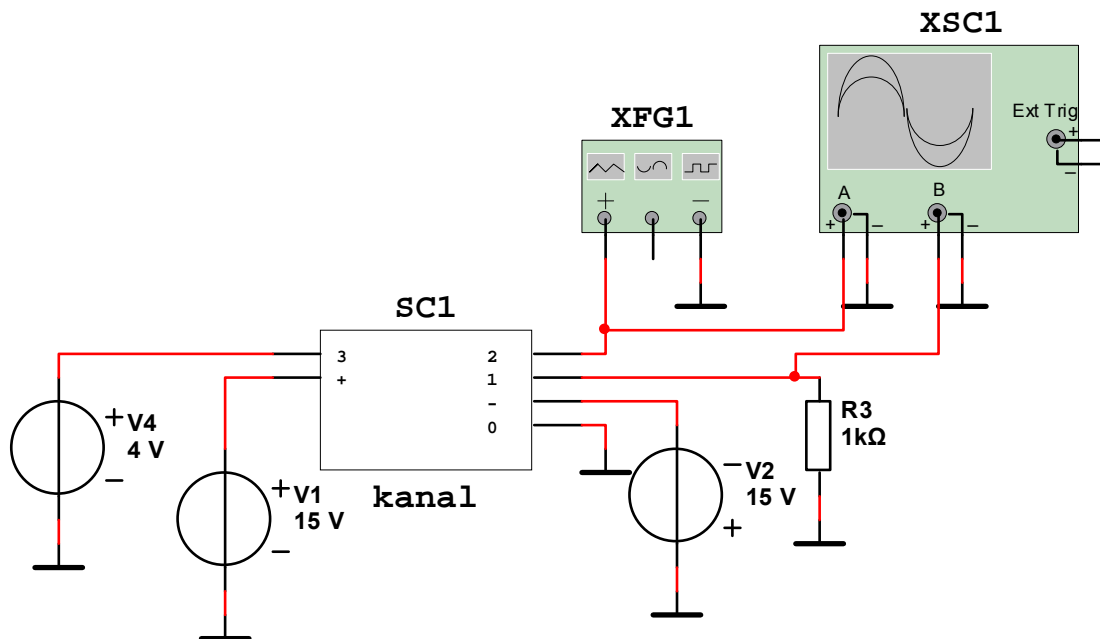


Рис. 5. Структурная схема включения интегральной микросхемы при измерении уровня включения

Построим график зависимости уровня включения микросхемы от длины канала Q1 (рис.6). Из графика зависимости видно, что, с уменьшением длины канала транзистора Q1, повышается уровень переключения микросхемы.



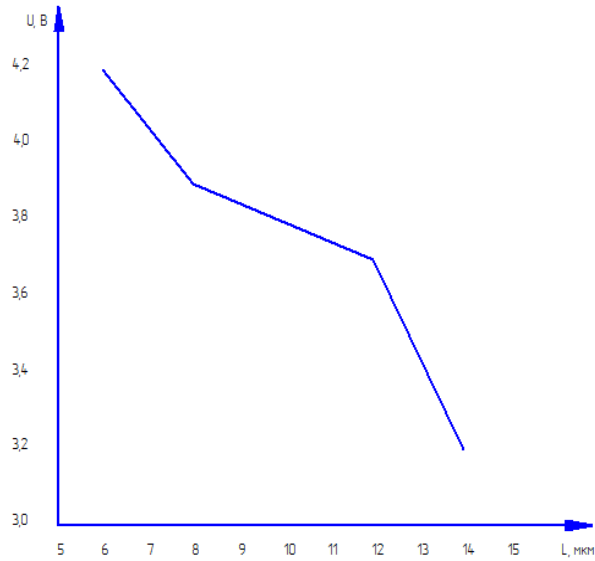


Рис.6. График зависимости уровня включения от длины канала транзистора Q1

Для удобства оценки изменений параметров микросхемы от длины канала транзистора Q1 построим сводный график зависимостей (рис.7). Из сводного графика зависимостей видно, что уменьшение длины канала транзистора Q1 для снижения тока потребления микросхемы ограничено увеличением уровня переключения микросхемы. Минимальной длиной канала, обеспечивающей уровень переключения, допустимыми условиями на микросхему и снижающей ток потребления микросхемы, является 8 мкм. Проведём измерение параметров модели микросхемы для количественной оценки изменений (таблица 1).

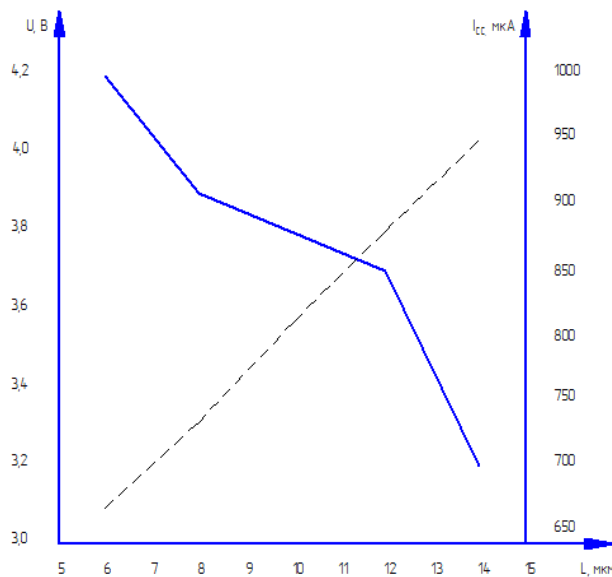


Рис.7. Сводный график зависимостей тока потребления (прерывистая линия) и уровня переключения (сплошная линия) от длины канала

Сводная таблица результатов измерений

Наименование параметра, единица измерения	Норма		Результаты измерения	
	не менее	не более	Выпускаемая микросхема	Разработанная микросхема
Ток утечки аналогового выхода, нА	-	50	19,5	19,5
Ток утечки аналогового входа, нА	-	50	19,5	19,5
Входной ток низкого уровня управляющего напряжения, мкА	-	0,2	0,15	0,15
Входной ток высокого уровня управляющего напряжения, мкА	-	0,2	0,15	0,15
Ток потребления при высоком уровне управляющего напряжения от положительного источника, мА	-	4	3,5	2,9
Ток потребления при высоком уровне управляющего напряжения от отрицательного источника, мА	-	4	2,3	2,3
Ток потребления при низком уровне управляющего напряжения от положительного источника, мА	-	4	1,3	1,3
Ток потребления при высоком уровне управляющего напряжения от отрицательного источника, мА	-	4	1,3	1,3
Время включения, нс	-	50	32	27
Время выключения, нс	-	80	57	57
Сопротивление в открытом состоянии, Ом	-	50	44	44
Уровень переключения, В	-	4	3,7	3,9

Из таблицы видно, что конструкторско-топологическое изменение транзисторов входного каскада преобразования уровня привело к снижению тока потребления микросхемы на 20%. Также уменьшилась задержка при включении микросхемы на 18%. Кроме того, из сводной таблицы видно, что все параметры микросхемы аналогового ключа остались в пределах норм, установленных техническим условием на микросхему. Таким образом, проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что оптимальной является разработанная микросхема, позволяющая получить минимальный ток потребления микросхемы.

### Список литературы

- [1] *Sze S. M, Lee M. K. Semiconductor Devices. Physics and Technology // John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 3rd ed., 2013. 582 p.*
- [2] *Engström O. The MOS System // Cambridge University Press, 2014. 355 p.*

[3] *Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А.* Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник — М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2004, 256 с.

[4] *Андреев В.В.* Физические основы наноинженерии // учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению 152200 "Наноинженерия" / В. В. Андреев, А. А. Столяров; под ред. В. А. Шахнова. Москва, 2011. Сер. 16 Библиотека "Наноинженерия": комплект учебно-методических комплексов дисциплин по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети "Наноинженерия": в 17 кн.

[5] *Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A.* Modification of MIS Devices by Irradiation and High-Field Electron Injection Treatments // Acta Phys. Pol. A. 2017. Vol. 132. No. 2. P.245-248.

[6] *Андреев В.В.* Плазменная и инжекционная модификация электрофизических характеристик МДП-структур // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 6. С.47-53.

[7] *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: Пер. с англ. – Изд. 2-е. – М: БИНОМ, 2014 – 706 с.

**Карпов Владислав Игоревич** – студент, канд. техн. наук КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [KarovVI95@yandex.ru](mailto:KarovVI95@yandex.ru)

**Научный руководитель: Андреев Владимир Викторович.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: [andreev@bmstu-kaluga.ru](mailto:andreev@bmstu-kaluga.ru)

Д. О. Ульянов

## ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛУКОНТАКТНОГО РЕЖИМА АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

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

Полуконтактный режим атомно-силовой микроскопии (иногда его называют прерывисто-контактный, а в иностранной литературе - "intermittent contact" или "tapping mode" режимы) является одним из наиболее распространенных при исследованиях в области физики поверхности и тонкопленочных технологий, так как позволяет минимизировать разрушающую силу и избежать влияния на кантилевер сил трения и адгезии [1].

В этом режиме колебания кантилевера возбуждаются внешним пьезоэлементом (актюатором) на резонансной частоте. Кантилевер подводится настолько близко к образцу, что в конечной точке его перемещения кончик иглы едва касается или "постукивает" по образцу.

Так как полуконтактный режим является осцилляционным (кантилевер колеблется вблизи поверхности), то чрезвычайно важно понять, каким образом топография влияет на характеристики колебательной системы и что лежит в основе формирования топографического изображения.

Точное описание колебаний кантилевера зондового датчика АСМ представляет собой сложную математическую задачу. Однако основные черты процессов, происходящих при взаимодействии колеблющегося кантилевера с поверхностью, можно понять на основе простейших моделей, в частности, с помощью модели гармонического осциллятора с затуханием под воздействием внешней силы [2].

Согласно второму закону Ньютона:

$$ma = -kx - \alpha v + F \cos(\Omega t), \quad (1)$$

где  $kx$  - сила упругости по закону Гука,  $\alpha v$  - сила вязкого трения направлена против скорости движения кантилевера,  $F \cos(\Omega t)$  - внешняя сила, возбуждающая колебания (создаваемая пьезоэлементом).

Обозначив  $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ ,  $\Phi = \frac{F}{m}$ ,  $\delta = \frac{\alpha}{2\sqrt{km}}$  и заменив  $a$  и  $v$  на вторую и первую производную от координаты по времени соответственно, имеем:

$$\ddot{x} + 2\delta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = \Phi \cos(\Omega t). \quad (2)$$

Решение этого уравнения при времени  $t \gg \frac{1}{\delta}$  описывает вынужденные колебания кантилевера. Амплитуда этих колебаний  $x_0$  и фазовый сдвиг  $\varphi$  (между колебаниями вынуждающей силы и кантилевера) выражаются формулами:

$$x_o = \frac{\Phi}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\delta^2\Omega^2}}, \quad (3)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{2\delta\Omega}{\Omega^2 - \omega_0^2}\right). \quad (4)$$

Анализ выражения для амплитуды колебаний кантилевера, возбужденных пьезоэлементом, показывает, что при возбуждающей частоте  $\Omega_R = \omega_0\sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$  амплитуда колебаний достигает своего максимума. Эта частота называется резонансной частотой кантилевера.

Вместо параметра  $\delta$  в АСМ часто используют добротность кантилевера  $Q = \frac{1}{2\delta}$ , которая определяет ширину резонансного пика амплитуды.

Добротность зависит в первую очередь о среды измерений (вакуум, воздух), а также и от качества кантилевера.

**Вывод.** Если поддерживать колебания кантилевера на некоторой постоянной частоте вблизи резонанса, то смещение резонансной частоты, вызванное изменением расстояния от положения равновесия кантилевера до поверхности, приведет к изменению амплитуды колебаний кантилевера, которое может легко фиксироваться при помощи оптической системы детектирования. Причем максимальная чувствительность амплитуды к расстоянию между зондом и поверхностью достигается слева и справа от максимума резонансного пика (на линейных участках АЧХ).

Стандартная схема работы атомно-силового микроскопа в полуконтактном режиме использует именно амплитуду колебаний как входной параметр для системы обратной связи. Это значит, что в процессе сканирования, сканер двигает образец вверх и вниз так, чтобы амплитуда сохранялась постоянной, что эквивалентно поддержанию постоянного среднего расстояния между положением равновесия зонда и образцом.

### Список литературы

[1] *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии: Учебное пособие.- Нижний Новгород: РАН, Институт физики микроструктур, 2004. – 115 с.

[2] *Бахтизин Р.З., Галлямов Р.Р.* Физические основы сканирующей зондовой микроскопии: Учебное пособие. – Уфа: РИО БашГУ, 2004.- 84 с.

**Ульянов Дмитрий Олегович** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
E-mail: izefremova@yandex.ru

**Научный руководитель: Андреев Дмитрий Владимирович.**  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: dandreevic@gmail.com

Н.С. Богомолов

## **МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВЫХОДА ГОДНЫХ МИКРОСХЕМ**

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

### **Аннотация**

Повышение выхода годных микросхем является актуальной задачей. Измерение электрических параметров микросхем – это неотъемлемая составляющая методики проверки и контроля. В данной работе описано устройство, позволяющее измерить необходимые параметры микросхемы, которое может быть применено для оперативного измерения электрических параметров выпускаемой микросхемы. В результате выполнения работы был получен комплект конструкторско-технологической документации на адаптер.

### **Введение**

Одной из востребованных ИМС специального назначения является микросхема серии 525ПС3. Главной задачей выявления количества годных микросхем в серийной партии, для дальнейшего использования в электронной аппаратуре, является создание специализированного стенда. Основным узлом такого стенда является адаптер. Устройство относится к вычислительной технике и может быть использовано в программаторах постоянных запоминающих устройств. Устройство содержит адресный счётчик, счётчик циклов, блок управления, блок элементов И, ИЛИ, НЕ.

При разработке подобного стенда помимо принятия схемотехнического решения и выбора элементной базы актуальным вопросом является количество необходимых характеристик для выявления годных микросхем.

Цель данной работы – спроектировать устройство, позволяющее измерить необходимые параметры используемой микросхемы, для дальнейшего увеличения выхода серийной партии годных микросхем постоянной памяти при программировании.

### **Основная часть**

Перед нами была поставлена задача, реализовать методику контроля параметров мультиплексора 525ПС3, за счёт применения измерительного стенда, включающего в себя специализированный адаптер. Увеличение выхода годных микросхем серии 525ПС3 достигается путём измерения электрических параметров, согласно ТУ, с помощью адаптера. Данных параметров достаточно для выявления годных микросхем при серийном производстве.

Основные параметры, по которым проводится исследование, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Буквенное обозначение параметра	Норма
Погрешность перемножения, без внешней настройки, %	$E_0$	Не более $\pm 0,5$
Нелинейность перемножения по входу X, %	$N_x$	Не более $\pm 0,3$
Нелинейность перемножения по входу Y, %	$N_y$	Не более $\pm 0,1$
Остаточное напряжение по входу X, мВ	$V_x$	Не более 30
Остаточное напряжение по входу Y, мВ	$V_y$	Не более 10

Для измерения выходных сигналов использовался цифровой осциллограф Hantek DSO4072C, имеющий стандартный набор возможностей: порт USB, контроль предельных значений, запись данных, 16 автоматических измерений. Данный осциллограф имеет 2 канала, полоса частот 70 МГц, входное сопротивление 1МОм, время нарастания  $< 5$  нс.

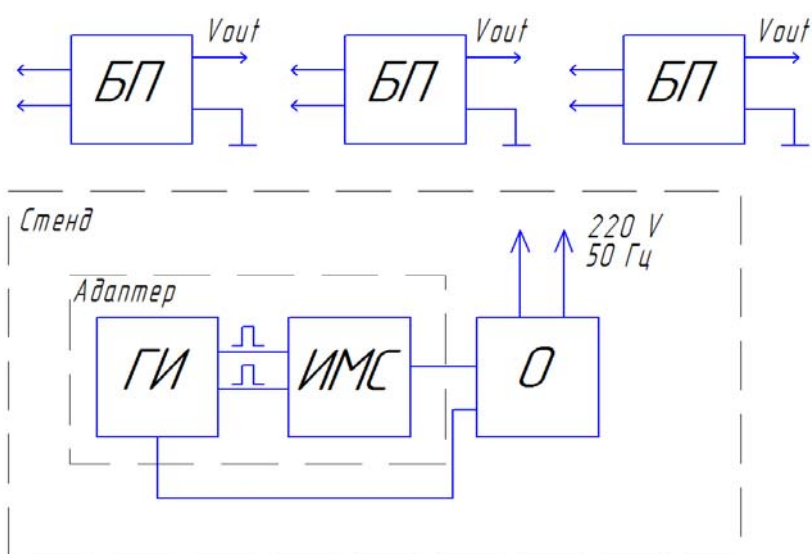


Рис.1 Схема структурная соединения контрольно измерительной аппаратуры

### Конструкторская реализация адаптера

Адаптер служит как формирователь импульсов для специализированной микросхемы серии 525ПСЗ. С помощью данного устройства на вход 525ПСЗ подают прямоугольный сигнал, необходимый для дальнейшего анализа на выявления годных микросхем.

В данном устройстве используется элементная база:

DD1- МЕС 32.768 kHz кварцевый генератор;  
DD2, DD3- КР531ТВ9 представляет собой двойной JK-триггер. Содержит 142 интегральных элемента;  
DD4 – КР531ЛА3 Микросхема представляет собой четыре логических элемента 2И-НЕ. Содержит 76 интегральных элементов;  
DD5-DD9 – КР1533ИЕ10 Микросхема КР1533ИЕ10 представляет собой четырехразрядный двоичный счетчик с асинхронным сбросом;  
DD10-DD15 – АТ27СО20 ЦАП однократного записывания сигнала;  
DD16-DD18 – DAC8820 16-битный с параллельным входом умножитель цифро-аналогового преобразователя;  
DD19, DD21 – AD688ВQ Источник опорного напряжения;  
DD20 – ОРА227 Операционный усилитель.

С кварцевого генератора DD1 подаётся сигнал на JK-триггеры DD2, DD3 в разных состояниях “0” и “1”, на выходе. Если на вход такого устройства подадут уровень нуля, то на выходе DD4, представляющего собой 4 логических элемента 2И-НЕ, устанавливается единица. Так же в устройстве используются четырехразрядные двоичные счетчики с асинхронным сбросом DD5-DD9, предназначенные для подсчета числа входных сигналов, фиксации этого числа в виде много разрядного двоичного числа, хранящегося в триггерах DD4. Далее сигнал, поданный с DD1 на DD2, DD3 в виде цифрового кода, преобразуется в аналоговый сигнал при помощи ЦАП однократного записывания DD10-DD15. DD16-DD18, служат для перемножения, сформированного аналогового сигнала. Для поддержания высокостабильного постоянного выходного сигнала в устройстве используется источник опорного напряжения DD19, DD21. Так же используется операционный усилитель DD20, для усиления выходного сигнала генератора импульсов.

### **Выводы**

В результате выполнения работы был получен комплект конструкторско-технологической документации на адаптер. Также было спроектировано устройство, позволяющее измерить необходимые параметры на ИМС для выявления в партии годных микросхем серии 525ПС3. В будущем, при внедрении данной методики в производство, для улучшения качества, появляется возможность замены ЦАП однократной записи на ЦАП с FLASH-памятью. Достоинством данного метода является достаточное количество параметров для разбраковки микросхемы большой степени интеграции в серийном производстве.

### **Список литературы**

[1] *Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А.* Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник (монография) / В.В. Андреев, В.Г. Барышев, А.А. Столяров; Моск. техн. гос. ун-т им. Н.Э. Баумана. Москва, 2004.



[2] *Андреев В.В.* Физические основы наноинженерии // учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению 152200 "Наноинженерия" / В. В. Андреев, А. А. Столяров; под ред. В. А. Шахнова. Москва, 2011. Сер. 16 Библиотека "Наноинженерия": комплект учебно-методических комплексов дисциплин по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети "Наноинженерия": в 17 кн.

[3] *Легкий Н.М.* Тенденции развития технологий производства электроники // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. 2018. Т. 14. С. 312-316.

[4] *Драч В.Е., Родионов А.В.* Перспективные технологии производства элементной базы телекоммуникационных устройств // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. №10. С.85-92.

**Богомолов Никита Сергеевич** – студент КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: bogomolovns1995@yandex.ru

**Научный руководитель: Драч Владимир Евгеньевич.** КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: drach@bmstu-kaluga.ru

## СОДЕРЖАНИЕ

### СЕКЦИЯ 1.

#### **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ..... 3**

*Яшкин К.В.*

Алгоритмизация гамильтонова цикла..... 4

*Гинсар И.Э.*

Анализ возможных дефектов при литье пластмасс с помощью  
SolidWorks Plastics и пути их устранения..... 7

*Малютин А.Д.*

Анализ методов получения глубоких отверстий ..... 11

*Исаев Н.О.*

Анализ способов изготовления заготовок для деталей типа плита ..... 15

*Чуйков И.А.*

Виды защитных покрытий металлов и способов нанесения ..... 18

*Тарасенков Д.А.*

Влияние усилия натяжения провода при изготовлении обмоток  
электрических машин на их электромагнитные характеристики ..... 21

*Виноградов В.И.*

Выбор и обоснование способа получения заготовки  
для детали «полумуфта зубчатая» ..... 24

*Трифонов Н.А.*

Выбор метода для выполнения разделительных операций  
заготовок из листов ..... 27

*Медведева Е.А.*

Выбор параметров шероховатости при оценке качества изделий ..... 30

*Ермачков Р.О.*

Выявление зависимости точности высоты осаженных заготовок  
от способа наладки технологической системы при осадке  
на гидравлическом прессе ..... 33

*Васильев Д.В.*

Геометрические параметры инструментов рассматриваемые  
в статическом состоянии и в движении ..... 36

*Мельников Я.С.*

Гибридные параметры геометрических характеристик изделия ..... 38

<i>Штокал А.О., Рыков Е.В., Артемьев А.В., Говорун Т.А., Шаталов В.К., Добросовестнов К.Б., Богачёв В.А., Баженова О.П.</i>	
Изучение стойкости МДО-покрытия на алюминиевом сплаве Д16АТ в условиях виброударного нагружения .....	41
<i>Тертычный В.Г.</i>	
Исследование влияния технологических факторов на процесс азотирования .....	48
<i>Аксёнов А.С., Атрощенко В.Н., Степанов Е.Д., Сорокин В.П.</i>	
Исследование повышения стойкости режущего инструмента путём нанесения специального покрытия .....	50
<i>Телтова Е.С.</i>	
Исследование последовательного и параллельного метода обработки отверстий на станках с ЧПУ .....	54
<i>Федоров И.В.</i>	
Исследование способов механической обработки алюминия и алюми- ниевых сплавов .....	58
<i>Куркин М.В.</i>	
Контроль точности формы и расположения отверстий корпусных деталей .....	62
<i>Кузнецов Д.И.</i>	
Методы обработки деталей из инструментальных сталей .....	65
<i>Харитоненко А.В., Крылов А.Ю., Журавлева Т.А.</i>	
Нормирование изготовления деталей технологической оснастки в инструментальном производстве .....	68
<i>Насевич И.Р., Прокофьева О.А.</i>	
Область применения 3D-принтеров в машиностроении .....	71
<i>Корневский Д.А.</i>	
Обработка глубоких отверстий малого диаметра .....	75
<i>Кривов Р.Ю.</i>	
Оптимизация режимов электроэрозионной обработки с помощью линейного программирования .....	78
<i>Бурмистров А.А.</i>	
Особенности и принципиальные схемы холодной осадки на гидравлических прессах .....	82
<i>Пулин П.А., Куликова В.Р.</i>	
Особенности применения смазочно-охлаждающих жидкостей .....	86
<i>Петрухин М.М., Соколова И.Д.</i>	
Перспективы использования аддитивных технологий для изготовления металлообрабатывающего инструмента .....	88

<i>Мерзлов А.В.</i> Применение полимерных накладок в призматических тисках для обработки валов .....	91
<i>Молчанова Е.М.</i> Роль автоматизации производства в современном машиностроении .....	93
<i>Анкуда Э.С., Сорокин В.П.</i> Современные износостойкие покрытия для режущего инструмента из твердых сплавов и сверхтвердых материалов .....	95
<i>Аржанков И.Е.</i> Сравнение методов аналитического анализа засаливания шлифовальных кругов .....	99
<i>Карпов М.П., Мальшев Е.Н.</i> Сравнительный анализ технико-экономических показателей перспектив- ных технологий изготовления деталей из паронита .....	102
<i>Аксенов С.С.</i> Термообработка валов при комбинированном термосиловом нагружении .....	106
<i>Сафронова М.Е.</i> Хронология прогресса инструментальных материалов .....	109
<i>Подвязников Михаил Сергеевич</i> Анализ технологических параметров при обработке заготовок микроинст- рументом .....	112
<i>Шулепов К.А.</i> Исследование затрат времени на наладку и смену инструмента .....	114
<i>Колесников И.А.</i> Исследование шероховатости поверхности при контурном фрезеровании .....	118
<i>Шведов И.А.</i> Исследование процессов лазерной резки металлов.....	121
<i>Бураков П.В.</i> Влияние конструктивных параметров установочных элементов на точность установки заготовки в приспособлении .....	124
<b>СЕКЦИЯ 2.</b> <b>ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА .....</b>	<b>126</b>
<i>Грибовский Е.И., Максимов Н.Н., Харченкова Е.А.</i> Анализ методов снижения эффекта шунтирования сварочного тока при контактной сварке .....	127

<i>Харченкова Е.А., Максимов Н.Н.</i> Анализ методов, применяемых для моделирования рабочего процесса в камере сгорания газотурбинного двигателя .....	131
<i>Дымов А.В., Орлик Г.В., Орлик А.Г.</i> Анализ способов наплавки .....	136
<i>Харченкова Е.А., Максимов Н.Н., Грибовский Е.И.</i> Исследование образования остаточных напряжений применительно к жаровой трубе газотурбинного двигателя .....	140
<i>Никитин А.А.</i> Методика расчета радиальных формоизменений внутренних поверхностей деталей типа «втулка» при ЭКНП .....	143
<i>Мельников Д.А.</i> Обзор дефектов при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов .....	146
<i>Денисов А.Е., Чернова Т.Г.</i> Способы заварки трещин в тонкостенных деталях из аустенитно-мартенситных сталей .....	151
<i>А.А. Родин</i> Особенности моделирования сварки трением перемешиванием.....	157
<b>СЕКЦИЯ 3.</b>	
<b>ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ.....</b>	<b>159</b>
<i>Кудряшов Е.А., Шурыгин А.А.</i> Анализ высокочастотных вольт-фарадных характеристик МДП-структур .....	160
<i>Вовченко О.Н.</i> Анализ вольт-фарадных характеристик ультратонких пленок SiO <sub>2</sub> и нитрированных пленок SiO <sub>2</sub> .....	164
<i>Караханян В.А., Шагаев В.В.</i> Анализ конструкторско-технологических параметров микросхемы, состоящей из дифференциальной пары транзисторов .....	168
<i>Саввин М.А.</i> Влияние количества пассивных элементов на коэффициент усиления антенны типа «волновой канал» .....	172
<i>Гатауллин Т.Ф. С.А. Адарчин I</i> Измерение времени обратного восстановления PIN диода на основе GaAlAs .....	176

<i>Конохов А.А.</i> Измерение энергетических параметров лазерного излучения фотоэлектрическим методом .....	180
<i>Крисанов С.С.</i> Измерительный стенд контроля параметров интегральных схем в условиях производства .....	183
<i>Зайончковский В.С., Прохоров И.А., Аунг Чжо Чжо</i> Использование компенсационных подслоев меди при получении пленок с высококоэрцитивным слоем Fe-Cr-Co на кремнии .....	186
<i>Терских А.О.</i> Корректировка формул. Исследование метода компенсации частоты КМОП ОУ путём косвенной обратной связи .....	191
<i>Лутовин Е.А.</i> Исследование способов подгонки тонкопленочных резисторов, исключающих деградиационные процессы в ИС операционных усилителей .....	194
<i>Кацапов О.И.</i> Моделирование тепловых процессов печатной платы с помощью системы автоматизированного проектирования ВЕТАSoft .....	198
<i>Романов Д.А., Прохоров И.А., Косушкин В.Г.</i> Особенности релаксации упругих напряжений в эпитаксиальных структурах германия и алмаза .....	202
<i>Толоконников В.Э.</i> Получение и анализ характеристик линейного регулируемого интегрального стабилизатора .....	208
<i>Кондрашов П.В.</i> Разработка автоматического устройства дозирования жидкостей с программным управлением .....	213
<i>Сидоров А.А. В.В. Шагаев I</i> Разработка библиотеки математических моделей компонентов датчика температуры .....	216
<i>Крисанов С.С.</i> Синтез spice модели МОП-транзисторов по тестовым таблицам .....	219
<i>Карпов В.И.</i> Уменьшение тока потребления микросхемы четырёхканального аналогового ключа .....	222

<i>Ульянов Д.О.Андреев</i>	
Характеристика полуконтактного режима атомно-силовой микроскопии .....	228
<i>Богомолов Н.С.</i>	
Методика повышения качества выхода годных микросхем.....	230

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

**Материалы  
Региональной научно-технической конференции**

**Том 1**

*Научное издание*

Все работы публикуются в авторской редакции. Авторы несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений

Подписано в печать 17.03.2019.  
Формат 60x90/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Печ. л. 15. Усл. п. л. 13,95.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Оригинал-макет подготовлен в  
Редакционно-издательской группе  
отдела научной инновационной деятельности  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана  
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57-31-87