

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Петрова Владимира Марковича

на диссертацию Максимова Дмитрия Дмитриевича

на тему: «Технологическое обеспечение и повышение качества сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6. – Технология машиностроения

### 1. Актуальность темы диссертации

Высокая коррозионная стойкость алюминиевых сплавов обуславливает их широкое применения для изготовления ответственных изделий, например деталей элегазовых трансформаторов. Применение элегаза  $SF_6$  в качестве изоляционной среды объясняется его высокой электрической прочностью по сравнению с трансформаторным маслом. Некоторые детали элегазового трансформатора (экраны, цилиндры, корпуса), которые имеют сложнопрофильные поверхности, изготавливают из алюминиевого сплава марки АМц. На тех участках сложнопрофильной поверхности, где требования по шероховатости не выполняются, возникает возмущение электромагнитного поля, что приводит к пробоям. Пробой тока ведет к прожигу поверхности детали и выходу из строя аппарата. Поэтому все сложнопрофильные поверхности деталей элегазового трансформатора должны быть изготовлены посредством такого технологического процесса, который обеспечит не только необходимое качество ответственных поверхностей, но и будет производительным.

В настоящее время в технологическом процессе изготовления корпусов, экранов, цилиндров элегазового трансформатора в качестве финишной операции применяется шлифовальная операция. Операция осуществляется в ручном или полуавтоматическом режимах с применением абразивных губок, бумаг, кругов. По трудоемкости операция шлифовальная занимает до 35% времени всего технологического процесса изготовления корпуса элегазового трансформатора. Применение абразивного инструмента на жесткой и гибкой основе приводит к шаржированию, а осуществление обработки в ручном режиме к увеличению рисков не обеспечить равномерное качество сложнопрофильной поверхности.

Соискателем предложено применение магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц, которая позволит обеспечить заданное качество сложнопрофильных поверхностей за счет соблюдения постоянного рабочего зазора вдоль всего обрабатываемого профиля. Разработанные способ и устройство для его осуществления, а также определенные диапазоны технологических параметров магнитно-абразивной обработки позволят повысить производительность технологического процесса изготовления деталей элегазового трансформатора.

Тема диссертации Максимова Д.Д. является актуальной, а материалы диссертации содержат научно обоснованное решение рассматриваемой задачи.

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-161 от 20.06.24  
АУ УС

## **2. Научная новизна диссертации**

Состоит в следующем:

2.1 Установлены математические зависимости шероховатости поверхности и удельного съема материала от технологических параметров магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц.

2.2 Установлены закономерности изменения твердости сложнопрофильной поверхности из алюминиевого сплава марки АМц в результате магнитно-абразивной обработки.

## **3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Автором проведены комплексные теоретические и экспериментальные исследования. Результатом теоретических исследований является проведенный научный анализ существующих источников, посвященных проблеме обеспечения равномерной шероховатости сложнопрофильных поверхностей различных конфигураций. Автором разработан и предложен способ магнитно-абразивной обработки, который заключается в ориентации рабочих поверхностей постоянных магнитов устройства параллельно касательным к обрабатываемой поверхности. Проведено компьютерное моделирование распределения магнитного поля в рабочем зазоре как для существующих технических решения поставленной проблемы, так и для предлагаемого способа. По результатам моделирования определено, что предлагаемый способ позволяет обеспечить равномерный рабочий зазор и, как следствие, равномерную магнитную индукцию по всему обрабатываемому профилю.

В ходе экспериментальных исследований прежде всего установлены диапазоны варьирования технологических параметров магнитно-абразивной обработки, а затем установлены зависимости влияния технологических параметров на шероховатость сложнопрофильной поверхности и удельный съем материала. Достоверность результатов экспериментальных исследований подтверждается проведенным планированием эксперимента, а также проверкой адекватности по критерию Фишера полученных по результатам эксперимента моделей.

Научные положения, выводы и рекомендации по назначению технологических параметров магнитно-абразивной обработки последовательно обоснованы и доказаны автором с применением корректных методов теоретических и экспериментальных исследований.

## **4. Научные результаты, их ценность**

Научные результаты исследования сформулированы соискателем в следующих положениях, выносимых на защиту:

1) Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей, включающий в себя схему ориентации постоянных магнитов, сочетание рабочих движений, и устройство для его осуществления, обеспечивают равномерную магнитную индукцию  $B \geq 0,6$  Тл в рабочем зазоре и, как следствие, равномерную шероховатость сложнопрофильной поверхности  $R_a = 0,5$  мкм.

Доказательством *первого защищаемого положения* являются теоретические и экспериментальные исследования по технологическому обеспечению качества сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава АМц, по результатам которых установлено, что непостоянство рабочего зазора по всему обрабатываемому профилю влечет за собой неравномерное качество обработанной поверхности (шероховатость, твердость), снижение производительности обработки. Предварительно проведенное моделирование распределение магнитного поля в рабочем зазоре с целью определения работоспособности предлагаемого способа и устройства показало, что предложенный способ магнитно-абразивной обработки и устройство для его осуществления обеспечивают равномерную магнитную индукцию  $B \geq 0,6$  Тл в рабочем зазоре, что приводит к равномерному качеству обрабатываемой сложнопрофильной поверхности. Установлено, что магнитно-абразивную обработку сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава АМц следует проводить с применением магнитно-абразивного порошка Пр10Р6М5 (фракция  $\Delta=60...160$  мкм) и полусинтетической СОЖ RANGLOIL-UNIVERSAL. Определенные диапазоны технологических параметров магнитно-абразивной обработки: частота вращения заготовки  $n = 115-750$  мин<sup>-1</sup>; амплитуда осцилляции устройства  $A = 0,25-1,5$  мм с периодом осцилляции  $T = 2$  с.; время обработки  $t = 4-12$  мин; величина магнитной индукции  $B = 0,55-1,15$  Тл, позволяют обеспечить шероховатость сложнопрофильной поверхности  $R_a = 1,2-0,5$  мкм.

2) Разработанные полиномиальные математические модели, учитывающие параметры магнитно-абразивной обработки – магнитную индукцию, частоту вращения, время обработки, амплитуду осцилляции, позволяют оценить эффективность варьирования технологических параметров, получить прогнозируемые значения шероховатости сложнопрофильной поверхности и удельного съема материала.

Доказательством *второго защищаемого положения* являются результаты статистической обработки полученных экспериментальных данных, которая позволила получить полиномиальные математические модели, учитывающие влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава АМц. Результаты экспериментальных исследований показали, что применение предлагаемых способа и устройства для его осуществления позволяет обеспечить равномерную шероховатость сложнопрофильной поверхности  $R_a = 0,508$  мкм и удельный съем материала с единицы площади  $q = 0,07144$  г/см<sup>2</sup>. На основании полученных моделей, а также анализа результатов экспериментов удалось установить, что на шероховатость сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава АМц наибольшее влияние оказывает магнитная индукция  $B$ , затем частота вращения  $n$ , второстепенные позиции занимает величина амплитуды движения устройства  $A$  и время обработки  $t$ . Таким образом, проведенная статистическая обработка экспериментальных данных позволила получить полиномиальные математические модели, с помощью которых возможно оценить эффективность варьирования технологических параметров магнитно-абразивной обработки, а по полученным графическим и

математическим зависимостям прогнозировать изменение шероховатости сложнопрофильной поверхности и удельного съема материала.

3) Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности и устройство для его осуществления позволяют повысить производительность обработки по сравнению со шлифованием в 1,4 раза в диапазоне частоты вращения заготовки  $n = 115 - 750 \text{ мин}^{-1}$ , а также повысить твердость сложнопрофильной поверхности по всему обработанному профилю в 1,2 раза.

Доказательством *третьего защищаемого положения* являются проведенные исследования, по результатам которых были получены значения производительности обработки  $p$  методом шлифования сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц для 5 серий экспериментов с различной частотой вращения заготовки  $n$  от 115 до 750  $\text{мин}^{-1}$ . Обработка производилась до достижения шероховатости сложнопрофильной поверхности  $R_a = 0,6-0,8 \text{ мкм}$ . По результатам статистической обработки результатов эксперимента установлено, что применение способа магнитно-абразивной обработки по сравнению со шлифованием позволяет увеличить производительность обработки в 1,4 раза. По итогам проведенных экспериментальных исследований влияния способа окончательной обработки на твердость сложнопрофильной поверхности установлено, что применение магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности при технологических параметрах:  $B = 0,85..1,0 \text{ Тл}$ ;  $n = 190..750 \text{ мин}^{-1}$ ;  $t = 8..10 \text{ мин}$ ;  $A = 0,75..1,5 \text{ мм}$ , позволяет обеспечить повышение твердости поверхности  $HV$  по всему профилю в 1,2 раза.

Идея исследования заключается в получении равномерной шероховатости сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц посредством такого способа магнитно-абразивной обработки, который обеспечивает эквидистантность рабочих поверхностей магнитов и обрабатываемой сложнопрофильной поверхности.

Результаты диссертационного исследования освещены в 13 печатных работах, в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получен 1 патент на изобретение.

## **5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации**

Автором разработан способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей и устройство для его осуществления, на которые получен патент на изобретение. Предлагаемое техническое решение включает в себя схему магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности, конструкцию устройства с постоянными магнитами, рабочие поверхности которых расположены параллельно касательным к обрабатываемой сложнопрофильной поверхности. Предлагаемое устройство обладает малыми габаритами по

сравнению с установками для магнитно-абразивной обработки, работающими на основе электрического тока, протекающего в катушках индуктивности, что существенно повышает применимость предлагаемого устройства и способа на промышленных предприятиях.

В ходе экспериментальных исследований соискателем установлены закономерности влияния величины магнитной индукции, времени обработки, частоты вращения и амплитуды движения устройства в процессе магнитно-абразивной обработки на шероховатость обработанной сложнопрофильной поверхности из алюминиевого сплава марки АМц и удельный съем материала. Также определены технологические параметры магнитно-абразивной обработки сложнопрофильной поверхности из алюминиевого сплава АМц, позволяющие обеспечить равномерную шероховатость  $R_a = 0,5$  мкм по всему обработанному профилю. Установленные закономерности и определенные диапазоны технологических параметров обработки сложнопрофильных поверхностей являются основой для составления рекомендаций по назначению технологических параметров магнитно-абразивной обработки.

Установлено, что применение метода магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей позволяет заменить процесс шлифования финишным процессом магнитно-абразивной обработки, обеспечивающим достижение равномерной шероховатости по всему обработанному профилю  $R_a = 0,5$  мкм. Автором доказано, что применение метода магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей повышает производительность обработки в диапазоне частоты вращения заготовки  $n = 115 - 750$  мин<sup>-1</sup> по сравнению со шлифованием в 1,4 раза, а также повышает твердость по всему обработанному профилю в 1,2 раза.

Значимость результатов диссертации подтверждается их апробацией на промышленных предприятиях АО ВО «Электроаппарат», ООО «ИСО» с получением актов внедрения.

#### **6. Рекомендации по использованию результатов работы**

Результаты диссертации, апробированные на предприятии АО ВО «Электроаппарат», могут быть внедрены в технологические процессы изготовления деталей из алюминиевых сплавов, имеющих сложнопрофильные поверхности.

Так как одним из направлений работы является повышение производительности процесса окончательной обработки, то предлагаемые способ и устройство могут быть внедрены на производства, осуществляющие доводочные операции с помощью ручных способов абразивной обработки.

Работа определенно содержит в себе вопросы, требующие более подробного изучения в последующих трудах, которые позволят развить исследование магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей.

## 7. Замечания и вопросы по работе

1. В автореферате и рукописи диссертации имеются ошибки, связанные с оформлением (подрисуночные подписи, переносы таблиц и т.п.).
2. В первой главе диссертации, автор рассмотрел не все методы финишной обработки поверхности заготовок деталей в том числе выполненных из цветных сплавов. В частности, не рассмотрен прогрессивный метод виброголтовки.
3. Отсутствует обоснованный переход от физического объекта - детали «экрана элегазового трансформатора», изображенного на рис.1.5 (диссертации) на модель в виде шара или сферы (геометрического объекта исследования заготовки детали).
4. Не достаточно обоснован переход от конструкции системы с несколькими постоянными магнитами к системе с двумя магнитами которые имеют свои характерные «слепые зоны» с наименьшей областью контакта абразивной суспензии (см. рис.2.5, 2.7, 2.13 – Способ MAO сложнопрофильной поверхности; рис. 2.14 – Схема MAO для сложно профильной поверхности сфероида).
5. Неясно, при моделировании магнитной системы в программной среде ANSYS Maxwell (рис. 2.8, 2.9, 2.10 и рис. 2.16, 2.23, 2.24 - Распределение магнитной индукции для двух магнитов) учитывались ли физико-механические свойства магнитного порошка? Если учтены коэффициентами, то каким образом и как влияют на процесс при моделировании?
6. Не приведена фотографии геометрии абразивных зерен. Какие основные представители геометрии абразива (в виде шара, кубической, пирамидальной формы и т.п.)?
7. Каким образом оценен период стойкости абразивного материала и живучесть суспензии, а также влияние изменяющейся фракции абразива и продуктов износа на процесс обработки и шероховатость поверхности?
8. В диссертационном исследовании не достаточно изложена физика процесса упрочнения обработанной поверхности абразивными частицами в магнитном поле.
9. Не ясно происходит ли микро - шаржирование при данном методе обработке микроабразивными частицами?
10. В работе в качестве основного параметра достигаемой шероховатости представлен высотный параметр  $R_a$ , мкм. Однако целесообразно и более информативно было бы привести параметр опорной поверхности  $tr$ . Поскольку модель профилометра Mitutoyo SurfTest SJ-210 (схема измерения приведена на рис.3.2) это позволяет сделать.
11. Соискателем предложено оценка изменения твердости по параметру НВ (шкала Бринелля). Схема измерения твердомером НТ-1208 представлена на рис. 4.4, 4.5, 4.6. В данном случае использование метода твердости не совсем корректно, поскольку изменения происходят в тонком поверхностном слое. Поэтому целесообразно измерять микротвердость по шкале НВ Виккерса.

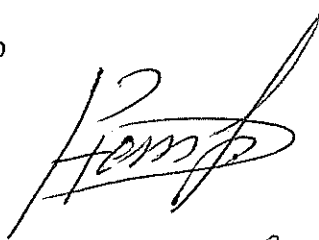
## 8. Заключение по диссертации

Диссертация на тему: «Технологическое обеспечение и повышение качества сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6. – Технология машиностроения, полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм., а ее автор **Максимов Дмитрий Дмитриевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6. – Технология машиностроения.

Официальный оппонент

Профессор кафедры технологии и производства артиллерийского вооружения  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего  
образования «Балтийский государственный технический университет ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.  
Устинова»

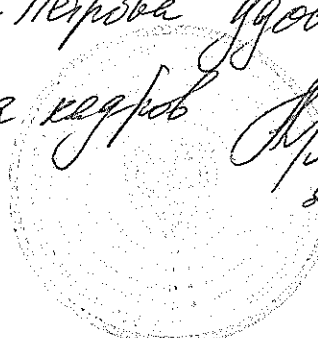
Доктор технических наук, профессор



**Петров Владимир Маркович**

*Подпись работницы В.М. Петрова удостоверяю*

*И.о. начальника управления кадров М.А. Алфревуца*



### Сведения об официальном оппоненте:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Балтийский государственный технический университет ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

Почтовый адрес: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. Красноармейская, д. 1

Официальный сайт в сети Интернет: [www.voenmeh.ru](http://www.voenmeh.ru)

эл. почта: [kaf\\_e2@voenmeh.ru](mailto:kaf_e2@voenmeh.ru) телефон: +7 (812) 495-77-49