

## ОТЗЫВ

официального оппонента Боброва Алексея Леонидовича  
на диссертационную работу Катасонова Александра Олеговича  
«Вихретоковый метод исследования неоднородностей и дефектов тонких  
металлических пленок»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы  
экспериментальной физики

**Актуальность выбранной темы.** В физике твердого тела известно, что масштабный эффект вносит свой вклад в теоретические представления о связи структуры материала и его физические и механические свойства. Это во многом касается и металлических объектов, которые активно используются в современной электронике и технике. Еще одной важной тенденцией современных технологий является миниатюризация оборудования, аппаратуры и компонентов. Диссертационная работа Александра Олеговича выполнена на стыке приведенных направлений развития техники и идущей в её авангарде экспериментальной физики. И в этом смысле представленная научная работа на тему «Вихретоковый метод исследования неоднородностей и дефектов тонких металлических пленок» актуальна для формирования представлений об электромагнитных свойствах и их изменениях в тонких металлических пленках. Дополнительная ценность исследований заключается в многостороннем подходе к решению проблемы с разработкой преобразователя, аппаратно-программного комплекса и методики проведения измерений изготовленной экспериментальной аппаратурой.

**Диссертационная работа** Катасонова Александра Олеговича является законченной научно-квалификационной работой и состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованных источников и дополняющих информативных приложений.

Во введении обоснована актуальность работы, выделены научная новизна и практическая значимость решаемых в диссертации проблем. Там же Александр Олегович обозначил цели и задачи своих исследований, привел краткую характеристику направлений исследований, представил основные положения, выносимые на защиту и полученные по результатам приведенных исследований.

В первой главе Александром Олеговичем представлен обзор опубликованных научных работ по теме и направлениям исследований,

представленных в диссертации. Автор проанализировал различные методы исследования тонких пленок и установил, что оптимальным методом для исследования электромагнитных свойств тонких металлических пленок является вихретоковый метод. Это связано с тем, что метод является многопараметровым, имеет относительно высокую производительность и удовлетворительное качество измерений толщины тонких металлических объектов и колебаний электрической проводимости, которая, в свою очередь, связана с существованием дефектных структур. Последнее обстоятельство для функционирования тонких электропроводящих плёнок в электронике имеет важное прикладное значение.

Для решения поставленных задач по исследованию однородности электрических свойств и толщины тонких пленок во второй главе представлены результаты моделирования параметров миниатюрного вихретокового преобразователя. По итогам проведенных исследований разработана структурная схема программно-аппаратного комплекса для работы с миниатюрным преобразователем, который позволяет не только получать информацию с преобразователя, но и обрабатывать и визуализировать результаты измерения электромагнитных параметров.

Третья глава диссертации посвящена исследованию тонких плёнок, толщиной до 1 мкм из меди и никеля. В главе сначала определены основные параметры, влияющие на качество измерений толщины и поиска локальных неоднородностей электромагнитного поля, присущих дефектам металлов в виде неметаллических включений, разрывов, расслоений и трещин и других, подобного рода несплошностей, возникающих в металлических материалах.

Во второй части третьей главы исследованы методические аспекты контроля качества тонких металлических плёнок и приведены результаты, позволяющие применять вихретоковый метод для контроля толщины и несплошностей таких объектов контроля, что расширяет и возможности метода вихревых токов и развивает методы исследования и оценки неоднородности структуры тонких металлических пленок толщиной до 1 мкм.

Диссертационная работа, очевидно, содержит **научную новизну**, наиболее значимыми составляющими которой, на мой взгляд, являются:

- разработка аппаратуры и типа преобразователей позволяющих контролировать толщину и неоднородности электромагнитных свойств тонких металлических ферромагнитных пленок на площадках более 1 см<sup>2</sup>, определять границы таких плёнок;

– разработанная аппаратура позволяет проводить поиск и идентификацию несплошностей и неоднородностей структуры тонких металлических ферромагнитных пленок с относительно высокой электрической проводимостью и толщиной от 100 до 1000 нм;

– сформулированы граничные условия и алгоритмы обработки получаемой вихретоковым методом информации, обеспечивающие надежность использования разработанных методик измерений и толщины тонких металлических пленок, и поиска неоднородностей структуры.

**Достоверность и обоснованность результатов** работы обеспечивается систематическим характером исследования, верификацией результатов измерений, воспроизводимостью полученных результатов. Александр Олегович использовал дополнительные методы измерений и контроля для подтверждения результатов исследований вихретоковым методом. Результаты исследований получены в лабораторных условиях и опубликованы научных рецензируемых изданиях, а также доложены и обсуждены на научных конференциях российского и международного уровней.

#### **Теоретическая значимость результатов для науки.**

В качестве отправной точки исследований и для разработки вихретокового специализированного преобразователя и обрабатывающей информацию с такого преобразователя аппаратуры, позволяющих получать информацию о параметрах тонких металлических пленках Александром Олеговичем произведено моделирование распределения вихревых токов, формируемых в предельно тонком электропроводящем объекте. Результатом моделирования стала работоспособная аппаратура и в частности миниатюрный вихретоковый преобразователь, которые позволяют использовать результаты для решения основных задач неразрушающего контроля применительно к тонким металлическим пленкам.

Для разработанной и изготовленной аппаратуры дополнительно разработана методика измерения, позволяющая определять размеры несплошностей, образовавшихся в тонких металлических пленках с погрешностью около 9 %.

**Практическая ценность работы** несомненна. Результаты исследований представляют практический интерес для проведения неразрушающего контроля металлов имеющих вид тонких фольг и пленок, при этом площадь таких объектов может достигать 1 см<sup>2</sup>. Наибольшую практическую значимость результаты представляют для решения задач выходного контроля толщины и

дефектоскопии тонких металлических плёнок и фольг на этапе их производства, а также изменения параметров тонких металлических плёнок во времени. Значимость технических решений подкреплена полученными патентами на изобретение.

Представленные результаты могут и должны внедряться в технологический процесс контроля тонких металлических плёнок и фольг, на этапе их производства и последующем изменении этих параметров в процессе эксплуатации, когда эти изменения возможны.

По теме диссертации соискателем было **опубликовано** 49 научных работ, в том числе семь из них в рецензируемых изданиях из списка ВАК и 32 в изданиях, индексируемых международными базами Scopus и Web of Science, Александр Олегович является соавтором двух патентов на изобретение и одной зарегистрированной программы. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. К рисункам 2.1 и 2.2 нет пояснений, что означают различные элементы этих рисунков, а также каков был шаг дискретизации при использовании метода конечных элементов в расчётах для разных задач, рассмотренных в диссертации.

2. В разделе 3.3 не приведены результаты оценки толщины измеряемых металлических плёнок альтернативными методами и средствами, что не позволяет качественно проанализировать полученные результаты и точность этих измерений.

3. Некоторые графики не содержат достаточной информации, в том числе в тексте, который комментирует рисунок. Это затрудняет понимание полученных результатов. Например, на рисунке 3.7 не проставлены цифровые маркеры кривых. На рисунках 3.11-3.13 непонятно, чем отличаются результаты для образцов из партии и показывают ли они статистический разброс данных для идентичных образцов или всё-таки параметры образцов имеют значимые для анализа различия.

4. Теория и практика применения вихретокового метода к реальным объектам показывает, что значительное влияние на числовые значения измеряемых параметров оказывает краевой эффект и именно он, видимо, приводит к значительным изменениям результатов при приближении преобразователя к краю каждой плёнки. При дальнейшем совершенствовании методов контроля толщины металлических плёнок и поиска несплошностей для


оценки достоверности получаемых результатов необходимо учитывать этот фактор.

Высказанные замечания принципиально не влияют на общую положительную оценку работы. В целом, работа выполнена на высоком научном и профессиональном уровне.

### **Заключение.**

Диссертационная работа Катасонова Александра Олеговича «Вихретоковый метод исследования неоднородностей и дефектов тонких металлических пленок», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики, представляет собой законченное исследование, содержит новые научно обоснованные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития методов исследования свойств тонких металлических пленок с толщиной от 0,1 до 1 мкм. Работа соответствует пунктам 3 и 6 паспорта научной специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики», а ее автор, Катасонов Александр Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Физика, электротехника,  
диагностика и управление в технических  
системах», Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Сибирский государственный  
университет путей сообщения»



07.11.2023

Бобров Алексей  
Леонидович

6340049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191,  
рабочий телефон: +7-(383)-328-03-02,  
электронная почта: beaver@stu.ru

Подпись Боброва Алексея Леонидовича  
Заверяю  
Ученый секретарь ученого совета СГУПС



Гербер А.Р.

07.11.2023