

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Шевчук Евгении Петровны на тему: «Формирование боридных упрочняющих покрытий с обширной диффузионной зоной на углеродистой стали», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

**Актуальность работы.** Диссертационная работа Шевчук Евгении Петровны направлена на выполнение экспериментов, позволяющих получить обширную диффузионную зону на углеродистой стали, формируемую индукционным и микродуговым воздействием. Фундаментальной основой формирования диффузионной зоны являются диффузионные процессы, обеспечивающие массоперенос в матрицу и формирование упрочненной области с участием вещества матрицы. Химико-термическая обработка позволяет сформировать в поверхностном слое стали макроскопически обширную диффузионную зону, в которой граница раздела отсутствует. На современном этапе проблема диссертационного исследования Шевчук Е.П. является очень важной, поскольку проблемы совершенствования существующих и создания новых методов обработки металлов для повышения их эксплуатационной стойкости привлекают особое внимание, что делает актуальными исследования, направленные на создание таких поверхностей. Создание градиентных слоев повышает прочность поверхностных слоев сталей.

**Научная новизна.** В ходе решения поставленных задач Шевчук Е.П. получила ряд новых научных результатов. Наиболее значимыми являются следующие результаты:

1. Выявлено, что при использовании шихты с добавкой жидкого стекла элементный анализ диффузионной зоны свидетельствует, что распределение бора имеет максимум в интервале 150-200 мкм, а максимум распределения кремния – около 600 мкм.

2. Установлено, что перенос бора в ходе формирования обширной диффузионной зоны при индукционном борировании обеспечивается аномальным диффузионным процессом, коэффициент диффузии бора составил  $1,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ , что на 2 порядка выше, чем при традиционном борировании, и соответствует диффузии в жидкой фазе.

3. Установлено, что наиболее оптимальный состав борсодержащей шихты содержит 25 % порошкового железа и 75 % борной кислоты ( $\text{Fe-25\%} + \text{H}_3\text{BO}_3\text{-75\%}$ ), малые добавки аммиака и жидкого стекла увеличивают возможность образования боридов железа.

4. Показано, что в условиях индукционного воздействия формируется структура диффузионной зоны, содержащая высокопрочный слой боридов  $\text{FeB}$  или  $\text{Fe}_2\text{B}$ , толщиной в интервале от 30,46 до 65,43 мкм, и композиционного слоя, состоящего из высокопластичной  $\alpha$ -фазы матрицы, упрочненной боридными фазами.

5. Установлено, что введение в область микродугового воздействия борсодержащей шихты также сопровождается формированием обширной диффузионной зоны с преимущественным содержанием борида  $\text{Fe}_3\text{B}$  с

высокими механическими характеристиками. Максимальная микротвердость по сечению наплавка-матрица составила 3400-3700 МПа.

**Значимость полученных результатов для науки и практики.** Диссертация Е.П. Шевчук характеризуется несомненной научной ценностью. В частности, полученные результаты вносят определенный вклад в существующие представления диффузионной зоне. Во-первых, в работе установлено, что насыщение поверхностного слоя углеродистой стали при 1000 °С из шихты, содержащей легкорастворимую борную кислоту, в индукционной печи или в ходе микродугового борирования осуществляется за счет аномально высокого диффузионного массопереноса бора в металлическую матрицу, обеспечивающие формирования обширной диффузионной зоны величиной 900-1000 мкм. Во-вторых, распределение бора в диффузионной зоне коррелирует с распределением микротвердости.

Практическое значение работы также бесспорно и заключается в разработке наиболее оптимального состава шихты, состоящей из 25%Fe, 75%Н<sub>3</sub>ВО<sub>3</sub>, малые добавки аммиака, жидкого стекла и угля, позволяющей в течение 5 минут сформировать обширную диффузионную зону, насыщенную боридами железа.

**Степень обоснованности, достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.** Основные положения, выносимые на защиту, и выводы диссертационной работы Шевчук Е.П. являются обоснованными результатами проведенных исследований.

Поставленные в работе задачи решены. Автором получен большой объем экспериментальных данных. Достоверность полученных экспериментальных результатов обусловлена согласием данных, полученных различными экспериментальными методиками, и их соотношением с данными других авторов и непротиворечивостью существующим научным представлениям. Достоверность результатов исследований диссертационной работы подтверждается публикациями в виде 11 статей в рецензируемых научных журналах и одной статьи в журнале, индексируемом наукометрическими базами Web of Science и Scopus.

**Анализ содержания работы.** Диссертационная работа Шевчук Е.П. написана хорошим научным языком, изложена на 156 страницах машинописного текста и состоит из введения, трех глав, заключения, обзора литературы и 2-х приложений, а также описания методик исследований, полученных результатов и их обсуждения, выводов. Список литературы включает 190 источника. Диссертационная работа проиллюстрирована 29 рисунками, 29 таблицами и 53 формулами.

Во введении автор описывает актуальность имеющейся научной проблемы, формулирует цель, задачи исследования. Первая глава диссертационной работы является Обзором литературы и содержит информацию об анализе диффузионных процессов в бинарных соединениях, механизмах и законах диффузии, кинетике диффузии и особенностях образования боридов железа при химико-термической обработке. Особое внимание уделено перспективам диффузного борирования. На основе

литературных данных произведен анализ диффузионных процессов в бинарных соединениях. Рассмотрены механизмы диффузии в  $\alpha$ -кристаллах, жидкой фазе, а также переход в ГЦК решетку. Содержание обзора свидетельствует о хорошем знании диссертантом современного состояния решаемой научной проблемы, что также подтверждается цитированием большого количества статей.

Во второй главе автором описаны химико-термические процессы, материалы и образцы, оборудование, способы химико-термической обработки для борирования поверхностных слоев материалов, методики проведения экспериментов с применением: нагрева в индукционной печи, микродугового борирования, отжига в муфельной печи. Подробно описаны использованные методы исследований: микротвердости, рентгеноструктурного анализа и микроструктуры поверхностных слоев исследуемых материалов. Также во второй главе диссертации приведен расчет шихты и паст для борирования, рассмотрен выбор компонентов состава обмазок, произведен расчет количества составляющих, выявлены преимущества выбора обмазки.

Все использованные методики являются апробированными. Автором были соблюдены принципы проведения исследований.

Результаты исследований представлены в третьей главе: исследования микротвердости, рентгено-структурного и рентгено-фазового анализов, микроструктуры поверхностных слоев, расчеты коэффициентов диффузии и размеров обширной диффузионной зоны, полученные борированием в условиях индукционного нагрева, нагрева в муфельной печи, микродугового борирования. Сформулированы идеи обширной диффузионной зоны. Анализ результатов содержания бора и кремния в диффузионной зоне, значения коэффициентов диффузии бора через формирующийся слой боридов и  $\alpha$ -фазу железа изложены в сравнительном аспекте.

Материал изложен четко и последовательно, хорошо иллюстрирован и, что важно, отдельные параграфы внутри глав завершаются лаконичными обобщениями.

Эта глава заслуживает особого внимания, поскольку представляет собой глубокий и всесторонний анализ всех полученных в ходе исследования научных фактов. В процессе трактовки результатов диссертант опирается на представленные в литературе точки зрения относительно рассматриваемых вопросов, а также высказывает собственные идеи о причинах и механизмах диффузии.

Е.П. Шевчук сделаны обоснованные заключения о результатах исследований, которые свидетельствуют, что наиболее оптимальные методы ХТО для формирования обширной диффузионной зоны на углеродистой стали 20 – это индукционное и микродуговое борирование с использованием шихты с содержанием борной кислоты не менее 50 мас. %. Индукционное борирование при 1000 °С позволяет существенно уменьшить время борирования до 5 минут и сформировать обширную диффузионную зону шириной до 1000 мкм.

Диссертационная работа содержит 7 выводов, которые резюмируют полученные экспериментальные данные и коррелируют с поставленными

задачами.

**Общая оценка работы и ее соответствие требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.** Диссертация Шевчук Е.П. представляет собой важное, интересное и профессионально выполненное исследование, соответствующее статусу научно-квалификационного труда. Полученные в диссертационной работе данные отражены: в 11 статьях в журналах, включённых ВАК в перечень ведущих периодических изданий, в 1 статье в журнале, индексируемом наукометрическими базами Web of Science и Scopus. Имеется патент на изобретение «Способ борирования поверхностных слоев углеродистой стали при помощи индукционного воздействия». Материалы диссертации докладывались и публиковались в сборниках 6 международных научных конференций, что говорит о должном уровне их апробации. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

**Вопросы и замечания по содержанию диссертации.** Несмотря на многочисленные достоинства диссертации, в ней имеются отдельные недочеты, которые вызывают ряд вопросов, но при этом не влияют на общее благоприятное впечатление о работе.

1. Научная новизна в работе представлена в следующем виде: «Разработан метод интенсификации диффузионных процессов при борировании стали 20 путем обработки индукционными токами при температуре 1000°С обмазки из легкоразлагаемой борсодержащей шихты, обеспечивающий в течение 5, 10 и 15 минут формирование диффузионной зоны размером 660-1000 мкм, содержащей преимущественно соединения FeB и Fe<sub>2</sub>B, распределенных в α-матрице». Как следует из текста это относится к практической части работы: «Разработан метод . . .»

2. Не удачно сформулированы выносимые на защиту положения. Первое положение надо было представить более подробно. Что нового в этом положении. Очевидно, что в твердофазные реакции проходят при определенных температурных воздействиях на границах раздела.

4. Работа относится к экспериментальной, однако оригинальной части эксперимента в работе уделено всего 47 страниц, тогда как обзорной главе 43. При этом в списке литературы нет современных работ за последние пять лет, посвященных данной тематике. В работе приведены только ссылки за последние пять лет на работы диссертанта.

5. В выводах под пунктом 4 приведено такое предложение: «Индукционное воздействие позволяет сформировать в структуре диффузионной зоны композиционный слой боридов толщиной 14,45-65,43 мкм, состоящий из кристаллографически ориентированной боридной фазы FeB.». Удивляет полученный результат. Вопрос – с какой такой прецизионной точностью в сотых долях мкм и в тоже время в таких широких пределах смогли получить эту информацию о композиционном слое боридов такой толщины

6. В выводах под пунктом 6 приведено такое предложение: «При введении в область микродугового воздействия борсодержащей шихты сформирована обширная диффузионная зона величиной 840 мкм с высокими

механическими характеристиками наплавленного слоя, величина которых на поверхности может достигать 3400-3700 МПа». Что в этом выводе подразумевается под механическими характеристиками? Адгезионная прочность? Предел прочности?

Сформулированные замечания не влияют на общую положительную оценку работы и являются пожеланиями по дальнейшему планированию исследований.

**Заключение.** Диссертационная работа Шевчук Евгении Петровны «Формирование боридных упрочняющих покрытий с обширной диффузионной зоной на углеродистой стали», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния является самостоятельным завершенным научным трудом, выполненным на высоком научном уровне, представляющем интерес для решения важной проблемы создания функционально-градиентных поверхностных слоев, обладающих уникальными физико-механическими свойствами, совершенствования существующих и создания новых методов обработки металлов для повышения их эксплуатационной стойкости.

По актуальности, новизне, научно-практической значимости, степени достоверности результатов исследования и объему диссертационная работа Шевчук Евгении Петровны полностью соответствует требованиям п. 9 положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 года № 335, предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Клопотов Анатолий Анатольевич,  
доктор физико-математических наук  
(01.04.07 – физика конденсированного состояния),  
профессор кафедры «Прикладная механика и материаловедение»  
Федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Томский государственный архитектурно-строительный университет».  
Адрес: 634003, г. Томск, площадь Соляная, 2;  
телефон: +7(3822)650-723;  
e-mail: klopotovaa@tsuab.ru

Я, Клопотов Анатолий Анатольевич, даю согласие на обработку моих персональных данных, связанную с защитой диссертации и оформлением аттестационного дела Шевчук Е. П.

Клопотов Анатолий Анатольевич

30 апреля 2024 г.

Подпись А.А. Клопотова удостоверяю

Ученый секретарь ФГБОУ ВО ТГАСУ



Ю.А. Какушкин