

**ОТЗЫВ**  
**ОТЕЧЕСТВЕННОГО НАУЧНОГО КОНСУЛЬТАНТА**  
**на диссертационную работу Сатбаевой Зарины Аскарбековны**  
**«Структурообразование в легированных сталях при электролитно-плазменном поверхностном упрочнении», представленную на соискание**  
**степени доктора философии (PhD) по специальности 6D060400 – «Физика»**

**1. Актуальность темы исследования и ее связь с общенаучными и общегосударственными программами**

В настоящее время для поверхностного термического упрочнения стальных деталей в промышленности широко применяют высокочастотную, газопламенную, плазменную, электроннолучевую и лазерную обработку. При этом из всех существующих способов упрочнения по своим технико-экономическим показателям находит широкое и эффективное применение в производстве. Одним из разновидностей плазменного поверхностного упрочнения является электролитно-плазменное упрочнение. Основной отличительной особенностью метода электролитно-плазменного упрочнения является меньшая стоимость, доступность технологического оборудования и расходных материалов, большие размеры упрочненной зоны и высокая скорость охлаждения по сравнению с традиционными методами плазменного поверхностного упрочнения. Сущность его заключается в фазовых и структурных превращениях, происходящих при быстром концентрированном нагреве поверхности детали плазменным воздействием с последующим быстрым охлаждением за счет теплоотвода вглубь материала и воздействия проточного электролита на поверхность. Образующиеся при этом структуры закалочного типа обладают высокой твердостью, износостойкостью и стойкостью к разрушению.

Диссертационная работа соискателя Сатбаевой З.А. посвящена экспериментальным исследованиям изменений структурно-фазовых состояний и трибологических свойств поверхностных слоев конструкционных легированных сталей 40ХН, 20Х2Н4А, 34ХН1М при электролитно-плазменном поверхностном упрочнении, а также разработке ресурсосберегающего способа электролитно-плазменного упрочнения конструкционных легированных сталей. В работе представлены результаты влияния технологических особенностей параметров разработанного способа поверхностной электролитно-плазменной обработки сталей марки 40ХН, 20Х2Н4А, 34ХН1М на модифицирование механических и трибологических свойств поверхности материала. Согласно апробированным экспериментальным результатам и данным классических и теоретических методов исследования, было установлено, что поверхностная электролитно-плазменная обработка позволяет существенно повысить механические и трибологические свойства за счет формирования модифицированных слоев на поверхности материала состоящих как из основных, так и из вторичных упрочняющих фаз.

Результаты, представленные в данной диссертационной работе, соответствуют приоритетному направлению развития науки «Энергетика и машиностроение» и выполнена в соответствии со следующими проектами, финансируемыми Комитетом науки МНнВО РК:

– BR05236748 «Исследования и разработка инновационных технологий получения износостойких материалов для изделий машиностроения», программно-целевое финансирование на 2018-2020 гг., договор №197 от 16.03.2018 г.;

– AP05134936 «Разработка технологии электролитно-плазменной поверхностной закалки для повышения долговечности тяжело-нагруженных зубчатых колес», грантовое финансирование на 2018-2020 гг., договор №98 от 05.03.2018 г.

## **2. Научные результаты и их обоснованность**

Цель и задачи, поставленные в диссертационной работе достигнуты и полностью решены в ходе исследования. Были получены следующие результаты:

1. Разработан способ упрочнения легированных сталей, который осуществляется в электролите на основе водного раствора карбоната натрия и карбамида путем локального плазменного воздействия на поверхность обрабатываемого материала при подаче напряжения между обрабатываемым материалом и жидким электролитным катодом 320В в течении 2 сек и охлаждения при отключении напряжения за счет теплоотвода вглубь материала и воздействия направленного потока электролита, находящийся в циркуляционном режиме.

2. Установлено, что технология электролитно-плазменного поверхностного упрочнения способствует формированию на поверхности сталей 40ХН, 34ХН1М и 20Х2Н4А модифицированного слоя со средней толщиной ~ 2 мм с улучшенными механотрибологическими и трибокоррозионными параметрами, состоящего из закаленного слоя с морфологическими составляющими фаз мелкозернистого мартенсита, и промежуточного слоя со структурой, состоящей из зерен перлита и мартенсита.

3. Определено, что после ЭППУ в низкоуглеродистых сталях формируется модифицированный слой из мартенсита с остаточным аустенитом, а среднеуглеродистых сталях формируются мартенсит с остаточным аустенитом и цементит. При этом основа материала, состоящий из ферритной или ферритно-перлитной структуры, не изменяется, т.е. деталь сохраняет свою вязкую сердцевину. Наличие остаточного аустенита и цементита в поверхностных слоях положительно влияют на эксплуатационные свойства деталей.

4. Выявлено, что ЭППУ позволяет модифицировать механотрибологические свойства сталей 40ХН, 34ХН1М и 20Х2Н4А следующим образом: микротвердость поверхности повышается для стали 40ХН в 2,17 раза, для стали 34ХН1М в 2,62 раза и для стали 20Х2Н4А в 2,20 раза, а показатель коэффициент трения снизился в среднем по всем образцам в ~1,5 раза, а так же трибологические параметры интенсивность и объем изнашивания при трении скольжении для стали 40ХН уменьшилось в 10,4 и 4,33 раза, для стали 34ХН1М в 3,4 и 1,8 раза, для стали 20Х2Н4А в 2,04 и 3,4 раза, что подтверждает упрочнение поверхности материала.

5. Установлено, что ЭППУ положительно влияет на трибокоррозионные параметры сталей 40ХН, 34ХН1М и 20Х2Н4А за счет формирования модифицированного слоя состоящих из упрочняющих фаз, таких как  $\alpha'$ -фаза (мартенсит),  $\gamma'$ -фаза и карбиды  $Fe_3C$ , так коэффициент упрочнения образцов сталей вырос в среднем по всем сталям в ~2,3 раза, а параметры при абразивном

изнашивании - коэффициент относительной износостойкости увеличился в среднем в ~2,5 раза и показатель потери массы снизился в ~1,6 раз, так же для этих сталей коррозионные параметры улучшились следующим образом: скорость коррозии в среднем уменьшилось в ~1,5 раза, а масса утеряна в процессе коррозии в среднем снизилась в ~1,6 раз в зависимости от исходного состояния, что доказывает эффективность применения ЭППУ для этих сталей.

6. Проведенные исследования методом просвечивающей электронной дифракционной микроскопии показали:

- поверхностная закалка стали феррито-перлитного класса 34ХН1М привела к изменению структурно-фазового состояния и образованию структуры пакетно-пластинчатого мартенсита;

- поверхностная закалка привела к выделению мелких частиц цементита и карбида типа  $M_{23}C_6$ , равномерно расположенных по всему объему материала;

- поверхностная закалка привела к поляризации дислокационной структуры, искажению кристаллической решетки и формированию внутренних далекодействующих напряжений, однако изгиб-кручение кристаллической решетки носит чисто пластический характер, не приводящий к образованию микротрещин в материале;

- поверхностная закалка привела к увеличению всех количественных параметров тонкой структуры ( $\rho$ ,  $\rho_{\pm}$ ,  $\chi$ ,  $\sigma_L$ ,  $\sigma_d$ ), что приведет к дополнительному упрочнению материала на пределе текучести;

- образование новых границ (реек и пластин) и равномерно расположенные мелкие частицы карбидной фазы (цементит и  $M_{23}C_6$ ) также должны привести к существенному упрочнению стали по сравнению с исходным состоянием.

7. На основе изучения тонкой структуры стали 34ХН1М была установлена, что основными механизмами упрочнения сталей феррито-перлитного класса являются: выделению мелких частиц цементита и карбида типа  $M_{23}C_6$ , равномерно расположенных по всему объему материала; поляризация дислокационной структуры; искажение кристаллической решетки и формированию внутренних далекодействующих напряжений; увеличение всех количественных параметров тонкой структуры ( $\rho$ ,  $\rho_{\pm}$ ,  $\chi$ ,  $\sigma_L$ ,  $\sigma_d$ ).

Таким образом, проведенные исследования показали перспективность и целесообразность применения разработанного способа для повышения эксплуатационных свойств деталей, работающих в условиях трения и изнашивания.

### **3. Степень обоснованности и достоверности каждого научного результата (научного положения), выводов и заключения соискателя, сформулированных в диссертации**

Достоверность научных положений, выносимых на защиту, выводов и заключения соискателя не вызывает сомнения.

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных методов исследования структуры, химического и фазового состава, профиля поверхности, механических и трибологических испытаний, большими объемами и повторяемостью экспериментальных данных. Результаты исследования,

проведенные в диссертационной работе, не противоречат известным научным представлениям и результатам.

#### **4. Степень новизны каждого научного результата (положения), вывода соискателя, сформулированных в диссертации**

В диссертационной работе Сатбаевой З.А. были впервые:

- разработан новый способ упрочнения легированных сталей, который осуществляется в электролите на основе водного раствора карбоната натрия и карбамида путем локального плазменного воздействия на поверхность обрабатываемого материала при подачи напряжения между обрабатываемым материалов и жидким электролитным катодом 320В в течении 2 секунд и охлаждения при отключении напряжения за счет теплоотвода вглубь материала и воздействия направленного потока электролита, находящийся в циркуляционном режиме.

- получены систематизированные экспериментальные данные о влиянии электролитно-плазменного поверхностного упрочнения на структуру, фазовый состав и трибологические свойства конструкционных легированных сталей 40ХН, 34ХН1М, 20Х2Н4А;

- установлены морфологические особенности тонкой структуры и количественные параметры дислокационной структуры легированной стали 34ХН1М до и после электролитно-плазменной поверхностного упрочнения.

#### **5. Практическая и теоретическая значимость научных результатов**

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований дают новые, более глубокие представления о процессе формирования модифицированного поверхностного слоя в конструкционных легированных сталях при электролитно-плазменном поверхностном упрочнении. Данная работа имеет важное практическое значение, так как разработанный способ электролитно-плазменного поверхностного упрочнения позволяет получить модифицированный поверхностный слой на конструкционных легированных сталях с улучшенными физико-механическими свойствами.

Разработанный способ электролитно-плазменного поверхностного упрочнения защищен патентами Республики Казахстан на полезную модель «Способ закалки стальных изделий» (полезная модель №4891 от 28.04.2020г.) и «Установка для плазменного поверхностного упрочнения деталей из стали и чугуна» (№5354 от 04.09.2020г.). Полученные результаты исследования могут быть полезны при выборе видов и режимов поверхностных термических обработок деталей из конструкционных сталей.

#### **6. Личный вклад**

Личный вклад автора состоит в проведении эксперимента по электролитно-плазменному поверхностному упрочнению, анализе литературных данных, в проведении электронно-микроскопических, рентгеноструктурных исследований, в проведении работ по определению твердости, износостойкости сталей, а также статистической обработке результатов. Постановка задачи, анализ полученных

результатов и формулировка основных выводов были проведены совместно с научными консультантами.

### 7. Замечания, предложения по диссертации

В ходе реализации поставленных задач в диссертационной работе соискатель Сатбаева З.А. проявила себя как высококвалифицированный и инициативный специалист, способный ставить и решать сложные научные задачи. Высокий профессиональный уровень позволил ему использовать в исследованиях современное исследовательское и производственное оборудование.

Главы диссертации спроектированы, логически взаимосвязаны и имеют внутреннее единство. Работа выполнена с соблюдением принципа академической честности.

Сатбаевой З.А. регулярно представлял основные результаты диссертации на семинарах кафедры «Физика и технологии» и научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология» ВКУ имени Сарсена Аманжолова и на онлайн-семинарах PhD-докторантов региональных университетов (руководитель – Скаков М.К.).

Результаты диссертационной работы Сатбаевой З.А. доложены на 4 международных научных конференциях. Она является соавтором 14 научных публикаций по теме диссертации, из них 4 статей в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 3 статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования МП РК, 2 патента на полезную модель Республики Казахстан, а также 1 монография в соавторстве.

Я убежден, что объём, уровень выполнения, точность, научно-практическая значимость и достоверность результатов, достигнутых соискателем Сатбаевой З.А., соответствуют всем требованиям, предъявляемым Комитетом по обеспечению качества в сфере образования МП РК к PhD-диссертационным работам.

С учетом вышеизложенного, считаю, что соискатель Сатбаева Зарина Аскарбековна, несомненно, заслуживает присуждения искомой степени доктора философии (PhD) по специальности 6D060400 – «Физика» и рекомендуется к защите.

Отечественный научный консультант,  
доктор физико-математических наук,  
профессор



Кылышканов М.К.

*Подпись Кылышканова М.К.  
заверю: спец-т по персоналу 428  
Т.А. Зирнакова Т. Түрма*