

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИФХЭ РАН
член-корреспондент РАН



А.К. Буряк

» декабря 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу *Кутукова Антона Константиновича* на тему «**Упрочнение конструкционных сталей импульсным потоком плазмы и лазерным наклепом**», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение.

Актуальность темы диссертации

Процессы, разрушающие материал, как правило, зарождаются на поверхности. В связи с этим применяются различные методы ионно-плазменно-лучевого модифицирования, приводящие к существенному изменению свойств исходного материала, позволяя создавать поверхностные структуры с новыми уникальными свойствами. Диссертантом были выбраны два метода обработки поверхности: импульсный поток плазмы (ИПП) и лазерный наклеп (ЛН).

Содержание работы и научная новизна

В работе проведен подробный анализ литературы по теме диссертации, в которой рассмотрены основные методы улучшения эксплуатационных характеристик материалов и указаны их достоинства и недостатки. Сделан вывод о целесообразности продолжения работ по оптимизации методов ИПП и ЛН. Обоснован выбор конструкционных сталей (низкоуглеродистые, среднеуглеродистые, высокоуглеродистые), описаны экспериментальные установки для обработки ИПП и ЛН, дано описание методик определения толщины модифицированного слоя, микротвердости, шероховатости, остаточных напряжений и фазового состава. Топография поверхности изучалась методами оптической и растровой электронной микроскопии. Элементный состав определялся методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

В случае обработки ИПП основными регулируемыми параметрами метода являлись: плотность поглощенной энергии или тепловая нагрузка (Q); плазмообразующий газ; количество импульсов при обработке (N); длительность плазменного воздействия на материал (τ); расстояние от образца до электродов

ускорителя. Для исследования характеристик модифицированного слоя были выбраны 11 марок конструкционных сталей.

В результате исследований были выявлены 3 режима обработки для двух плазмообразующих газов He и N₂: 1) $Q < 35$ Дж/см² – без видимой модификации; 2) $Q = 35–50$ Дж/см² – закалка из твердой фазы; 3) $Q > 50$ Дж/см² закалка из расплава.

Установлено повышение микротвердости для всех исследованных сталей с возрастанием тепловой нагрузки. При достижении порога плавления значения микротвердости выходили на плато.

Показано, что до порога плавления сталей наблюдалось незначительное сглаживание поверхности, а при плавлении формировался рельеф с экспоненциальным ростом шероховатости при увеличении Q .

Выявлено, что толщина модифицированного слоя сталей зависела от Q , τ и N , а также от марки стали. Наибольшая толщина модифицированного слоя – 120 мкм была достигнута при $Q \sim 80$ Дж/см² и $\tau = 1$ мс.

Сделан вывод, что режим № 2 позволяет получать модифицированные слои как с повышенной микротвердостью, так и со сжимающими напряжениями, что является предпосылкой повышения износостойкости, коррозионной стойкости и усталостной прочности.

При обработке ЛН основным регулируемым параметром метода являлась плотность мощности излучения, которая варьировалась от 1 до 10 ГВт/см². В данном случае нагрев поверхности отсутствовал, а модификация происходила за счет механического воздействия – ударных волн, возникавших в процессе обработки. Для исследования были выбраны стали ШХ15 и 40ХН2МА.

В результате исследований было выявлено, что для каждой стали существует значение плотности мощности излучения (2 ГВт/см² для ШХ15, 6 ГВт/см² для 40ХН2МА), при которой в поверхностных слоях начинали формироваться сжимающие остаточные напряжения. При обработке с большей нагрузкой остаточные напряжения переходят в область растягивающих.

Показано, что обработка методом ЛН приводила к пластической деформации (вдавливанию) материала и наблюдалась прямая зависимость глубины вдавливания от плотности мощности излучения.

Установлено, что ЛН увеличивал микротвердость сталей, но не более, чем на 50 %. При этом повышенные значения микротвердости наблюдались на глубинах до 1 мм.

Практическая значимость

За последнее десятилетие в России активно развиваются научные направления, внедряющие альтернативные способы обработки материалов. Открытие в ГК «Росатом» комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в РФ», направленная на развитие лазерных и плазменных технологий является тому подтверждением.

Продемонстрированный автором инновационный способ упрочнения изделий методами ИПП и ЛН по уровню улучшаемых характеристик материалов сопоставим с существующими методами обработки поверхности, внедренных в

промышленность (традиционная закалка, химико-термическая обработка, дробеструйная обработка и т.д.). Практическая значимость работы подтверждается пробными экспериментами с применением ИПП и ЛН для упрочнения стальных изделий (бурильные замки, термopарные чехлы, пуансоны пресс-оснастки), что привело к значительному повышению срока их эксплуатации.

Положительные результаты обработки подтверждают целесообразность внедрения технологии в различные отрасли промышленности. Рекомендуются продолжение работ в связке с ведущими заводами-изготовителями. Каждый из видов обработки может быть направлен на определенную отрасль. Поскольку обработка ИПП позволяет одновременно повышать микротвердость и одновременно уменьшать шероховатость с растягивающими остаточными напряжениями, а глубина закалочного слоя может достигать 120 мкм наиболее предпочтительной отраслью для внедрения технологии является нефтегазовый сектор (ПАО «Газпром», ПАО «Татнефть», ПАО «Сургутнефтегаз», ПАО «Лукойл» и др.). В данной отрасли изделия испытывают значительные механические нагрузки наряду с эксплуатацией в агрессивных средах. Среди изделий под обработку, помимо бурильных замков, следует расширить номенклатуру и рассмотреть трубы, детали турбин и теплообменников, корпуса насосов и компрессоров.

Метод ЛН, как было показано автором, позволяет увеличить микротвердость, а также значительно уменьшить растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое материалов. Известно, что уровень остаточных напряжений напрямую коррелирует с таким эксплуатационным свойством как усталостная прочность. Таким образом, в продолжении развития технологии ЛН рекомендуется обратить внимание на авиакосмическую отрасль, где наиболее важным аспектом является улучшение стойкости изделий к циклическим нагрузкам. В РФ к основным ведущим организациям авиакосмической отрасли относятся АО «Российская самолетостроительная корпорация „МиГ“», ПАО «Туполев», Холдинг «Вертолеты России», ПАО «ОДК-Сатурн». К изделиям, предпочтительным для обработки методом ЛН, следует отнести лопатки газотурбинных двигателей, втулки, валы.

Работы по направлению обработки поверхности концентрированными потоками энергии материалов ведется несколькими научными коллективами. С целью развития данных направлений по обработке ИПП рекомендуется организовывать коллаборации с командами А.М. Жукешова (КазНУ), П.С. Джумаева (НИЯУ «МИФИ»), В.А. Грибкова (ИМЕТ РАН). Касательно обработки ЛН особое внимание следует уделить командам А.В. Федина (Федеральное казенное предприятие «Государственный лазерный полигон «Радуга»), М.А. Ляховецкого (НИУ «МАИ») и И.А. Бакулина (СФ ФИАН).

Завершая вышесказанное, можно отметить актуальность темы диссертационной работы Кутукова А.К., в которой исследуется модифицирование поверхности сталей с помощью ИПП и ЛН.

Диссертационная работа Кутукова А.К. представляет собой целостную законченную научную работу, в которой поставлена актуальная научная цель и решены сложные научно-технические задачи. Диссертация охватывает основные

вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследований. Стил ь изложения диссертационной работы и автореферата отражает способность автора лаконично и аргументировано излагать свои мысли.

Замечания и вопросы по работе:

1. При элементном анализе образцов, обработанных импульсными потоками азотной плазмы, в поверхностном слое обнаруживается азот. Закономерным является вопрос о химическом составе такого поверхностного слоя и образующихся, по-видимому, нитридах.

2. Как меняются свойства поверхности металла от центра к внешнему краю области обработки ИПП и ЛН?

3. В автореферате на с. 5 написано: «По материалам работы опубликовано 15 работ, в том числе 7 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и 10 докладов в сборниках трудов научных конференций», а в диссертации на с. 9 – «По материалам работы опубликовано 15 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и 10 докладов в сборниках трудов научных конференций».

В действительности получается, что по материалам работы опубликовано 17 работ, в том числе 7 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ.

4. В диссертации на с. 18 дается ссылка на рисунок 1.3.1, а надо на рисунок 1.3.3.

5. На с. 42 (рисунок 2.2.7) оси абсцисс начинаются и заканчиваются нулями.

6. На с. 43 (рисунок 2.2.8) не указаны увеличения для фотографий.

7. На с. 64 дается ссылка на рисунок 3.1.9б., а надо на рисунок 3.3.1б.

8. На с. 72 написано: «Рисунок 3.4.7 – Зависимость толщины слоя закалки от длительности (а) и от количества (б) импульсов для Ст45 и 20Х соответственно». Не понятно, какая сталь имелась в виду.

Отмеченные замечания носят дискуссионный характер и не снижают высокой оценки диссертации, выполненной на хорошем научном и методическом уровне.

Заключение

Диссертация Кутукова Антона Константиновича содержит новые результаты, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения упрочнения сталей с помощью ИПП и ЛН.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, докладывались на 7 научно-технических конференциях, опубликованы в 17 печатных работах, в том числе 7 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Полученные экспериментальные данные по модифицированию сталей методами ИПП и ЛН могут быть полезны для решения конкретных производственных задач в различных отраслях промышленности.

Автореферат отражает содержание диссертации.

Диссертация Кутукова Антона Константиновича на тему «Упрочнение конструкционных сталей импульсным потоком плазмы и лазерным наклепом» представляет собой законченную научную работу. По тематике, актуальности, научной новизне, практической значимости и достоверности сформулированных выводов диссертация соответствует специальности 2.6.17 – *Материаловедение*, а её автор Кутуков Антон Константинович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв рассмотрен на заседании секции Ученого Совета ИФХЭ РАН «Химическое сопротивление материалов, защита металлов и других материалов от коррозии и окисления», протокол № 6 от 16 декабря 2024 года. На заседании присутствовало 23 члена секции из 31-го, а также 14 сотрудников Института. Результаты голосования: «за» – 23, «против» – 0, «воздержалось» – 0.

Научный руководитель направления «Химическое сопротивление материалов, защита металлов и других материалов от коррозии и окисления»,

д.х.н., профессор
Тел.: +7 (495) 334-85-90
Эл. почта: yukuzn@gmail.com

Ю.И. Кузнецов

Заместитель директора ИФХЭ РАН
по научной работе,
к.ф.-м.н.

Тел.: +7 (495) 955-46-38
Эл. почта: rinadz@mail.ru

Р.Х. Залавутдинов

Заведующий лабораторией Строения поверхностных слоев
ИФХЭ РАН,

к.х.н.
Тел.: +7-916-233-96-59
Эл. почта: grottopna@mail.ru

Н.А. Поляков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН)

119071, Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4

Тел. (+7 (495) 955 44 87

Е-mail: dir@phyche.ac.ru

<https://phyche.ac.ru>

Андрей Иванович Заваров



НАЧАЛЬНИК
ОТДЕЛА КАДРОВ
МЕДВЕДЕВА Е.С.