

УДК 621.791.015, 621.785.5

Петров П.Ю., кандидат технических наук, доцент

доцент кафедры технологии металлов

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Россия, г. Москва

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ
(МАТЕРИАЛОВ) МАШИНОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ**

Аннотация:

В статье представлен обзор публикаций последних лет об исследованиях применения луча (пучка) электронов для обработки поверхности. Электронно-лучевые технологии позволяют осуществлять обработку поверхностей деталей различной сложности, выполненных из различных сплавов.

В статье показано, что за последние 7 полных лет в России защищено 27 диссертаций по рассматриваемой тематике. Проведенный контент-анализ авторефератов этих диссертаций и отечественных научных статей показал, что способы обработки изделий (материалов) машиностроения электронным лучом могут быть классифицированы по трём признакам: по виду создаваемой атмосферы; по применению присадочного материала; по наличию сопутствующих способов воздействия на материал.

Ключевые слова: электронный пучок, изделие машиностроения, обработка поверхности, упрочнение, наплавка, напыление.

Pavel Petrov, Ph. D.,

Associate Professor of the metal technology department

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

Russia, Moscow

**RESEARCH OF SURFACE TREATMENT OF MECHANICAL
ENGINEERING PRODUCTS (MATERIALS) WITH AN ELECTRON
BEAM**

Abstract: The article presents a review of recent publications on research on the use of an electron beam for surface treatment of machine-building products. Electron-beam technologies allow processing of surfaces of parts of various complexity made of different alloys. The article shows that over the past 7 full years in Russia, 27 theses have been defended on the subject under consideration. The content analysis of scientific publications has shown that the methods of electron beam processing can be classified according to three characteristics: 1) by the type of atmosphere created; 2) on the use of the additive material; 3) on the presence of accompanying methods of influence on the material.

Key words: electron beam, mechanical engineering product, surface treatment, hardening, surfacing, spraying.

Введение. Улучшение эксплуатационных характеристик деталей машиностроения, работающих в условиях повышенного износа поверхностей, является важной народнохозяйственной задачей. Для упрочнения поверхностей таких деталей применяются различные способы их обработки, в том числе основанные на использовании концентрированных источников энергии, например, электронных пучков. Традиционно пучок электронов со значительной кинетической энергией рассматривается как уникальный «инструмент» воздействия на материал в различных технологических процессах при изготовлении (ремонте) деталей из разнообразных металлов и сплавов. Вместе с тем, следует признать, что не всегда электронно-лучевые технологии упоминаются как способ придания поверхностям деталей машиностроения заданных свойств: коррозионной стойкости, износостойкости и т.д. (см., например, [1]). Отметим, что один и тот же физический объект (однонаправленное движение группы электронов за пределами тел) обозначается по-разному: в изданиях представителей академической науки – как «пучок электронов», а в публикациях представителей прикладной науки и производства - как «электронный луч». В дальнейшем они используются как синонимичные понятия.

Как известно, «о практическом применении электронных лучей для сварки впервые сообщил К.Х. Штейгервальд в 1950 г. О своих исследованиях электронно-лучевой сварки Франция, США и СССР сообщили в 1957 - 1958 гг.» [2, с.102]. С этого момента в нашей стране проводятся многочисленные исследования, разрабатываются разнообразные способы и технологические процессы использования электронного луча для сварки, наплавки и упрочнения, издаются множество научных и учебных публикаций о сущности и применении электронно-лучевых технологий в машиностроении.

Технологические процессы с использованием электронного луча, являются одними из самых массовых по применению на практике в машиностроении. В работе [3] приведены результаты контент-анализа научных статей, опубликованных в журнале «Сварочное производство» за шесть полных лет с 2012 по 2017 год, в которой, в частности, отмечается: «...доминирующим объектом исследования является дуговая сварка в различных ее видах, а следующим по актуальности – является наплавка, в том числе и дуговыми способами. Далее по степени одинаковости встречаемости идут лазерная сварка (27 статей), электронно-лучевая сварка (25 статей) и диффузионная сварка (22 статьи)» [3, с.112]. Разбивка по годам такая [3, с.112]: в 2012 году опубликовано 5 статей (всего 79 статей во всех 12 номерах), в 2013 г. – 2 (81), в 2014 г. – 5 (79), в 2015 г. – 5 (85), в 2016 г. – 8 (91), в 2017 г. – 2 (81).

«Электронный луч – наиболее эффективный источник нагрева металла при сварке, поскольку плотность энергии в луче не более, чем на два порядка превосходит плотность энергии электрической сварочной дуги» [4, с.89]. «При нагреве электронным лучом за очень короткий промежуток времени в пятне могут быть получены весьма высокие температуры. Расчет показывает, что в слое металла, подвергающегося электронной бомбардировке при толщине слоя, равного пробегу электрона, в течение 1 с

должна была бы устанавливаться температура порядка $10^7 - 10^8$ °С. В реальных условиях такие температуры в металле, подвергнутом электронной бомбардировке, существовать не могут вследствие испарения металла на поверхности, на что расходуется значительная часть энергии и интенсивного перемешивания расплавленного металла газами и парами, выделяющимися при нагревании» [4, с.90].

Наличие уникальных физических свойств электронного пучка позволяет осуществлять прецизионное управление таким пучком для формирования зоны нагрева поверхности практически любой сложности со значительной разницей концентрации нагрева в различных местах этой зоны. Это дает возможность применения множества схем электронно-лучевых способов и методик не только для электронно-лучевой сварки и резки, но и теплового воздействия на поверхность обрабатываемого изделия. Основными объектами такого воздействия являются изделия машиностроения практически любой формы, выполненные из различных металлов и сплавов. Вместе с тем электронно-лучевые технологии применяются также для формирования заданных структуры и свойств поверхности других материалов. Так, в 2012 году была защищена диссертация «Повышение износостойкости сверхвысокомолекулярного полиэтилена ионной имплантацией $AlVx+$, $N+$ и облучением электронным пучком» (Тиннакорн П.), а в 2015 г. – «Исследование воздействия низкоэнтальпийной электронно-пучковой плазмы на древесину и ее компоненты» (Матонина Н.А.).

В изучении научных публикаций по данной тематике следует указать на одну проблему используемого понятийного аппарата. При описании воздействия пучка электронов на металлическое изделие (образец) применяются различные термины: «обработка», «упрочнение», «наплавка», «напыление». Рассмотрим определение этих терминов. Обработка – процесс целенаправленного воздействия на определенный объект (например, «обработка массового сознания» или «обработка добытой руды») для при-

дания ему желаемых, запланированных свойств. Следовательно, любой процесс можно назвать обработкой, если известна цель такого воздействия. В отношении второго термина, в ГОСТ 18295-72 «Обработка упрочняющая. Термины и определения» приводится такое определение: «Упрочнение – повышение сопротивляемости материала или заготовки разрушению или остаточной деформации» (термин 1). Вовсе не обязательно, что при воздействии электронного луча на изделие будет получен такой эффект, поэтому как обобщающий термин любого воздействия на материал слово «упрочнение» использовать не корректно. В ГОСТ 2601-84 «Сварка металлов. Термины и определения основных понятий» (с изменениями) приводится такое определение: «Наплавка – нанесение посредством сварки плавлением слоя металла на поверхность изделия» (термин б). Термин «напыление» в действующих нормативных документах не определен, известно определение одного из его видов, в ГОСТ 28076-89 «Газотермическое напыление. Термины и определения» указано: «Газотермическое напыление – получение покрытия из нагретых и ускоренных частиц напыляемого материала с применением высокотемпературной газовой струи, при соударении которых с основой или напыленным материалом происходит их соединение за счет сварки, адгезии и механического сцепления» (термин 1). Процесс воздействия на поверхность материала без присадочного материала отдельным термином не описывается, поэтому любое воздействие пучка электронов на образец и воздействие без присадочного материала называется просто обработкой. Следовательно, одним словом («обработка») обозначается как любое преднамеренное воздействие на изделие (образец), так и такое воздействие без присадочного материала. Для их различения второй вид обработки будем называть: «обработка без применения присадочного материала» (далее - ОБПМ).

«Электронно-лучевой обработкой называют группу способов микрообработки поверхности материалов, при которых в технологических целях

используются термическое или нетермическое воздействия электронного пучка на материал. При термической обработке в результате плавления и испарения происходит унос материала из зоны действия пучка и термические превращения материала. При нетермической обработке используются химические или физические превращения материала при воздействии на него электронного пучка. В обоих случаях цель обработки заключается в изменении формы и конфигурации структуры заготовки; эта цель достигается соответствующим управлением воздействием пучка на заготовку в пространстве и во времени» [5, с.355].

Рассматриваемая тематика находит широкое отражение в публикациях, издаваемых в зарубежных странах, и в России. Так, в международной библиографической базе данных научных статей и изданий Scopus за последних семь полных лет (2012-2018 гг.) по поисковому запросу «*surface treatment electron-beam*» («обработка поверхности электронным лучом») предлагается список, включающий 1103 публикаций, по поисковому запросу «*surface hardened electron-beam*» («упрочнение поверхности электронным лучом») - 43 публикации, по поисковому запросу «*electron-beam surfacing*» («электронно-лучевая наплавка») – 44 публикаций, по поисковому запросу «*electron-beam sputtering*» («электронно-лучевое напыление») – 508 публикаций. Такое количество публикаций свидетельствует о важности для мирового научного сообщества анализа процессов, протекающих при использовании электронно-лучевых способов для поверхностной обработки различных материалов.

Изучению использования электронно-лучевых способов обработки поверхности изделий машиностроения посвящено множество публикаций на русском языке, причём количество их постоянно растёт. К примеру, в последнее десятилетие прошлого века по этой тематике было защищено 7 диссертаций: Децик В.Н., 1991 год защиты (далее – г.з.); Шевцов Ю.О., 1994 г.з.; Ротштейн В.П., 1995 г.з.; Кащенко А.П., 1996 г.з.; Кылышканов

М.К., 1998 г.з.; Дураков В.Г., 1999 г.з.; Кровяков К.С., 2000 г.з. А в первое десятилетие этого века - уже 18 диссертаций: Сарычев В.Д., 2002 г.з.; Губарьков Д.В., 2003 г.з.; Сизов И.Г., 2003 г.з.; Дампилон Б.В., 2003 г.з.; Пайкин А.Г., 2004 г.з.; Панталеенко Я.В., 2004 г.з.; Токарев А.О., 2004 г.з.; Белов А.Б., 2005 г.з.; Голковский М.Г., 2007 г.з.; Коваленко И.А., 2007 г.з.; Крюкова О.Н., 2007 г.з.; Перовская М.В., 2007 г.з.; Батаева Е.А., 2007 г.з.; Целлермаер И.Б., 2007 г.з.; Колесникова К.А., 2008 г.з.; Гнюсов К.С., 2009 г.з.; Иванова Е.А., 2009 г.з.; Крайников А.В., 2009 г.з.; Ионина А.В., 2010 г.з. В нынешнем десятилетии таких диссертаций защищено ещё больше, условно можно сказать: от десятилетия к десятилетию происходит удвоение защищаемых диссертаций по упрочнению поверхностей с применением электронных пучков.

В приведенных здесь и многих других научных публикациях описываются различные способы и технологические схемы обработки рабочих поверхностей деталей машиностроения с применением энергии электронного пучка. Обобщение и систематизация информации об этих способах для выделения общих закономерностей их применения в различных условиях является актуальной задачей развития теории и практики электронно-лучевой обработки изделий (материалов) машиностроения.

Объектами исследования являются научные публикации последних лет об электронно-лучевом упрочнении поверхностей деталей, изготовленных из различных металлов и сплавов, в том числе диссертации, защищённые в России, и статьи, опубликованные в отечественных изданиях. Отметим, что эта статья написана летом 2019 года, поэтому исследуются публикации, изданные до этого времени.

Целью статьи является определение общих тенденций и объектов научных исследований при изучении научных публикаций об исследованиях поверхностной обработки изделий (материалов) машиностроения электронным лучом.

1. Анализ диссертаций, защищённых с 2012 года.

Сведения о диссертациях, защищённых в нашей стране размещены на сайте Высшей аттестационной комиссии РФ (<https://vak.minobrnauki.gov.ru>). На этом сайте приведена информация о защищенных диссертациях, начиная с 2012 года, и выложены для свободного доступа авторефераты этих диссертаций. Далее приведен контент-анализ, результаты которого можно отнести к библиографическим или содержательным сведениям об этих диссертационных исследованиях.

Библиографический анализ защищённых в последние годы диссертаций проводился по таким параметрам анализа как: количественно-временное распределение по годам, специальность защиты, учёная степень и место защиты. Анализ показал следующее: за семь полных лет (2012 – 2018 гг.) по применению электронно-лучевых технологий для поверхностной обработки было защищено 27 диссертаций, а именно: 4 диссертации в 2012 г., 4 – в 2013 г., 4 – в 2014 г., 5 – в 2015 г., 5 – в 2016 г., 2 – в 2017 г., 3 – в 2018 г. Ежегодная защита диссертаций по рассматриваемой тематике свидетельствует о народнохозяйственной важности и непрерывности таких исследований.

По специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния защищено 13 диссертаций, 05.16.09 - Материаловедение (в машиностроении) – 11, 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов – 2, 05.02.07 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки – 1. Список этих специальностей свидетельствует о том, что научное сообщество в отношении электронно-лучевой обработки материалов, рассматривает следующие объекты исследования: изменение физических свойств металлов (сплавов) при различных внешних воздействиях; фундаментальные закономерности влияния состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и других факторов на свойства материалов; связи между химическим составом, кристаллической

структурой, структурным состоянием и свойствами металлов и сплавов; закономерности и взаимосвязи в технологических процессах формообразования тел (деталей) в технических средствах реализации процессов на этапах их создания и эксплуатации. Цель практического использования электронно-лучевых технологий для конкретного изделия вынесено в название только одной работы: «Повышение режущих свойств твёрдосплавного инструмента на основе комплексного модифицирования его поверхности электронно-лучевым легированием сплавом $NbHfTi$ и нанесением износостойкого покрытия $(TiAl)N$ » (Йе Мин Со, 2015 г.з., специальность 05.02.07).

Ни одна диссертация по рассматриваемой тематике в исследуемый период не защищена по специальности 05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии, но вполне могли быть защищены по этой специальности. Нет оснований для утверждения, что изучаемая тематика не находится в сфере научных интересов учёных-сварщиков, но в силу некоторых причин она не рассматривается ими в качестве диссертационной.

Практически все диссертации защищены в сфере технических наук и только одна диссертация защищена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (Бородовицина О.М., 2018 г.з.). Три диссертации были защищены на соискание ученой степени доктора наук (Иванцовский В.В., 2012г.з.; Воробьев С.В., 2016г.з.; Райков С.В., 2017 г.з.).

В Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего (профессионального) образования (далее - ФГБОУ В(П)О) «Сибирский государственный индустриальный университет» (г. Новокузнецк) выполнено 12 работ, в ФГБОУ В(П)О «Новосибирский государственный технический университет – 8, в ФГБОУ В(П)О «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» – 3, в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования (далее – ФГАОУ ВО) «Национальный исследова-

тельский технологический университет «МИСиС» – 2, Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук – 2. По одной диссертации было подготовлено в следующих организациях: ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского», ФГБОУ ВПО Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». Три диссертации (Гришунин В.А., 2014 г.з.; Бородовицина О.М., 2018 г.з.; Кормышев В.Е, 2018 г.з.) были выполнены в двух организациях. Несложно видеть, что научный потенциал по проведению диссертационных работ по поверхностному упрочнению электронным пучком сосредоточен в основном в Сибири, точнее в городах Новосибирск, Томск и Новокузнецк, которые расположены в относительной близости друг от друга.

Содержательный анализ авторефератов диссертаций проводился в отношении таких параметров анализа: цель научных исследований, технологические особенности электронно-лучевой обработки, обрабатываемые изделия и материалы, используемое оборудование, изученные эффекты применения этой обработки и установленные закономерности.

Наиболее часто (9 диссертаций) целью диссертационных исследований соискатели учёных степеней ставили изучение структуры (фазового состава, дефектной субструктуры) обрабатываемой поверхности; в шести диссертациях цель определена как повышение износостойкости; в пяти – изучение / повышение механических свойств; в двух – повышение усталостной прочности / выносливости; в двух – установление / анализ трибологических свойств. Другие цели исследований встречаются единожды: изучение механизмов изнашивания; разработка математических моделей физических процессов; повышение микротвердости; управление структурным и напряженным состоянием; увеличение производительности смен-

ных многогранных пластин (заметим, что производительность является характеристикой определённой деятельности, а не изделия); повышения стойкости (без уточнения вида); разработка составов и способа наплавки; разработка способов применения капельной фазы при импульсно-лазерном и электронно-лучевом напылении; повышение эксплуатационных свойств сталей и сплавов при обработке поверхности импульсными плазменными струями, электронными пучками и электродуговой наплавке; формирование электроэрозионностойких покрытий. Как видим, цели диссертационных исследований в равной степени носят академический и прикладной характер.

В 8 авторефератах диссертаций непосредственно указано, что обработка поверхности проводилась без создания вакуума (Журавина Т.В., 2012 г.з.; Ващук Е.С., 2012 г.з.; Лосинская А.А., 2013 г.з.; Ленивцева О.Г., 2014 г.з.; Муль Д.О., 2015 г.з.; Руктуев А.А., 2016 г.з.; Кривеженко Д.С., 2016 г.з.; Самойленко В.В., 2018 г.з.), 4 диссертаций содержат сведения об обработке изделий в вакуумных камерах (Маков Д.А., 2012 г.з.; Александрова С.С., 2015 г.з.; Игнатов А.А., 2015 г.з.; Гудимова Е.Ю., 2015 г.з.). Авторефераты остальных диссертаций чётких указаний на создание атмосферы обработки не содержат, но с высокой долей вероятности можно предполагать, что в этих случаях речь также идёт о традиционной, т.е. вакуумной обработке материалов. Следовательно, исследования по вневакуумной обработке материалов электронным пучком проводятся регулярно, но в общем объеме таких исследований составляет тридцать процентов.

В 11 авторефератах обозначено применение электронного пучка для обработки поверхности без присадочного материала (Иванцовский В.В., 2012 г.з.; Бессонов Д.А., 2013 г.з.; Соскова Н.А., 2013 г.з.; Бащенко Л.П., 2013 г.з.; Сизов В.В., 2014 г.з.; Гришунин В.А., 2014 г.з., Аксёнова К.В., 2016 г.з.; Воробьев С.В., 2016 г.з.; Райков С.В., 2017 г.з.; Бородовицина О.М., 2018 г.з.; Кормышев В.Е., 2018 г.з.), а в 16 – для наплавки или напы-

ления (Журавина Т.В., 2012 г.з.; Ващук Е.С., 2012 г.з.; Маков Д.А., 2012 г.з.; Лосинская А.А., 2013 г.з.; Олесюк О.В., 2014 г.з.; Ленивцева О.Г., 2014 г.з.; Ёе М.С., 2015 г.з.; Александрова С.С., 2015 г.з.; Игнатов А.А., 2015 г.з.; Гудимова Е.Ю., 2015 г.з.; Муль Д.О., 2015 г.з.; Кобзарева Т.Ю., 2016 г.з.; Руктуев А.А., 2016 г.з.; Кривеженко Д.С., 2016 г.з.; Соснин К.В., 2017 г.з.; Самойленко В.В., 2018 г.з.).

Сопоставляя эти списки, можно отнести каждую из описанных в диссертации технологий к одной из четырех групп, образованных сочетанием варьируемых признаков: вакуумная – вневакуумная обработка, с присадочным материалом – без присадочного материала. Несложно видеть, что в восьми диссертациях четко указано исследования вневакуумной наплавки / напыления, в четырех – наплавки в вакууме и ни в одной не указана среда осуществления ОБПМ. В отношении вневакуумных технологий результат полученного распределения диссертаций является несколько удивительным, поскольку организовать просто обработку поверхности электронным лучом технологически проще, чем обеспечивать внесение присадочного материала в зону воздействия пучка на поверхность материала. Остальные диссертации однозначно не относятся к одной из указанных четырех групп, однако, если вспомнить о предположении об исследовании вакуумных технологий в остальных диссертациях, то численность диссертаций в двух «вакуумных» группах возрастает: вакуумная ОБПМ – 11 диссертаций, вакуумная наплавка – 8.

Сформированный пучок электронов является достаточно удобным «инструментом» для сочетания его практически с любым видом сварки, в том числе полученное любым способом сварное соединение или наплавленное изделие может быть дополнительно обработано таким пучком. В 13 диссертациях (почти половина из изученных) указано о гибридном применении электронно-лучевых технологий совместно с другими, чаще всего изучалось применение электровзрывного легирования (далее – ЭВЛ) с по-

следующей электронно-пучковой обработкой (7 диссертаций: Вашук Е.С., 2012 г.з.; Соскова Н.А., 2013 г.з.; Башенко Л.П., 2013 г.з.; Олесюк О.В., 2014 г.з.; Кобзарева Т.Ю., 2016 г.з.; Соснин К.В., 2017 г.з.; Райков С.В., 2017 г.з.). В трёх диссертациях рассматривались уникальные сочетания: шлифование и поверхностная закалка с использованием высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты и концентрированного электронного пучка (Иванцовский В.В, 2012 г.з.); комбинированной обработки режущих пластин, на основе электронно-лучевого легирования сплавом $NbHfTi$ с последующим нанесением износостойкого вакуумно-дугового покрытия (Йе Мин Со, 2015 г.з.); электродуговая наплавка порошковыми ($Fe-C-Nb-Cr-W$) и ($Fe-C-Ni-B$) проволоками с последующей электронно-пучковой обработкой (Кормышев В.Е., 2018 г.з.). Вполне возможно, что «гибридное» использование электронных пучков станет одним из важных направлений развития электронно-лучевых технологий.

Далее приведем сведения об изучаемых материалах и изделиях из них.

Важной информацией, характеризующей объект диссертационных исследований являются сведения о материале, который обрабатывался при использовании электронного пучка. Во всех 27-ми изученных диссертациях указан обрабатываемый материал, причем в некоторых и не один. Основными объектами диссертационных исследований являются стали (16 диссертациях), в том числе в 11 диссертациях углеродистые стали (стали 20, 45, 60, рельсовая сталь Э76Ф, сталь Хардокс 450), в 6 – легированные стали (стали 08X18H10T, 20X13, 20X23H18, 29HK, 40X), а также титан BT 1-0 (9 диссертаций) и титановые сплавы BT6 и BT14 (4 диссертации). В двух диссертациях исследуется электронно-лучевая обработка алюминиевых сплавов (АМц, АК12), а также по одной – меди М02, алюминия А99, никелевого сплава НП2 и твердых сплавов группы ВК (BK8, H13A). Следовательно, изучение физических процессов и исследование структуры

приповерхностных слоев изделий (образцов) из стали и титана является основной целью диссертационных работ.

Сопоставление изучаемого материала и вида электронно-лучевой обработки позволяет сделать вывод об отсутствии связи между наличием/отсутствием вакуума и видом обрабатываемого материала: в 4 диссертациях описывается обработка титановых сплавов без создания вакуума и в одной – с созданием вакуума, в 4 – обработка стали без создания вакуума и в 4 – с созданием. Также не прослеживается взаимосвязь между видом обработки по присадочному материалу (с наличием и без) и видом обрабатываемого металла (сплава): наплавка / напыление титана рассматривается в 7 диссертациях, а его обработка без присадочного материала – в 4, наплавка стали – в 8, а ОБПМ – в 6.

Теперь покажем какие материалы наплавлялись / напылялись, а какие обрабатывались без присадочного материала. Как уже было отмечено в 16 диссертациях рассматривалась электронно-лучевая обработка с применением присадочного материала, однако следует уточнить, что в диссертациях описываются две схемы: 1) присадочный материал наносится без применения электронного луча (например, ЭВЛ), а электронно-пучковая обработка используется как финишная операция; 2) нанесение присадочного материала осуществляется непосредственно с применением пучка электронов.

Диссертационные исследования наплавки / напыления по первой схеме (8 диссертаций) проводились в отношении следующих пар основного и присадочного материалов:

- электровзрывное боромеднение (порошковая навеска аморфного бора) углеродистой стали (сталь 45 в отожженном состоянии) и электронно-пучковой обработка в среде аргона рабочей камеры при давлении 0,02 Па (Ващук Е.С.);

- «Упрочнение титана BT1-0 комплексным электровзрывным легированием и последующей электронно-пучковой обработкой» (*название диссертации*), науглероживание поверхности при электровзрывном легировании осуществлялось совместно с порошковыми навесками соединений с высокими физико-механическими свойствами, а именно, диборида титана TiB_2 , карбида кремния SiC и оксида циркония ZrO_2 (Соскова Н.А.);

- «Упрочнение поверхности титана при электровзрывном науглероживании и карбоборировании и последующей электронно-пучковой обработке» (*название диссертации*), при карбоборировании технически чистого титана марки BT1-0 в область взрыва вводили порошковую навеску аморфного бора марки В (Бащенко Л.П.);

- электровзрывное напыление алюминия марки А99, стали 45, меди марки М00 (подложка) износостойких и электроэрозионностойких покрытий систем TiB_2-Al , $TiC-Mo$, $W-Cu$, $Mo-Cu$, $W-C-Cu$, $Mo-C-Cu$ и TiB_2-Cu и последующая электронно-пучковая обработка (Олесюк О.В.);

- «Упрочнение титанового сплава BT6 электровзрывным легированием и последующей электронно-пучковой обработкой» (*название диссертации*) (Кобзарева Т.Ю.);

- электровзрывное легирование технически чистого титана BT1-0 иттрием и электронно-пучковая обработка (Соснин К.В.);

- электровзрывное легирование сплава BT1-0 порошковыми навесками соединений, обладающих высокими физико-механическими свойствами, а именно диборида титана TiB_2 , карбида кремния SiC и оксида циркония ZrO_2 , и электронно-пучковая обработка (Райков С.В.);

- электродуговая наплавка стали Хардокс 450 порошковыми ($Fe-C-Nb-Cr-W$) и ($Fe-C-Ni-B$) проволоками с последующей электронно-пучковой обработкой (Кормышев В.Е.).

ЭВЛ, как видим, является основным способом обработки материала перед применением электронно-пучковой обработки, при этом изучалось

нанесение покрытий как на сталь, так и на цветные металлы, прежде всего технически чистый титан.

Исследования наплавки / напыления по второй схеме (12 диссертаций) проводились для следующих материалов:

- вневакуумная электронно-лучевая наплавка титан-танталовой порошковой смеси на титановые пластины (титан ВТ 1-0), которая позволяет наплавлять слои толщиной более 2 мм без видимых макродефектов (Журавина Т.В.);

- вакуумная электронно-лучевая наплавки износостойких покрытий с мультимодальным распределением упрочняющей фазы (композиционный наплавочный материал на основе легированной Mo и V аустенитной стали, содержащий 15 вес. % WC) на стальную основу (аустенитная сталь) и термическая обработка (Маков Д.А.);

- вневакуумная электронно-лучевая наплавка углеродсодержащих порошковых смесей (порошки терморасширенного графита марки ГЛ1 и углеродсодержащего термообработанного материала марки МГ (0-2)) на низкоуглеродистую конструкционную сталь 20 (Лосинская А.А.);

- «Поверхностное упрочнение титановых сплавов карбидными частицами с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки» (*название диссертации*), основной материал: технически чистый титан ВТ1-0, присадочный материал: порошки карбидов NbC и TiC , а также смеси порошков титана и ниобия с графитом – $(Ti + C)$ и $(Ti + Nb + C)$ (Ленивцева О.Г.);

- электронно-лучевое легирование пластин ВК8, Н13А сплавом $Nb_{70}Hf_{22}Ti_8$ с последующим нанесением износостойкого вакуумно-дугового покрытия $(TiAl)N$ (Йе Мин Со);

- электронно-лучевое напыление, в качестве напыляемых оксидов использовали следующие материалы: ZrO_2 , $ZrO_2 + 25\% Y_2O_3$, $HfO_2 + 20\%$

Y_2O_3 , CeO_2 , $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3 + 27\% HfO_2$, материал подложек – 29НК, НП-2, АМц (Александрова С.С.);

- «Наплавку проводили на пластины размером 30×250 мм, изготовленных из стали 20 (толщина основного металла - подложки изменялась от 5 до 40 мм). Число проходов электронного луча было равно 4. Для наплавки использовались промышленный порошок быстрорежущей стали 10P6M5 и композиционный порошок «сталь 10P6M5 + 20 вес.% WC» дисперсностью 50...350 мкм» (*из текста автореферата диссертации*), осуществлялась многопроходная вакуумная электронно-лучевая наплавка (Игнатов А.А.);

- электронно-пучковое плавление или легирование танталом поверхности образцов TiNi низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком в условиях высокого вакуума (Гудимова Е.Ю.);

- «Поверхностное упрочнение среднеуглеродистой хромистой стали с использованием вневакуумной электронно-лучевой наплавки смесей порошковых карбидообразующих материалов» (*название диссертации*), наплавочную смесь карбидообразующих элементов (порошки титана, тантала, молибдена, ванадия), графита, флюса и смачивающей компоненты наносили на поверхности пластин из стали 40X (Муль Д.О.);

- «Повышение коррозионной стойкости сплава ВТ1-0 с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков тантала и ниобия» (*название диссертации*) (Руктуев А.А.);

- вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковых смесей « B_4C-Fe » и « $B_4C-Ti-Fe$ » на толстолистовые стальные заготовки из стали 20 и стали 40X (Кривеженко Д.С.);

- вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковых смесей металлических порошков тантала и циркония в различном соотношении, а также флюса (CaF_2 и LiF) на технически чистый титан марки ВТ1-0 и титановый сплав ВТ14 (Самойленко В.В.).

Основными материалами, на которые осуществляется электронно-лучевое напыление / наплавка являются опять же сталь и технически чистый титан.

Обработка без присадочного материала исследовалась в отношении следующих материалов:

- электронно-лучевой нагрев поверхностно-упрочненных углеродистых сталей (сталь 60, сталь У8) (Иванцовский В.В.);

- электронно-пучковая обработка стали 20Х13 (Бессонов Д.А.);

- нержавеющая сталь 20Х23Н18, подвергнутая электронно-пучковой обработке (Сизов В.В.);

- «Повышение усталостной долговечности рельсовой стали электронно-пучковой обработкой» (*название диссертации*), в качестве материала исследования использовалась рельсовая сталь Э76Ф (Гришунин В.А.);

- промышленный *Al-Si* сплав АК12 (силумин эвтектического состава) (Аксёнова К.В.);

- нержавеющие стали различных структурных классов: 08Х18Н10Т, 20Х13, 20Х23Н18 (Воробьев С.В.);

- образцы технического титана ВТ1-0, подвергнутые предварительной электронно-пучковой обработке и водородному насыщению (Бородовицина О.М.).

За исключением двух диссертаций, в которых рассмотрена ОБПМ титана и силумина, во всех остальных, из последнего списка, - изучается обработка различных классов сталей.

В нескольких диссертациях представлены варианты применения разработанных способов (технологий) для обработки поверхности конкретных изделий. Как было отмечено, Йе Мин Со в названии своей диссертации указывает применение электронно-лучевых технологий для конкретных изделий, которыми являются твердосплавный инструмент - сменные многогранные пластины и цельные сверла из твердых сплавов группы ВК

микролегированные сплавом $Nb_{70}Hf_{22}Ti_8$. Также в нескольких диссертациях описано применение электронно-лучевой обработки следующих изделий:

- зубья каменноугольной барабанной дробилки ТЭЦ, выполненных из аустенитной или низкоуглеродистой стали упрочненные наплавкой в вакууме с использованием композиционной порошковой шихты ($Fe - 0,9\% C - 20\% Ni$ или $Mn - 4\% V - 4\% Mo$) + $10\% TiC$ или $15\% WC$ (Маков Д.А.);

- втулки сеялки СПЗ-3,6; винты, входящих в конструкцию станка для намотки щеток; детали установок горизонтального бурения из низкоуглеродистой конструкционной стали 20 наплавленные в вакууме порошками терморасширенного графита марки ГЛ1 (ГОСТ 5279-74) и углеродсодержащего термообработанного материала марки МГ (0-2) (ТУ 1914-00194042-026-01) (Лосинская А.А.);

- электрические коммутирующие контакты силовых контроллеров КС-304, КС-305; контакты пускателей марок ПВИ и ПВ; внутренние поверхности защитных втулок упрочненных электровзрывным напылением и последующей электронно-пучковой обработкой (Олесюк О.В.);

- пластины роторно-пластинчатого насоса ПН-50 из технического чистого титана ВТ1-0, упрочненные наплавкой вне вакуума с использованием порошков карбидов NbC и TiC , а также смеси порошков титана и ниобия с графитом – $(Ti + C)$ и $(Ti + Nb + C)$ (Ленивцева О.Г.);

- трубы малого диаметра материалов 29НК, НП-2, АМц, на которые в вакууме напылялись следующие оксиды: ZrO_2 , $ZrO_2 + 25\% Y_2O_3$, $HfO_2 + 20\% Y_2O_3$, CeO_2 , $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3 + 27\% HfO_2$ (Александрова С.С.);

- опорные шейки валов-шестерен высоконагруженных редукторов из стали 20 наплавленных в вакууме покрытиями на основе стали 10P6M5 (Игнатов А.А.);

- стрелчатые лапы культиватора из среднеуглеродистой хромистой стали марки 40X наплавленными с использованием энергии электронного

пучка, выведенного в воздушную атмосферу с использованием порошковых смесей титана, молибдена, тантала, ванадия и графита (Муль Д.О.);

- особо коррозионностойкие реакторы химических производств; узлы роторно-пластинчатых насосов для перекачки агрессивных сред из титана ВТ1-0 методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей, содержащих тантал и ниобий (Руктуев А.А.);

- ковши большегрузных экскаваторов; лопатки запорной арматуры; плунжеры насоса из титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ6 упрочненных электронно-лучевой науглероживанием с порошковыми навесками различных веществ и последующей электронно-пучковой обработкой (Райков С.В.);

- кузова большегрузных автомобилей; ковши экскаваторов, изготавливаемых из стали Хардокс 450, модифицированных электронно-пучковой обработкой порошковыми ($Fe-C-Nb-Cr-W$) и ($Fe-C-Ni-B$) проволоками (Кормышев В.Е.);

- особо коррозионностойкие реакторы химических производств из технически чистого титана марки ВТ1-0 и титанового сплава ВТ14 вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых тантал-циркониевых смесей на титановые сплавы, а также флюса (CaF_2 и LiF) (Самойленко В.В.).

Как видим, 12 диссертаций посвящены разработке технологий повышения эксплуатационных, прочностных свойств поверхности изделий, работающих в особых условиях нагружения и/или воздействия химических реагентов.

При проведении описанных исследований использовалась небольшая группа оборудования, точнее говоря, два основных:

1) установка «СОЛО», разработанная в Учреждении Российской академии наук Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (г. Томск), использовалась при проведении 14 диссертационных исследований, т.е. практически в половине исследуемых работ (Ващук Е.С.,

Бессонов Д.А., Соскова Н.А., Башенко Л.П., Сизов В.В., Олесюк О.В., Гудимова Е.Ю., Аксёнова К.В., Кобзарева Т.Ю., Воробьев С.В., Соснин К.В., Райков С.В., Бородовицина О.М., Кормышев В.Е.);

2) промышленный ускоритель электронов ЭЛВ-6 производства Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск) использовался при проведении 8 диссертационных исследований (Журавина Т.В., Иванцовский В.В., Лосинская А.А., Ленивецова О.Г., Муль Д.О., Руктуев А.А., Кривеженко Д.С., Самойленко В.В.)

В авторефератах двух диссертаций указано иное оборудование, а именно: установка генерации низкоэнергетического сильноточного электронного пучка «РИТМ-СП» (Йе Мин Со); электронно-лучевая установка “Оратория” с электронно-лучевой пушкой EGL-35-M (Александрова С.С.). В авторефератах остальных трёх диссертаций оборудование генерации электронного пучка не указано.

Во всех авторефератах показано изменение структуры (изменение размеров зерна, появление в обработанном слое определенных химических соединений и фаз) обычно в третьей главе и физических свойств обрабатываемых материалов (в основном повышение показателей прочности) обычно в четвертой главе, что находит своё отражение в научной новизне и практической ценности защищаемой работы.

Таким образом, основными объектами исследования электронно-лучевых технологий являются изделия из стали или титановых сплавов изделий машиностроения, работающих в особых условиях нагружения / воздействия. В основном (20 диссертаций) изучалось поверхностное упрочнение изделий машиностроения с применением присадочных материалов (наплавка / напыление), как в вакууме, так и вне вакуума.

2. Анализ научных статей.

Как известно, диссертации содержат систематизированные, наиболее ценные результаты многолетних исследований, которые частично уже

представлены научному сообществу в отдельных статьях. Поэтому не сложно предположить, что, если диссертаций защищено десятки, то научных статей опубликовано сотни. Действительно, в Научной электронной библиотеке E-library (<https://elibrary.ru/>) на поисковый запрос «обработка электронным лучом / пучком» предлагается список из более чем трехсот статей в журналах, причём за последние полные 7 лет – 184 статьи, на поисковый запрос «упрочнение электронным лучом / пучком» - почти тридцать статей, за последние 7 лет – 14 статей, на поисковый запрос «наплавка электронным лучом / пучком» – 25 статей, за последние 7 лет – 21 статья, на поисковый запрос «напыление электронным лучом / пучком» – более пятидесяти статей, за последние 7 лет – 36 статей. Учитывая ограниченный объем статьи далее приведены ссылки только некоторые из этих статей.

Описанная ранее классификация использования электронно-лучевых способов обработки поверхностей изделий (в вакууме или вне вакуума, с присадочным материалом или без него) в полной мере относится к научным статьям. Вакуумным способам электронно-лучевой обработки поверхности изделий без применения присадочного материала посвящены значительная группа статей (например, [6, 7, 8]). Большого эффекта можно получить не только посредством воздействия на металл концентрированными потоками энергии, но и целенаправленным формированием химического состава за счет подачи присадочного материала в зону такой обработки в вакууме (см. [9, 10]). Исследуются также вневакуумные способы электронно-лучевой обработки поверхностей без присадочного материала (например, [11, 12]) и с присадочным материалом (например, [13, 14]).

Также встречаются публикации о гибридных технологиях применения электронного луча и иных способов воздействия на изделия [15, 16, 17].

Основными обрабатываемыми в исследованиях материалами машиностроения являются стали, титаны и алюминиевые сплавы.

Заключение

1. Способы поверхностной обработки изделий машиностроения с применением энергии электронных пучков являются достаточно распространенным объектом научных исследований как в нашей стране, так и за рубежом. Анализ отечественных научных публикаций (диссертаций и статей) позволяет классифицировать эти способы по следующим признакам: наличие присадочного материала, вида атмосферы и сопутствующего иного вида воздействия на поверхность изделия (материала) машиностроения.

2. Контент-анализ диссертаций, защищённых после 2012 года, показывает, что они выполнялись в основном с целью изучения структуры обрабатываемой поверхности и повышения эксплуатационных (прочностных) свойств. Обработка электронным пучком осуществлялась в вакууме (70,4%) или вне вакуума, с присадочным материалом (наплавка, напыление; 63,0% диссертаций) или без него. Небольшое количество диссертаций (25,9%) рассматривает гибридное применение электронно-лучевых способов обработки поверхности материалов. Основными объектами диссертационных исследований являются углеродистые и легированные стали, а также титан и титановые сплавы изделий энергетического, сельскохозяйственного, химического и транспортного машиностроения.

Использованные источники:

1. Евдокимов, В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов Учебное пособие-справочник / Под редакцией д. т. н., проф. В. Д. Евдокимова. – 2-е изд. – К.: ИД «Профессионал», 2006. – 352 с.

2. Зуев, И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. / И.В. Зуев. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – 162 с.

3. Петров, П.Ю. Контент-анализ научных исследований сварочных технологий / П.Ю. Петров // "Мировая наука". -2019.-№4 (25). - С. 552-571.

4. Николаев, Г.А. Специальные методы сварки. Учебное пособие для студентов вузов. / Николаев Г.А., Ольшанский Н.А. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 232 с., ил.

5. Шиллер, З. Электронно-лучевая технология / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер; Пер. с нем. В. П. Цишевского. – М.: Энергия, 1980. – 528 с.

6. Иванов Ю.Ф. Увеличение усталостной долговечности эвтектического силумина электронно-пучковой обработкой / Иванов Ю.Ф., Аксёнова К.В., Громов В.Е., Коновалов С.В., Петрикова Е.А. // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2016. № 2. С. 72-80.

7. Демидов, А.Н. Поверхностное упрочнение металла рабочих лопаток паровых турбин / Демидов А.Н., Каримбеков М.А., Марков Ф.В. // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2014. – № 3 (123). – С. 42-45.

8. Тимченко, Н.А. Влияние модификации поверхности сильноточным электронным пучком на кинетику структуры гидридных фаз в титане / Тимченко Н.А., Галимов Р.М., Кузнецов С.И. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2015. – № 3. – С. 45.

9. Дампилон, Б.В. Особенности структурообразования модифицированных зон в покрытии из хромованадиевого чугуна, полученных многоочечной импульсной электронно-лучевой обработкой / Дампилон Б.В., Дураков В.Г., Зиганшин А.И., Толстокулаков А.М. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56. № 7-2. – С. 216-220.

10. Милонов, А.С. Особенности формирования наноструктурированных боридных слоев на штамповую сталь X12МФ под воздействием интенсивных электронных пучков в вакууме / Милонов А.С., Данжеев Б.А., Смирнягина Н.Н. // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. – 2017. – № 2-3. – С. 30-35.

11. Иванов, И.В. Влияние удельной поверхностной энергии электронного пучка на толщину закаленного слоя при вневакуумной электронно-

лучевой обработке титанового сплава ОТ4 / Иванов И.В., Руденя Е.А. // Актуальные проблемы в машиностроении. 2018. Т. 5. № 3-4. С. 106-112.

12. Дробяз, Е.А. Поверхностное упрочнение стали 12Х18Н9Т частицами ТПС методом вневакуумной электронно-лучевой обработки / Дробяз Е.А., Бушуева Е.Г., Кузин Ф.А. // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2018. – Т. 5. № 3-4. – С. 131-136.

13. Полетика, И.М. Формирование структуры износостойких покрытий при электронно-лучевой наплавке карбидом вольфрама / Полетика И.М., Крылова Т.А., Тетюцкая М.В., Макаров С.А. // Сварочное производство. – 2012. – № 5. – С. 9-15.

14. Веселов, С.В. Рентгеноструктурные исследования поверхностных слоев титана, легированного танталом / Веселов С.В., Батаев И.А., Батаев А.А., Журавина Т.В., Руктуев А.А., Голковский М.Г. // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3-1. – С. 85-89.

15. Кормышев, В.Е. Структура и свойства наплавленного на низкоуглеродистую сталь слоя после электронно-пучковой обработки / Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Тересов А.Д. // Металлы. – 2017. – № 4. С. 46-51.

16. Макаров, А.В. Влияние предварительной деформационной обработки на упрочнение и качество азотированной поверхности аустенитной нержавеющей стали / Макаров А.В., Самойлова Г.В., Мамаев А.С., Осинцева А.Л., Саврай Р.А. // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2017. – № 4 (42). – С. 67-74.

17. Чейлях, Я.А. Поверхностные модификации износостойких сталей методами индуцирования метастабильных аустенитных структур / Чейлях Я.А., Чейлях А.П., Чигарев В.В., Шимитцу К., Ногучи Т., Оденау А., Кабеллу А. // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 26. – С. 62-70.