

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 544.77:621.791

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).833-846

ГРНТИ 31.15.37+81.35.27

Специальность ВАК 1.3.8

Научная статья

ПРИМЕНЕНИЕ НАНО- И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ МЕТАЛЛОВ В СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ: МИРОВАЯ ПРАКТИКА (ОБЗОР)

Сапожков С. Б., Зернин Е. А., Петрова Е. Д., Петров Р. В., Захаров М. А.

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого
(Великий Новгород, Россия)*

Аннотация В работе представлен обзор применения нано- и ультрадисперсных порошков в качестве функциональных добавок при различных способах дуговой сварки (наплавки) плавлением. Рассмотрены способы введения нано- и ультрадисперсных порошков в жидкую сварочную ванну. Приведены результаты экспериментальных исследований процессов пайки. Сформулированы задачи дальнейших исследований в области практического применения нано- и ультрадисперсных материалов для соединительных технологий.

Ключевые слова: нано- и ультрадисперсные порошки, модифицирование наплавленного металла, сварка, пайка

Для цитирования: Сапожков С. Б., Зернин Е. А., Петрова Е. Д., Петров Р. В., Захаров М. А. Применение нано- и ультрадисперсных материалов для управления структурой и свойствами металлов в соединительных технологиях: мировая практика (обзор) // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 833-846. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).833-846

Research Article

THE USE OF NANO- AND ULTRAFINE MATERIALS FOR CONTROLLING THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF METALS IN CONNECTING TECHNOLOGIES: WORLD PRACTICE (REVIEW)

Sapozhkov S. B., Zernin E. A., Petrova E. D., Petrov R. V., Zakharov M. A.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The paper presents an overview of the use of nano- and ultrafine powders as functional additives in various methods of arc welding (fusion surfacing). Methods for introducing nano- and ultrafine powders into a liquid weld pool are considered. The results of experimental studies of soldering processes are presented. The objectives of further research in the field of practical application of nano- and ultradisperse materials for connecting technologies are formulated.

Keywords: nano- and ultra-disperse powders, modification of deposited weld metal, welding, soldering

For citation: Sapozhkov S.B., Zernin E.A., Petrova E. D., Petrov R.V., Zakharov M. A. The use of nano- and ultrafine materials for controlling the structure and properties of metals in connecting technologies: world practice (review) // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 833-846. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).833-846

Введение

В начале XXI века возникла необходимость повышения научно-технического уровня экономики во всём мире. Для решения этой задачи требуется проведение

обширных научных исследований, а также массовое внедрение новых прогрессивных технологий в промышленное производство. Согласно прогнозам многих авторитетных организаций, приоритетными являются работы в области создания и применения нано- и ультрадисперсных порошков, а также материалов на их основе. Именно они, в числе прочих, будут способствовать существенному повышению эффективности производства в таких сферах как металлургия, машиностроение, энергетика, строительство, сельское хозяйство, медицина и др. [1-3].

Применение нано- и ультрадисперсных порошков

В последние годы наука о материалах в основном сосредоточена на разработке наноматериалов и нанопорошков. Главным преимуществом этих материалов является их применение в различных областях промышленности, так как их структура дает улучшенные свойства материалов, таких как твердость, прочность и пластичность. Тем не менее, производство наноматериалов и нанопорошков является довольно сложным [4].

В настоящее время в публикациях отмечают существенную роль модифицирования нанопорошками как фактор управления структурой и свойствами наплавленного металла. Основная часть исследований выполнена применительно к соединительным технологиям для низколегированных сталей. При этом образовавшиеся в наплавленном металле включения в виде оксидов, карбидов, нитридов рассматриваются как следствие химических соединений соответствующих элементов в процессе кристаллизации. Включения образуются разного размерного диапазона от 1 мкм до наноразмерного [4]. В работе [5] изучено влияние размера неметаллических включений на формирование структуры, состав и особенности распределения неметаллических включений при наличии различных оксидов.

В других случаях образование неметаллических включений являлось следствием ввода в сварочную ванну наноксидов или нанокарбидов [6]. Во всех случаях отмечается положительная роль нанодисперсных включений определенного состава и плотности распределения на структуру и свойства сварных соединений.

В современном мире процессы модифицирования наплавки занимают одно из важнейших мест в машиностроении, т.к. большинство изделий производится, в том числе, при помощи различных соединительных технологий. Поэтому становится актуальным вопрос о применении модификаторов, в том числе модификаторов с ультра- и наноразмерными частицами при наплавке. Это позволит управлять процессом кристаллизации металла жидкой сварочной ванны, прогнозировать структуру и свойства, а также повысить эксплуатационные и механические свойства наплавленного металла.

Получение модифицированной структуры при сварке позволяет главным образом повысить механические свойства в целом по сравнению со структурой, имеющей крупное зерно [7], повысить коррозионные характеристики за счет

введенных ультра- и нанодисперсных микродобавок редко- и щелочноземельных элементов [8].

Одним из недостатков модифицирования наплавленного металла является то, что при сварочном процессе температура в зоне действия дуги превышает температуру плавления многих наноструктурированных порошков, что приводит к их диссоциации и последующему растворению продуктов в расплаве сварочной ванны. В связи с этим большинство исследований посвящено изучению влияния на свойства тугоплавких сплавов карбида вольфрама, обладающего повышенной термической стабильностью, увеличенными значениями модуля упругости и меньшим коэффициентом термического расширения по сравнению с карбидами других металлов [9, 10].

Авторами работы [11] исследовано влияние режимов сварки (напряжения, силы тока и скорости сварки) на механические свойства, химический состав и микроструктуру сварных соединений, полученных самозащитной порошковой проволокой, в состав которой входили наноструктурированные порошки. Установлено положительное влияние применения наноструктурированных порошков на геометрические размеры валика и микроструктуру сварного соединения.

В работе [12] предложена технология модифицирования сварного соединения наноксидами алюминия через электроды с двойным покрытием, в которые входит нанодобавка оксида алюминия. Установлено, что оксид алюминия переходит в жидкую ванну и однородно распределяется без существенных скоплений, при этом происходит формирование сложного включения (алюминия, марганца, кремния, кислорода и углерода), а добавленные наноксиды ускоряют выделение других оксидов и сульфидов. При добавлении оксида алюминия происходит рафинирование металла.

Исследование в работе [13] направлено на улучшение микроструктуры и механических свойств сварных соединений, методом модифицирования жидкой сварочной ванны оксидами металлов через электрод. Результаты показали, что в металле шва были обнаружены включения со средним размером от 0,2-0,8 мкм. Эти включения эффективно способствовали образованию игольчатого феррита со средним размером от 1-2 мкм. Ударная вязкость сварного соединения увеличилась.

Основной целью исследования [14] являлось эффективное применение сварочных покрытых электродов для наплавки на основе наноструктуры. В статье рассмотрено влияния режимов сварки (сила тока, напряжение, скорость сварки) на геометрические размеры сварного шва и механические свойства сварного соединения. Были определены оптимальные параметры сварки и проведены экспериментальные исследования.

В работе [15] рассматривается применение оксида титана, введенного в покрытие сварочных электродов и его влияние на структуру, и механические свойства сварных соединений. Установлено влияние оксида титана на зарождение,

распределение и размер игольчатого феррита в сварных соединениях. Включения, образующиеся в процессе сварки, представляют собой несколько элементов титана, марганца, алюминия, кремния, кислорода и имеют размер в диапазоне от 0,2-0,8 мкм. Данные включения могут обеспечить активные центры зародышеобразования для игольчатого феррита, длина которого составляет 1 мкм. Также добавление оксида титана в сварочные электроды способствуют повышению ударной вязкости сварных соединений.

Целью исследования [16, 17] являлась разработка зависимости (эмпирической формулы) процентного соотношения наночастиц оксида хрома и оксида титана, растворенных в жидкой сварочной ванне, при дуговой сварке плавящимся электродом под слоем флюса от их размера. В данной работе изучено изменение режимов сварки (напряжение дуги, сила сварочного тока, расстояние между контактным наконечником и пластиной, скорость сварки). Результаты показали, что изменение размера наночастиц влияет на их растворимость в жидкой сварочной ванне. Прогнозируемые результаты были сопоставлены с экспериментальными данными.

Вновь разработанные порошковые проволоки для TIG наплавки представлены в работе [18]. Такие проволоки содержат различные наноструктурированные порошки-модификаторы в различном процентном содержании. Наномодифицированные покрытия наносились путем наплавки на образцы из конструкционной стали. Добавление частиц реализуется в область низкотемпературной сварочной ванны, таким образом, предотвращая их перегрев. Поверхностные слои, нанесенные разработанными проволоками, обладают повышенной твердостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью. Процессы наложения поверхностных слоев также позволяют контролировать химический состав и содержание фазы полученных слоев.

В работе [19] приведены результаты получения упрочняющего покрытия с толщиной в несколько миллиметров с помощью аргонодуговой сварки неплавящимся электродом с применением наноструктурированных карбидов или боридов. Наименьшая толщина упрочняющего слоя приблизительно 100-300 нм. Данная технология позволяет контролировать структуру кристаллизующего металла шва. На основании результатов установлено влияние режимов сварки на толщину покрытия. Экспериментальные исследования показали, что добавление наноразмерных порошков в упрочняющее покрытие позволяет улучшить механические свойства, износостойкость и коррозионную стойкость. Потенциальное применение данных упрочняющих покрытий в области режущих инструментов, которые подвержены коррозии и износу.

Авторами работы [20] было исследовано влияние наночастиц, входящих в состав флюсов на микроструктуру и твердости сварного соединения. Добавки наночастиц фторида натрия или оксида титана 1% массовой доли, эффективно

повлияли на размер зерна и глубину проплавления. Значение твердости металла шва было близко к основному металлу на 99%, что говорит о равномерности механических свойств в сварном соединении. Просвечивающая электронная микроскопия показала, что наночастицы способствуют образованию мартенситной структуры.

Разработанная технология наплавки покрытия представлена в работе [21]. Технология основана на введении наноструктурированной добавки оксида иттрия. Данная добавка позволяет получать твердосплавное покрытие с повышенными механическими свойствами. Результаты показывают, что с увеличением нанодобавки, размер первичного аустенитного зерна постепенно уменьшается, а механические свойства покрытия увеличиваются. Оптимальная концентрация нанодобавки оксида иттрия составляет 0,76%, при этом первичное аустенитное зерно является наименьшим (средний диаметр 17 мкм), а все механические свойства являются наиболее высокими: твердость HRC 62,9; предел прочности на разрыв и предел текучести – 1209 МПа и 989 МПа соответственно.

Оригинальное техническое решение введения наноструктурированных волокон оксогидроксида алюминия в расплав сварочной ванны через защитный (транспортирующий) газ представлено в работе [22], где определена оптимальная концентрация волокон, обеспечивающая положительное влияние на структуру наплавки. В результате процесса модифицирования металла наплавленного слоя системы Fe–C–Cr–Ni–Ti средний размер дендрита по ширине уменьшается в 4,5 раза.

В работе [23] исследованы структурные характеристики в обеспечении оптимальных свойств материалов и их эксплуатационная надежность. Изучен фазовый состав и наноструктуры в сварных соединениях (зона термического воздействия, металл сварного шва) высокопрочной конструкционной стали, изготовленной с использованием передовых высокоскоростных технологий гибридной лазерно-дуговой сварки. С помощью аналитической сканирующей электронной микроскопии, оптической металлографии изучены структурные параметры, такие как размер зерен и субзерен, плотность дислокаций, наночастиц и фазовые изменения в сварных соединениях. Наиболее влиятельными структурными факторами выявлены диспергирование мартенситной и бейнитной субструктуры, равномерное распределение частиц структурных фаз и отсутствие протяженных скоплений дислокаций – зон зарождения и распространения трещин. Данная структура сварных соединений высокопрочной конструкционной стали, полученной методом лазерно-дуговой сварки, обеспечивает высокий комплекс прочностных свойств и трещиностойкость.

Параметры, влияющие на скорость удаления материала, шероховатость поверхности и время электроэрозионной обработки проволокой в качестве заготовки с использованием сварного наноструктурированного наплавочного материала изучено в работе [24]. Наплавочный слой был нанесен с помощью ручной дуговой сварки металлов. Для выявления влияния наплавки на характеристики

электроэрозионной обработки проволокой исследованы различные толщины наплавленного слоя. Кроме того, была проведена многоцелевая оптимизация с использованием методов компенсационной агрегации и главных компонентов для определения оптимальных параметров процесса. Для множества эксплуатационных характеристик в виде латунной проволоки и латунной проволоки с цинковым покрытием выбрано оптимальное сочетание входных технологических параметров.

В исследовании [25] был использован метод коллоидной обработки. Данный метод широко используется для получения керамических компонентов. С помощью метода коллоидной обработки керамические наночастицы ввели в суперсплав на основе кобальта и изучили затвердевание данного «нанокompозита». Затем с помощью плазменно-порошковой наплавки расплавили в форме уплотненных цилиндров четыре наполнителя (рисунок 1): стеллит 6 с 1% носителем Fe-ZrO₂ с повышенным содержанием циркония (1; 2,5 и 7,5% по объему) и стеллит 6 без добавления циркония, называемые St 6 + 1%; St 6 + 2,5%; St 6 + 7,5%; и St 6, соответственно. В данной работе расплавленные материалы охарактеризованы с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии с полевой эмиссией, рентгеновской спектроскопией и микротвердостью по Виккерсу. Технология коллоидной обработки была эффективной для сращивания наночастиц оксида циркония к частицам носителя железа, которые были смешаны со стеллитом 6, а также взаимосвязаны с микроструктурой, фазами и микротвердостью после расплавления плазменной дуги.

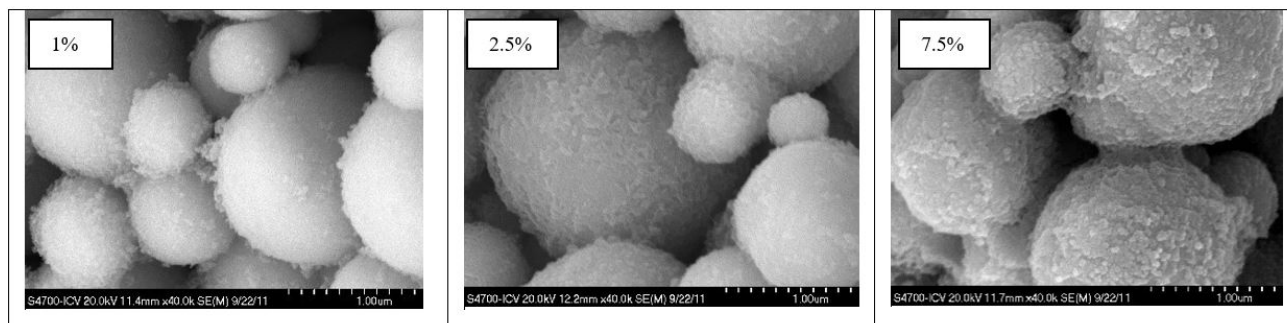


Рисунок 1. Носители Fe-ZrO₂ с повышенным содержанием циркония [25]

Алюминиевый сплав качественно сварили дуговой сваркой без образования горячих трещин [26], применяя фазовый контроль с использованием наночастиц во время сварки. Соединения, сваренные присадочным стержнем алюминиевого сплава, представленные в работе [26], содержащим наночастицы карбида титана, не только имеют мелкие шаровидные зерна и модифицированную вторичную фазу, но и демонстрируют исключительную прочность на разрыв как в процессе сварки, так и после термической обработки. Изменение присадочного материала при сварке плавлением может применяться к широкому спектру материалов, подверженных образованию горячих трещин.

В работе [27] исследовано влияние размера наполнителя, температуры пайки

на межфазную микроструктуру и механические свойства соединений. Наноразмерный наполнитель уменьшает размер фаз и способствует однородному распределению микроструктуры, обеспечивая более высокую прочность соединения по сравнению с микромасштабным наполнителем. Повышение температуры пайки привело к ускорению растворения и диффузии титана, что привело к увеличению толщины слоя нестехиометрического оксида титана и дисилицида титана, прилегающего к керамике диоксида кремния, и зоны диффузионного слоя вблизи альфа-бета титанового сплава. Микроструктура диоксида кремния и альфа-бета титанового сплава представлена на рисунке 2.

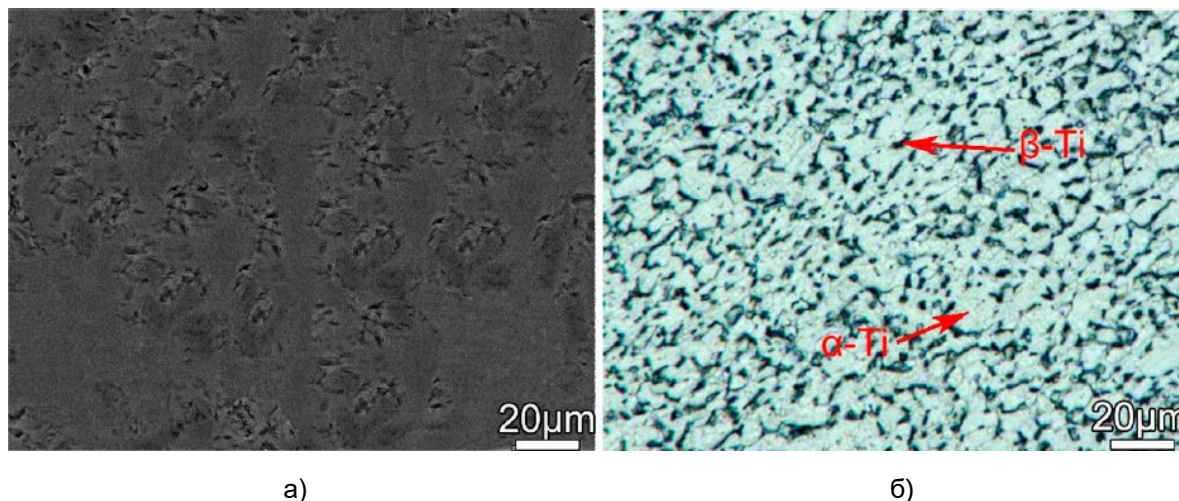


Рисунок 2. Микроструктуры базовых материалов [27]: а – диоксид кремния; б – альфа-бета титановый сплав

При этом в паяном шве образовалась доэвтектическая структура из-за высокого содержания титана. Максимальная прочность на сдвиг примерно 40 МПа была достигнута при температуре 950°С в течении 10 мин (рисунок 3).

Влияние наполнителя для пайки деталей на основе алюминия, усиленного наночастицами, на микроструктуру и паяемость алюминиевых сплавов рассмотрено в работе [28]. Проанализировав влияние различных факторов на процесс пайки, можно прийти к выводу, что наполнитель для пайки должен быть способен смачиваться и распределяться по всей поверхности соединения (рисунок 4). Нестабильные свойства алюминиевых сплавов, следует контролировать с помощью армирующих подходящих элементов. По сравнению с другими материалами пайка на алюминий требует более высокой точности контроля, поскольку разница между температурами плавления основного металла и наполнителя остается низкой даже после добавления добавок, снижающих температуру плавления, таких как кремний. Требуется разработка новых низкотемпературных присадочных металлов на основе алюминия. Механические свойства сплавов на основе алюминия могут быть улучшены введением в них наночастиц для уменьшения толщины кремния и интерметаллического соединения в матрице алюминия, улучшая наноструктуру.

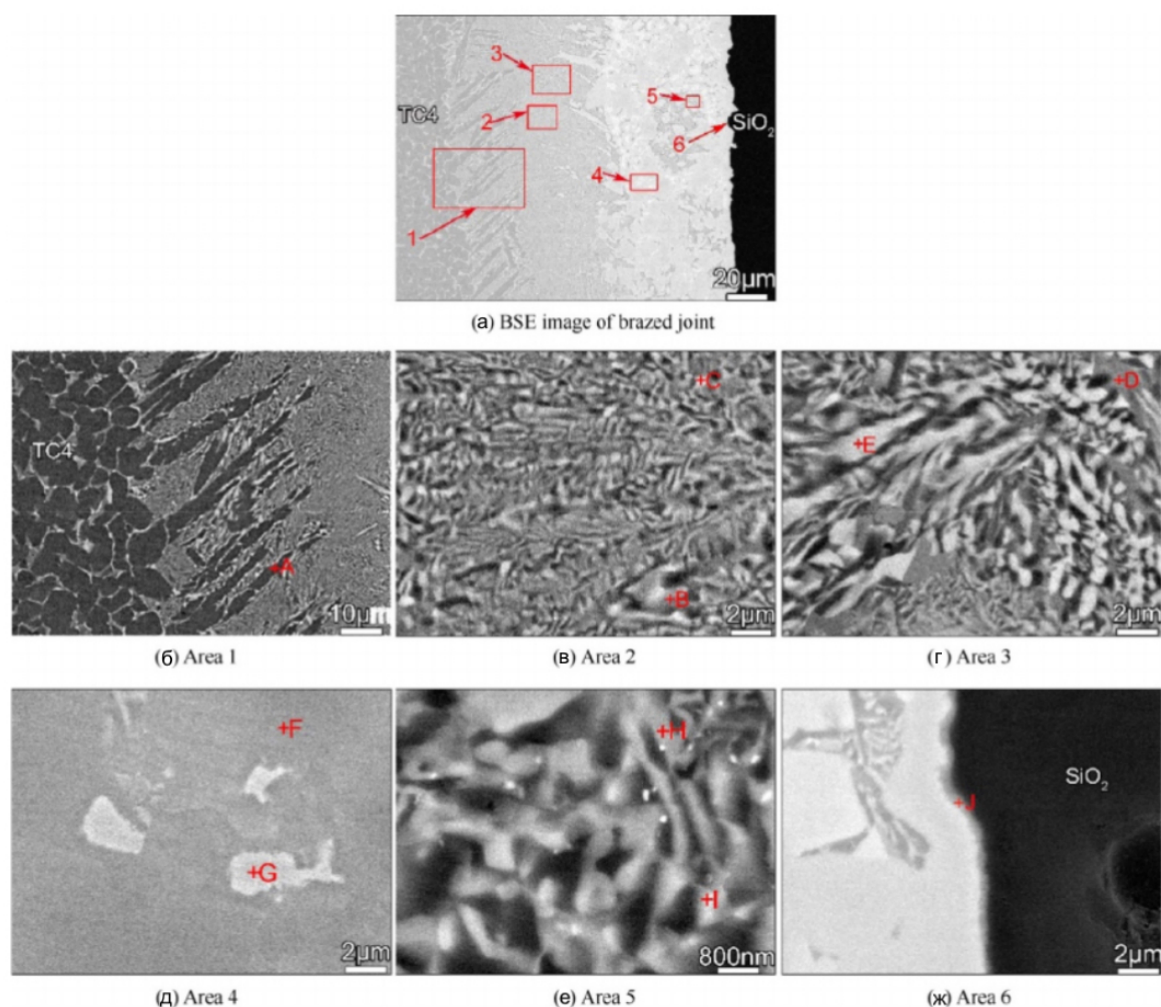


Рисунок 3. Микроструктура соединения диоксида кремния/альфа-бета титанового сплава, спаянного с использованием композитного наполнителя AgCuNi + Al₂O₃ при температуре 950°C в течении 10 мин [27].

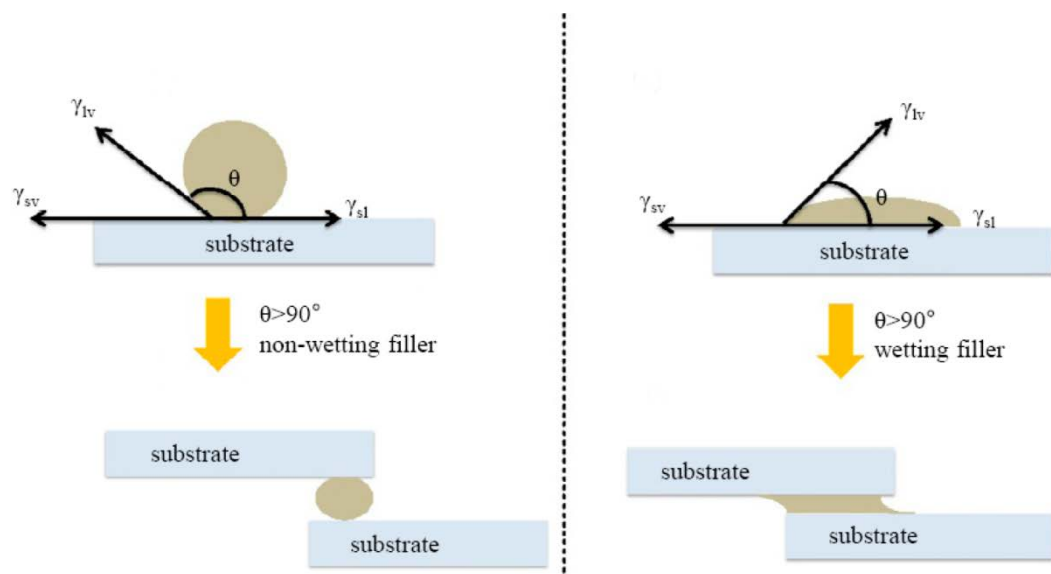


Рисунок 4. Смачиваемость и растекаемость присадок для пайки по поверхности подложки [28].

В работе [29] рассмотрена сварка между синтезированными дисперсиями однокомпонентного золота и бинарными химическими соединениями халькогенидных наночастиц. Процесс соединения привел к образованию асимметричных золото-халькогенидных гибридных наночастиц. Сварка разнородных наночастиц в дисперсии в основном обусловлена вызванной десорбцией лиганда комфортным контактом между наночастицами и диффузией золота в халькогенидные наночастицы. Процесс сварки происходил между наночастицами различной формы или с разными покрывающими агентами, или в разных средах растворителей. Для данного процесса был предложен двухэтапный механизм сборки-сварки, основанный на измерениях электронного спинового резонанса и моделировании молекулярной динамики.

Авторами работы [30] рассмотрены последние достижения в области надежности паяных соединений на основе олова и изучено влияние состояния материалов между слоями в процессе обработки поверхности безэлектродным никель-иммерсионным серебром, геополимерной керамики и технологии вращающегося магнитного поля. Трехмерная сетчатая структура пористых межслойных металлов (рисунок 5) и необходимые свойства никель-иммерсивного серебра продемонстрировали свою высокую эффективность при обновлении существующих бессвинцовых припоев, удовлетворяя потребности как при высокотемпературной эксплуатации, так и при низкотемпературной пайке.

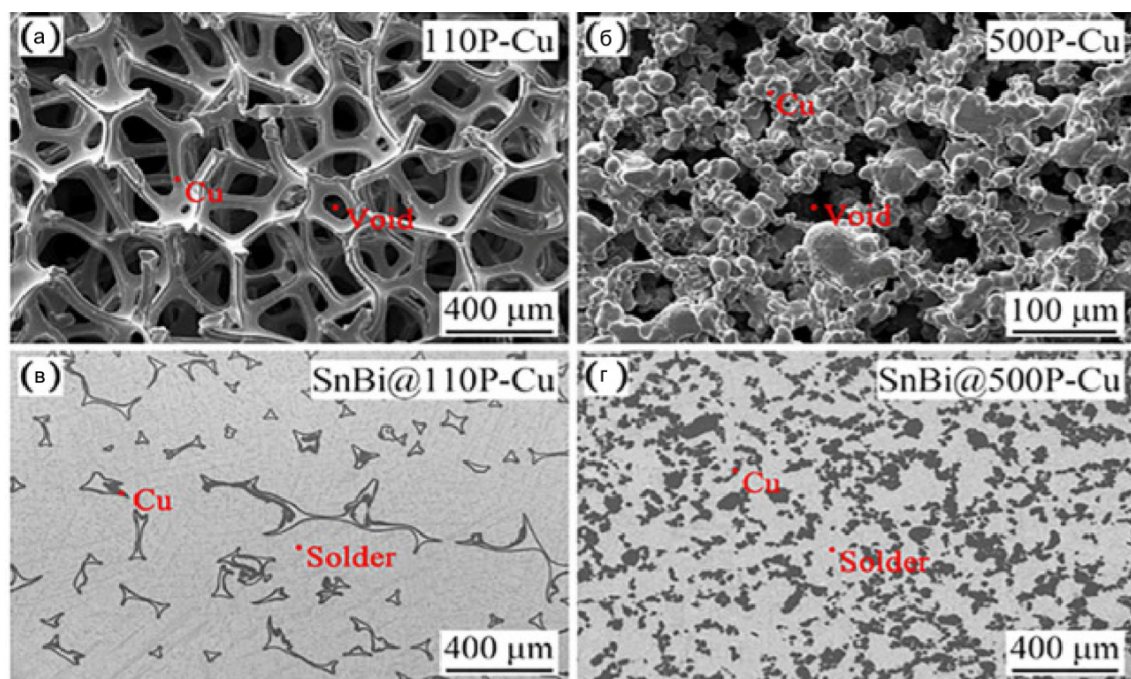


Рисунок 5. Микроструктуры листов пористой меди:
а) 110 P-Cu; б) 500 P-Cu; в) SnBi@110P-Cu; г) SnBi@500P-Cu [30]

При этом показано, что технология соединения переменным током эффективна для предотвращения агломерации и всплывания наноразмерных усилителей в композитных припоях. Также в работе [30] обобщены новые

технологии для будущих направлений исследований, чтобы обеспечить дальнейшую теоретическую основу, необходимую для исследования надежности паяных соединений электронных устройств в процессе эксплуатации.

В исследовании [31] рассмотрены различные типы наполнителей для пайки, процессы изготовления соединений и технологии пайки, разработанные в последние десятилетия. Было определено, что при пайке возникали определенные проблемы с образованием интерметаллических соединений и остаточными напряжениями в соединениях при высоких температурах. Для контроля интерметаллических соединений были предложены наполнители, усиленные наночастицами. Однако, существовали и другие проблемы с диспергированием и сегрегацией частиц в соединениях. В завершении работы представлены новые разработки в области материалов для пайки и их конкретных применений. Изучены новые области пайки, включая новейшие модифицированные энтропией наполнители для пайки различных конструкционных и технологических областей.

В работе [32] исследовано добавление наночастиц оксида алюминия на микроструктуру и эрозионный износ покрытия сплава на основе никеля, который обусловлен наличием дисперсии твердых карбидов и боридов высокоскоростным кислородным горючим на подложке из нержавеющей стали. Проведен анализ частиц исходного сплава на основе никеля, который обусловлен наличием дисперсии твердых карбидов и боридов. Определено максимальное допустимое добавление наночастиц оксида алюминия при помощи использования модели «массовое соотношение смесей» с учетом размера и плотности частиц. Рассмотрены два случая и анализированы их эксплуатационные характеристики: максимальное добавление 1,4%, за которым следует добавление 0,17% наночастиц оксида алюминия и сплава на основе никеля. Для определения микроструктуры, состава материала и фазового спектра полученных покрытий использовались сканирующий электронный микроскоп, энергодисперсионная спектроскопия и рентгеноструктурный анализ. Наноструктурированное покрытие испытано на прочность сцепления при отрыве и эрозию твердыми частицами струей горячего воздуха (450°C) для параметров эксплуатационных характеристик. Обнаружено, что микротвердость покрытия высокоскоростным кислородным топливом сплава на основе никеля улучшилась с 576 $HV_{0,3}$ до 748 $HV_{0,3}$ при добавлении 1,4% наночастиц оксида алюминия. Наноструктурированное покрытие также проявило высокую эрозионную стойкость при трех углах удара от 30° до 90° с интервалом в 30°. При этом повышение стойкости к эрозионному износу обусловлено увеличением твердости в результате применения добавки наночастиц оксида алюминия.

Заключение

Применение нано- и ультрадисперсных материалов в соединительных технологиях в основном направлено на управление структурой и свойствами

неразъемных соединений.

На основе проведенного анализа мирового опыта применения наноматериалов в соединительных технологиях и по данным, приведенным в работе [33], была проведена систематизация способов применения нано- и ультрадисперсных порошков при сварке (наплавке) плавлением (рисунок 7).

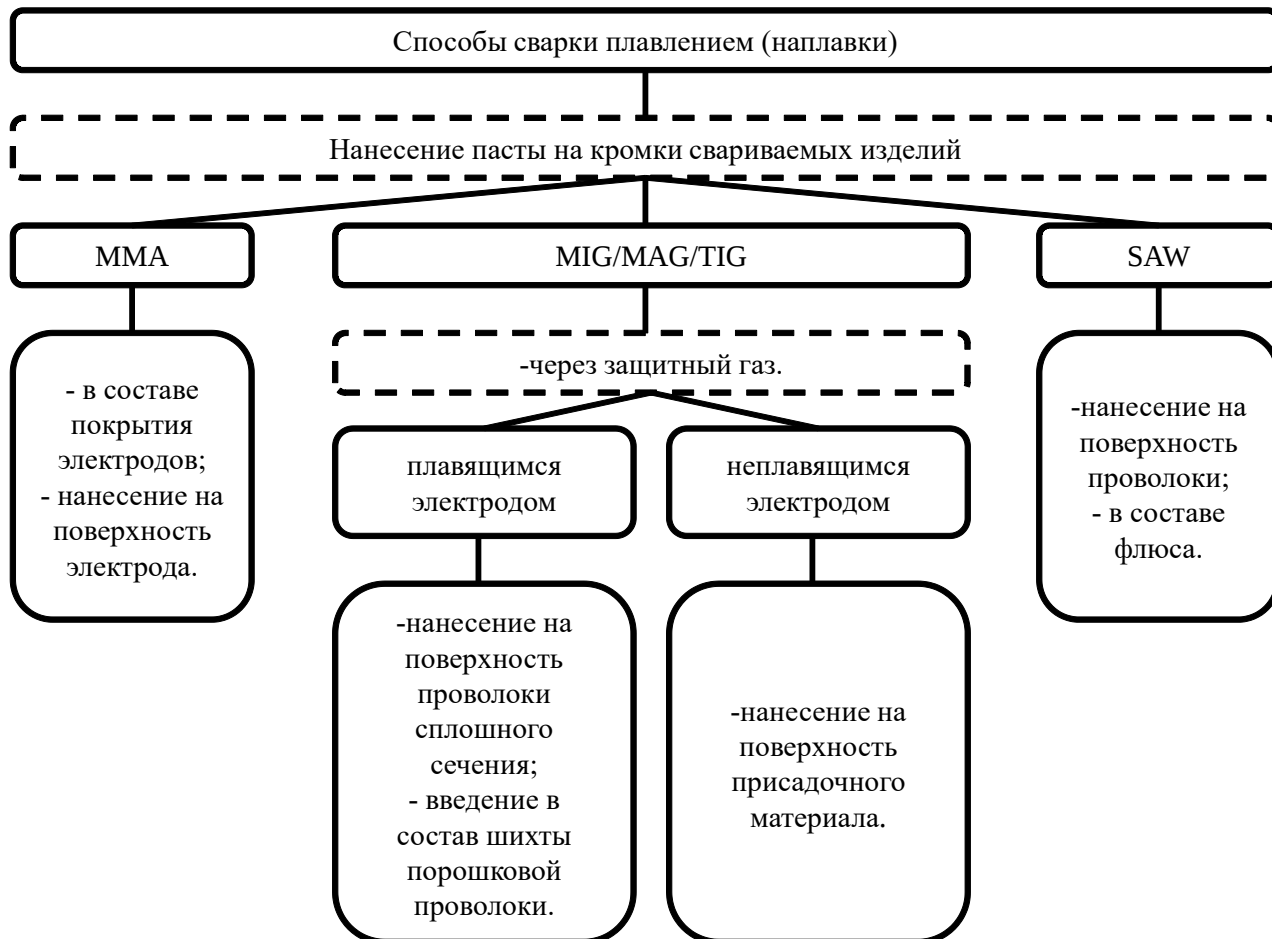


Рисунок 7. Применение нано- и ультрадисперсных порошков при дуговой сварке и наплавке

Необходимо отметить, что при большинстве способов сварки (наплавки) плавлением возможно внесение таких порошков в зону сварки через специализированные пасты, которые наносятся на кромки свариваемых изделий. А при MIG/MAG/TIG-сварке – через защитный газ.

Обзор применения нано- и ультрадисперсных материалов для управления структурой и свойствами металлов в соединительных технологиях показывает, что происходит активное развитие технологических решений в этой области. Такие решения построены, прежде всего, на создании новых материалов для соединительных технологий. Перспективным является развитие способов сварки и наплавки порошковой проволокой в состав которой будут входить нано- и ультрадисперсные материалы. В результате возможно повысить эксплуатационных

показатели наплавленных слоев на основе применения нано- и ультрадисперсных порошков. Для достижения цели необходимо будет решить следующие научные и практические задачи:

1. Разработать научно-обоснованные технологические решения применения нанопорошков в составе шихты порошковой проволоки для повышения свойств наплавленных слоев.

2. Исследовать макро- и микроструктуру наплавов, полученных с дополнительным введением нанопорошков в сварочную ванну с целью получения поверхностных слоев сталей и сплавов с особыми эксплуатационными показателями.

3. Исследовать влияние применения нано- и ультрадисперсных порошков на повышение механических, физических, химических, технологических, эксплуатационных показателей неразъемных соединений цветных металлов и сплавов на их основе.

4. Развить применение нанотехнологий в области соединения композиционных материалов.

Список литературы / References

1. Paton B. E., Ishchenko A. Ya., Ustinov A. I. Application of nanotechnology of permanent joining of advanced light-weight metallic materials for aerospace engineering // The Paton Welding Journal. 2008. 12. 2-8.
2. Pal K., Mohan M. M., Thomas S. Dynamic application of novel electro-optic switchable device modulation by graphene oxide dispersed liquid crystal cell assembling CdS nanowires // Organic Electronics: physics, materials, applications. 2016. 39. 25-37. DOI: 10.1016/j.orgel.2016.09.019; 10.1016/j.orgel.2016.09.019
3. Reisgen U., Balashov B., Stein L., Geffers C. Nanophase hardfacing. New possibilities for functional surfaces // Materials Science Forum. 2010. 638/642. 870-875. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.870
4. Lee T. K., Kim H. J., Kang B. Y., Hwang S. K. Effect of Inclusion Size on the Nucleation of Acicular Ferrite in Welds // ISIJ International. 2000. 40(12). 1260-1268. DOI: 10.2355/isijinternational.40.1260
5. Seo J. S., Kim H. J., Lee C. Effect of Ti addition on weld microstructure and inclusion characteristics of bainitic GMA welds // ISIJ International. 2013. 53(5). 880-886. DOI: 10.2355/isijinternational.53.880
6. Vanovsek W., Bernhard C., Fiedler M., Posch G. Influence of aluminum content on the characterization of microstructure and inclusions in high-strength steel welds // Welding in the World. 2013. 57(1). 73-83. DOI: 10.1007/s40194-012-0008-0
7. Wang J.-Y., Chang T.-C., Chang L.-Z., Lee S. Effect of Al and Mn Content on the Mechanical Properties of Various ECAE Processed Mg-Li-Zn Alloys // Materials Transactions. 2006. 47(4). 971-976. DOI: 10.2320/matertrans.47.971
8. Klimpel A., Kik T. Erosion and abrasion wear resistance of GMA wire surfaced nanostructural deposits // Archives of Materials Science and Engineering. 2008. 30(2). 121-124.
9. Zhu Y., Yukimura K., Ding C. X., Zhang P. Y. Tribological properties of nanostructured and conventional WC-Co coatings deposited by plasma spraying // Thin Solid Films. 2001. 388(1-2). 277-282. DOI: 10.1016/S0040-6090(01)00805-7

10. Wu P., Du H. M., Chen X. L., Li Z. Q., Bai H. K., Jiang E. Y. Influens of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings // *Wear*. 2004. 257(1-2). 142-147. DOI: 10.1016/j.wear.2003.10.019
11. Gualco A., Svoboda H. G., Surian E. S. Effect of welding parameters on microstructure of Fe-based nanostructured weld overlay deposited through FCAW-S // *Welding International*. 2016. 30(8). 573-580. DOI: 10.1080/09507116.2015.1096533
12. Chen C. X., Peng H., Liu R., Li Y., Zhao P. Research on inclusions in low alloy steel welds with nano alumina addition // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2012. 9(9). 1533-1536. DOI: 10.1166/jctn.2012.2239
13. Chen C., Xue H., Chen C., Han X., Tang H. Effect of nano oxide on microstructure and mechanical properties of low alloy high strength steel welds // *Hanjie Xuebao/Transactions of the China Welding Institution*. 2016. 37(9). 29-34.
14. Saha A., Mondal S. C. Multi-objective Optimization of Welding Parameters in MMAW for Nano-structured Hardfacing Material Using GRA Coupled with PCA // *Source of the Document Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2016. 70. 1431-1502. DOI: 10.1007/s12666-016-0945-1
15. Liang X. S., Chen C. X., Peng H. F. Effect of nano-scale titanium oxide on the microstructure of weld deposits for high strength low alloyed steel // *Cailiao Kexue yu Gongyi/Material Science and Technology*. 2009. 17. 41-45.
16. Aghakhani M., Naderian P. Aghakhani M. Modeling and optimization of dilution in SAW in the presence of Cr₂O₃ nano-particles // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. 78(9-12). 1665-1676. DOI: 10.1007/s00170-014-6733-3
17. Aghakhani M., Ghaderi M. R., Jalilian M. M., Derakhshan A. A. Predicting the combined effect of TiO₂ nano-particles and welding input parameters on the hardness of melted zone in submerged arc welding by fuzzy logic // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2013. 27(7). 2107-2113. DOI: 10.1007/s12206-013-0523-y
18. Tashev P., Kirilov L., Petrov T., Koprinkova-Christova P., Lukarski Y. Optimization of the parameters for pulsed current tig remelting in nano modification of surface layers of structural steel parts // *Scientific proceedings*. 2016. 1(187). 118-121.
19. Reisgen U., Balashov B., Stein L., Geffers C. Nanophase hardfacing new possibilities for functional surfaces // *Materials Science Forum*. 2010. 638-642. 870-875. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.870
20. Hsu P. W., Chen R. S., Kao F. H., Tsai S.-Y., Duh J.-G., Wang S.-H., Yang J.-R. Martensite nucleation site and grain refinement in duplex titanium alloy weldment by active flux with nanoparticle addition // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2011. 16(6). 514-521. DOI: 10.1179/1362171811Y.0000000038
21. Yang J., Hou X., Zhang P., Ren X., Yang Q. Mechanical properties of the hypereutectoid Fe-Cr-C hardfacing coatings with different nano-Y₂O₃ additives and the mechanism analysis // *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*. 2016. 655. 346-354. DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.087
22. Kuznetsov M. A., Zernin E. A., Danilov V. I., Zhuravkov S. P., Kryukov A. V. Optimization of the modification parameters of a deposited metal by nanostructural fibers of the aluminium oxyhydroxide // *Nanotechnologies in Russia*. 2018. 13(9-10). 521-530. DOI: 10.1134/S1995078018050087
23. Markashova L., Berdnikova O., Alekseenko T., Bernatskyi A., Sydorets V. Nanostructures in Welded Joints and Their Interconnection with Operation Properties // *Achievements in the field of thin films, nanostructured materials and coatings: selected reports of the 2018 International Conference "Nanomaterials: Applications and Properties"* / edited by A. D. Pogrebnyak, V. Novosad. Springer, Singapore, 2019. 119-128.

DOI: 10.1007/978-981-13-6133-3_12

24. Saha A., Mondal S. C. Statistical Analysis and Optimization of Process Parameters in Wire Cut Machining of Welded Nanostructured Hardfacing Material // Silicon. 2019. 13(9-10). 1313-1326. DOI: 10.1007/s12633-018-9924-y

25. Bond D., Lussoli R. J., Rodrigues Neto J. B., D'Oliveira A. S. Co-based superalloy (Stellite 6) powder with added nanoparticles to be molten by PTA // Soldagem & Inspeção. 2020. 25(5). 2514. DOI: 10.1590/0104-9224/si25.14

26. Sokoluk M., Cao C., Pan S., Li X. Nanoparticle-enabled phase control for arc welding of unweldable aluminum alloy 7075 // Nature Communication. 2019. 10(1). 98. DOI: 10.1038/s41467-018-07989-y

27. Bian H., Song Y., Liu D., Lei Y., Cao J., Song X. Joining of SiO₂ ceramic and TC₄ alloy by nanoparticles modified brazing filler metal // Chinese Journal of Aeronautics. 2019. 33(1). 41-45. DOI: 10.1016/j.cja.2019.03.040

28. Furkan, Kim H.-J., Lee G.-h., Jung J. P. A Review of the Brazeability of Low-Temperature and Nano-Reinforced Al-Based Brazing Filler Metals // Journal of Welding and Joining. 2022. 40(3). 216-224. DOI: 10.5781/JWJ.2022.40.3.2

29. Huang Z., Zhao Z. J., Zhang Q., Xan L., Jiang X.-m., Li C., Perts cardenas M. T., Yuang P., Yin J.-J., Luo J., Gahg J., Nie Z. A welding phenomenon of dissimilar nanoparticles in dispersion // Nature Communication. 2019. 10(1). 219. DOI: 10.1038/s41467-018-08206-6

30. Dele-Afolabi T. T., Ansari M. N. M., Azmah Hanim M. A., Adeleke A. O., Ojokupoluyi O. J., Atiqah A. Recent advances in Sn-based lead-free solder interconnects for microelectronics packaging: Materials and technologies // Journal of Materials Research and Technology. 2023. 25(33). 4231-4263. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.06.193

31. Ahn, B. Recent Advances in Brazing Fillers for Joining of Dissimilar Materials // Metals. 2021. 11(7). 1037. DOI: 10.3390/met11071037

32. Praveen A. S., Arjunan A. Effect of nano-Al₂O₃ addition on the microstructure and erosion wear of HVOF sprayed NiCrSiB coatings // Materials Research Express. 2019. 7(1). 015006. DOI: 10.1088/2053-1591/ab5bda

33. Kuznetsov M. A., Zernin E. A. Nanotechnologies and nanomaterials in welding production (review) // Welding International. 2012. 26(4). 311-313. DOI: 10.1080/09507116.2011.606158

Информация об авторах

Сапожков Сергей Борисович – доктор технических наук, доцент, директор Политехнического института, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-6804-4454, ssb@novsu.ru

Зернин Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Инженерной школы диагностики и промышленной безопасности, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9176-0720, Eugeny.Zernin@novsu.ru

Петрова Екатерина Дмитриевна – аспирант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0002-2302-8359, s238309@std.novsu.ru

Петров Роман Валерьевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, главный научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9751-116X, Roman.Petrov@novsu.ru

Захаров Максим Анатольевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9144-340X, Maxim.Zakharov@novsu.ru