

Федеральное агентство научных организаций
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ
ИМ. С.А. ХРИСТИАНОВИЧА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПМ СО РАН)

УДК 535.233.52.

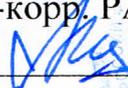
№ госрегистрации 01201351876

Инв. № 4/17

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПМ СО РАН

чл.-корр. РАН


А.Н. Шиплюк
«29» декабря 2016 г.



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ НАНОМАТЕРИАЛОВ
НА СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ,
ПОЛУЧАЕМЫХ ОБРАБОТКОЙ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ
ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ (ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ, ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ)
(заключительный)

Номер проекта в ИСГЗ ФАНО 0323-2014-0001

Приоритетное направление III.18. Физико-технические и экологические проблемы
энергетики, тепломассообмен, теплофизические и электрофизические свойства
веществ, низкотемпературная плазма и технологии на ее основе

Программа ФНИ СО РАН III.18.1. Воздействие высококонцентрированных
потоков энергии на материалы для улучшения их физико-механических
характеристик

Протокол Ученого совета ИТПМ СО РАН

№ 12 от 01.12.2016

Руководитель проекта

д.ф.-м.н.



А.Н. Черепанов

Новосибирск 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

1. Черепанов А.Н.- гл.н.с., д.ф.-м.н., профессор,
2. Марусин В.В. – вед.инж, д.ф.-м.н., профессор,
3. Попов В.Н. - гл.н.с., д.ф.-м.н.,
4. Шапеев В.П. - гл.н.с., д.ф.-м.н., профессор,
5. Маликов А.Г.- с.н.с., к.т.н.,
6. Бублик В.А. – н.с., к.ф.-м.н.,
7. Щукин В.Г. – вед.инж., к.ф.-м.н.
8. Дроздов В.О. – м.н.с.
9. Черепанова В.К. с.н.с., д.ф.-м.н.

Шапеев
Марусин
Попов
Шапеев
Маликов
Бублик
Щукин
Дроздов
Черепанова

Основные задания на 2016 год

- 1 Исследование влияния наномодифицирующих добавок и режимов лазерной обработки поверхности стальных деталей на износостойкость и механические свойства композиционного покрытия.
2. Численное моделирование теплофизических процессов высокочастотной индукционной обработки стали с наномодифицирующими добавками.

РЕФЕРАТ

ОТЧЕТ: 23 с., 8 рис., 2 табл., 9 источников.

НАНОПОРОШКИ, НАНОМОДИФИЦИРУЮЩИЕ ДОБАВКИ, СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНОЕ ПОКРЫТИЕ, ЛАЗЕРНАЯ (ИНДУКЦИОННАЯ) НАПЛАВКА, ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ, СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Объектом исследования является обработка поверхности стали и сплавов высококонцентрированными источниками энергии (лазерного луча и электромагнитного поля) с использованием наномодифицирующих материалов.

Цель работы - повышение физико-химических и эксплуатационных свойств поверхностных слоев с помощью применения наноразмерных тугоплавких соединений.

В процессе выполнения проекта был проведен цикл экспериментальных и численных работ по изучению влияния наноразмерных частиц тугоплавких соединений на свойства поверхностных покрытий получаемых обработкой лазерным лучом и высокочастотным индукционным полем. Впервые для металлизации тугоплавких наночастиц с целью повышения их смачиваемости был опробирован метод СВС получения интерметаллических соединений из шихтового порошкообразного материала, содержащего наноразмерные тугоплавкие частицы. С целью достижения равномерного распределения высокодисперсных частиц тугоплавких химических соединений в матрице из интерметаллического соединения AlNi исходная порошковых смесей никеля и алюминия с частицами тугоплавких материалов подвергалась интенсивному перемешиванию в многоножевом гомогенизаторе. В процессе синтеза поверхности частиц хорошо смачивались расплавом, что способствовало образованию прочной границы раздела частиц тугоплавких химических соединений с интерметаллической матрицей синтезированного компакта. В результате последующему механическому диспергированию компакта достигалось равномерное распределение наночастиц в порошковой смеси. Численными расчетами было показано, что вводя поверхностно активные композиции совместно с модифицирующими наночастицами в жидкометаллическую ванну металла, можно эффективно обеспечить гомогенное распределение наночастиц в объеме металла, что способствует формированию структурной и химической однородности в затвердевшем металле и повышению качества покрытия. Проведены экспериментальные исследования возможности индукционной наплавки деталей из низкоуглеродистых сталей при использовании шихты с добавками нанодисперсного порошка (НП) ферросилиция. Установлено, что добавка порошка НП всего 0,05 % по массе обеспечивает более 60% прироста микротвердости наплавленного слоя при этом обеспечивается наибольшая его износостойкость. Экспериментально установлено, что применение наномодифицирующих соединений (TiN, Y₂O₃), наносимых на обрабатываемую лазерным лучом поверхность стали в количестве менее 0,1 % по массе, находящихся в интерметаллидной матрице AlNi, позволяет увеличить твердость поверхностного слоя в 2 – 2,5 раза, а износостойкость в 1,4 по сравнению с исходным металлом.

Глубина проплавленного слоя составляет ~ 2 мм. Новизна решения заключается в применении наноструктурированных композиций, содержащих нанодисперсные тугоплавкие соединения в интерметаллической матрице. Проведены численные и экспериментальные исследования температурного поля, структуры, и свойств неразъемных соединений «титан–сталь 12Х18Н10Т», полученных лазерной сваркой с использованием промежуточной медной вставки и нанопорошковых добавок. Установлено, что использование медной вставки позволяет получать достаточно прочное неразъемное соединение с прочностью на разрыв $\sigma_b = 335$ МПа. Ввод в сварочную ванну нанопорошкового модификатора TiN+Y₂O₃+Cr в количестве менее 0,1 % по массе увеличивает это значение до $\sigma_b = 375$ МПа. Показано удовлетворительное согласие результатов численного моделирования с данными физического эксперимента. Полученный результат является пионерским, поскольку наномодифицирование в технологии лазерной сварки трудно свариваемых металлов с промежуточной вставкой нигде ранее не применялся. Важнейшим результатом проекта является экспериментально показанная возможность существенно повысить прочностные свойства многослойного покрытия стали с применением специально подготовленных наноразмерных тугоплавких частиц TiN, Y₂O₃ при лазерной наплавке композиционного порошка ПС12-НВК 0-1 с упрочняющей WC фазой. Было установлено, что максимальная износостойкость модифицированного покрытия, полученного с 0,1% по массе наномодификатора в композиционной смеси, почти в 2 раза превышает износостойкость покрытия без наномодифицирующей добавки.

Степень внедрения – результаты исследования по модификации поверхностей породоразрушающих импульсных машин с помощью высокоэнергетических воздействий вошли в коллективную монографию: «Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. Интегр. Проекты СО РАН. Вып. 43. С. 181 -191».

Практическая значимость результатов исследования – применение модификаторов в виде тугоплавких нанопорошков открывает новые технологические возможности существенного повышения эксплуатационной и конструкционной прочности деталей при их обработке высококонцентрированными источниками энергии.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Исследование влияния наномодифицирующих добавок и режимов лазерной обработки поверхности стальных деталей на износостойкость и механические свойства композиционного покрытия	6
2. Численное моделирование теплофизических процессов высокочастотной индукционной обработки стали с наномодифицирующими добавками	10
3. Список использованных источников	16
4. Заключение.....	17
5. Приложение 1. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2016 г. в соответствии с государственным заданием	17
6. Приложение 2. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2013 – 2016 гг. в соответствии с государственным заданием	19

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчет является заключительным по теме: «Исследование влияния модифицирующих наноматериалов на свойства поверхностных слоев металлов и сплавов, получаемых обработкой высококонцентрированными источниками энергии (лазерным лучом, высоко-частотным электромагнитным полем)», по которой были представлены отчеты по этапам 2013, 2014, 2015 годов.

Повышение надежности и долговечности работы деталей и механизмов во многом определяется свойствами их поверхностных слоев. В ряде случаев условия их эксплуатации значительно отличаются от условий эксплуатации остального материала изделия, общая прочность которого зависит от свойств металла и его составляющих. Поверхностные слои в большинстве случаев дополнительно должны быть устойчивыми к абразивному или абразивно-ударному износу, к воздействию химически активных сред. Часто оказывается целесообразней для конкретных условий эксплуатации все изделие изготавливать из более дешевого, но достаточно работоспособного металла и только на поверхностях, работающих в особых условиях, иметь необходимый по толщине слой другого более стойкого материала. Эффективными способами решения этой проблемы являются специальные покрытия, которые включают все многообразие поверхностных слоев, наносимых с целью той или иной модификации поверхности, например, увеличения твердости, изменения коэффициента трения, увеличения износостойкости, придания каких либо других специальных свойств [1,2]. Одной из существующих в настоящее время многочисленных технологий поверхностного упрочнения деталей и изделий является лазерная (индукционная) наплавка порошковых материалов, содержащих 20-35% упрочняющей фазы, что согласно исследований [3,4] является оптимальным составом для работы покрытий в условиях ударно-абразивного изнашивания, а также применение модифицирования для изменения структуры и как следствие, повышение механических свойств основы защитных покрытий, определяющей стойкость к ударным и абразивным нагрузкам. При лазерной наплавки наиболее приемлемо с точки зрения экономного расхода модифицирующих материалов применение шликерных обмазок. Это также дает возможность создания необходимой концентрации легирующих и модифицирующих элементов, которая легко регулируется толщиной слоя обмазки. Следует отметить, что именно этим способом можно наносить самые разнообразные композиции, что трудно осуществить другим методом. Цель

проведенных исследований - изучение влияния специально подготовленных наноразмерных тугоплавких порошковых добавок на структуру и эксплуатационные свойства упрочняющих покрытий, создаваемых высоко концентрированными источниками энергии (СО₂ лазера непрерывного действия, высокочастотного индукционного поля). Наномодифицирующие добавки ранее применялись нами для повышения качества и механических характеристик литых заготовок, а также при лазерной сварке стали и сплавов и показали положительное воздействие на прочностные свойства литого металла и соединений [5,6]. Целью 4-го (заключительного) этапа являлось исследование влияния наномодифицирующих добавок и режимов лазерной обработки поверхности стальных деталей на износостойкость и механические свойства многослойного композиционного покрытия, содержащего упрочняющую фазу, разработка математической модели теплофизических процессов при высокочастотном электромагнитном воздействии на подложку с применением модифицирующих наноразмерных материалов для отработки рациональных режимов индукционной обработки покрытий.

1. Исследование влияния наномодифицирующих добавок и режимов лазерной обработки поверхности стальных деталей на износостойкость и механические свойства композиционного покрытия

Материалы и методы исследования.

В качестве наплавочного материала использовался никелевый порошок ПС12-НВК 0-1 с упрочняющей фазой карбидом вольфрама (WC 32% по массе), а в качестве модифицирующей добавки - смесь нанопорошков нитрида титана и оксида иттрия, плакированных порошками хрома и железа. Химический состав наплавочного порошка ПС12-НВК 0-1 представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав наплавочного металла, масс. %

Марка	C	B	Si	Cr	Fe	WC	Ni
ПС-12НВК-01	0,3	1,5	2,1	8,0	>3,4	32	остальное

Никелевый самофлюсующийся порошковый сплав ПС-12НВК-01 с карбидом вольфрама эффективно используется в качестве износо- и коррозионностойкого покрытия [7]. Наличие в составе кремния и бора способствует самофлюсованию и хорошей смачиваемости наплавляемой поверхности изделия, а присутствие карбида вольфрама (WC) в количестве ~32% позволяет повысить ее твердость и износостойкость [4]. Плакирование тугоплавких наночастиц TiN, Y₂O₃ порошковыми металлами осуществлялось в центробежной планетарной мельнице АГО 2 в течении 3 мин, после чего порошковая композиция (наплавочный порошок с наномодифицирующей добавкой (TiN:Y₂O₃ =1:1)) перемешивалась в течении 2 минут в АГО - 2. Для анализа морфологии и размеров частиц композиционного наплавочного порошка ПС-12НВК-01 и наномодифицирующих порошков TiN, Y₂O₃ использовалась растровая электронная микроскопия (рис. 1, рис. 2, рис.3 соответственно).

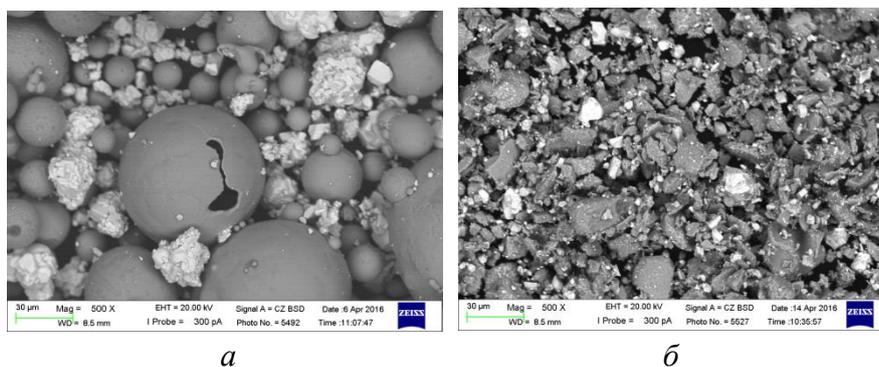


Рис. 1. Морфология основы наплавочного порошка и агрегатов упрочняющей фазы до механической обработки (а) после обработки в АГО 2 (б).

В исходном состоянии форма частиц сплава системы Ni - Cr - Fe - B - Si является сферически симметричной, частицы карбида вольфрама (WC) коагулированы в агрегаты и имеет дробленую форму (рис. 1 а). После обработки в АГО 2 происходило разрушение коагулированных агрегатов WC и частиц основного сплава Ni - Cr - Fe - B - Si, которые судя по рис.1 представляют собой полые сферы, вследствие чего структура порошка существенно диспергировалась.

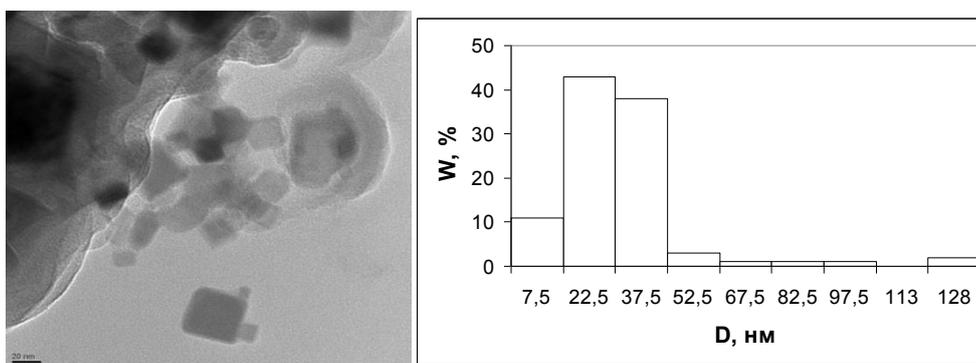


Рис. 2. Общий вид наночастиц нитрида титана TiN и их распределение по размерам.

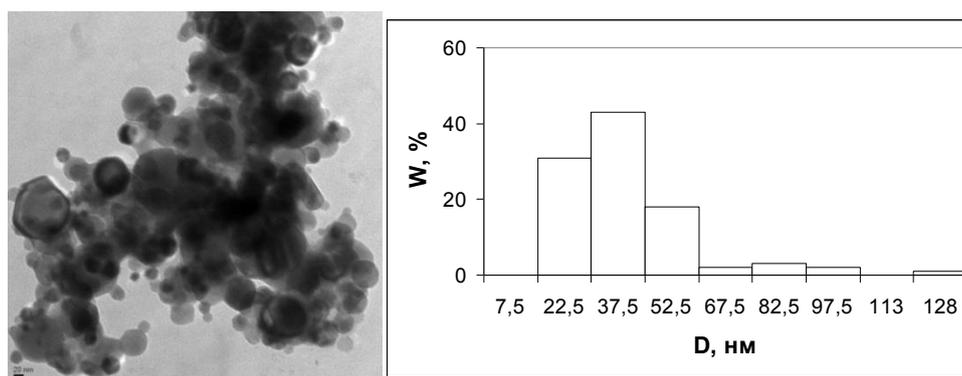


Рис.3. Общий вид частиц порошка Y₂O₃ и их распределение по размерам.

Как видно из рис.2 - рис.3 средний размер наночастиц 22,5 – 37,5 нм. Исследования проводили на пластинчатых образцах углеродистой стали. На поверхность образцов наносиласьшликерная обмазка, состоящая из композиционного наплавочного порошка и смеси тугоплавких наночастиц (TiN, Y₂O₃). В качестве связующего вещества использовался цапонлак, разбавленный ацетоном. Обработку опытных и контрольных (без наномодифицирующей

добавки) образцов проводили с помощью CO₂-лазера непрерывного действия мощностью 0,6 - 1,2 кВт в защитной атмосфере гелия при различных скоростях перемещения лазерного луча. Полученные образцы разрезали в поперечном направлении. Затем последовательно шлифовали на абразивной бумаге и полировали с использованием пасты оксида кремния 0,05 мкм. Травление хромоникелевой стали осуществляли химическим раствором, содержащим HCl и HNO₃ в соотношении 3:1 в течение 20-25 с. Микроструктурные исследования выполняли с использованием оптического (ОМ, Carl Zeiss Axio Observer Z1m) и растрового электронного микроскопа (РЭМ, Carl Zeiss EVO 50 XVP), оснащенного спектрометром, для проведения микрорентгеноспектрального анализа (МРСА, Oxford Instruments INCA X-ACT). Микротвердость по Виккерсу (Wolpert Group 420 MVD) оценивали на металлографических образцах. Нагрузка на алмазный индентор составляла 0,49 Н, а расстояние между отпечатками – 0,3 мм. Среднее значение микротвердости оценивали по четырем измерениям.

Результаты исследования.

Некоторые результаты металлографических исследований опытных образцов представлены на рис. 4 – рис.8. Формирование структуры и свойств наплавляемого под действием непрерывного лазерного излучения упрочненного покрытия зависит от химического состава, толщины шликерного слоя, мощности и скорости перемещения лазерного луча.

При наплавке порошкового материала, содержащего упрочняющую фазу важное значение имеет равномерное распределение частиц этой фазы по всему объему наплавленного слоя. На рис. 4 представлена микрофотография поперечного сечения опытного образца с наплавленным

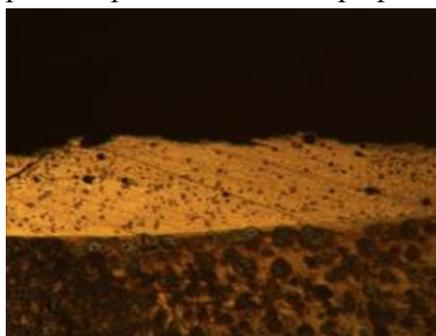


Рис.4. Микрофотография поперечного сечения покрытия с упрочняющей WC-фазой и наномодифицирующей обавкой.

слоем, указывающая на достаточно равномерное распределена упрочняющей карбидной фазы по сечению слоя и хорошее (без дефектное) сплавление с подложкой без глубокого ее проплавления и, следовательно, без существенного перемешивания наплавочного металла с материалом подложки. Добавка наномодификатора оказывает существенное влияние на эволюцию упрочняющей фазы в процессе лазерной наплавки порошковой композиции. Это следует из анализа микрофотографий поперечных сечений покрытий при различных концентрациях m_p введенных наномодифицирующих добавок (рис. 5), полученная при

мощности луча $W = 0,65$ кВт, скорости перемещения лазерного луча $v = 0,3$ м/мин, диаметре фокального пятна равным 2 мм и толщине шликерного слоя 0,2 мм.

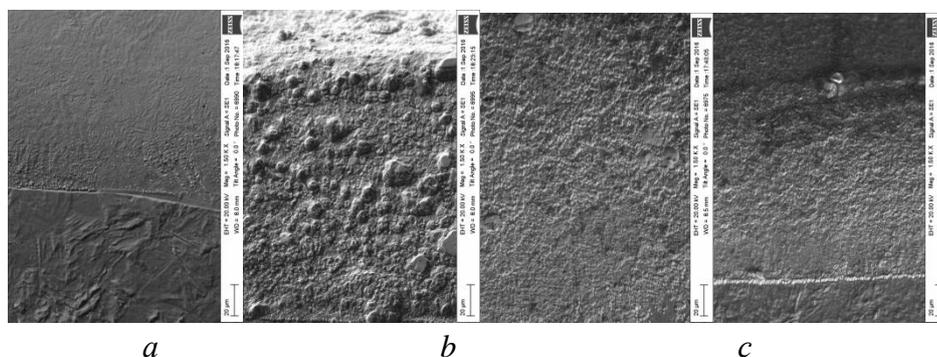


Рис. 5. Макроструктура поперечных сечений образцов с упрочняющими покрытиями, содержащих различные количества наномодифицирующих (НМ) добавок: а – без НМ, б – 0,1 % НМ, с – 0,2 % НМ, d – 0,4%, % по массе.

Не трудно видеть, что при отсутствии модифицирующей добавки в наплавляемом порошке $m_p = 0$ происходит интенсивное растворение карбида вольфрама, особенно в верхних областях покрытия. При $m_p = 0,1$ % в покрытии наблюдаются как крупные, так и мелкие частицы WC, однако с увеличением количества наномодификатора ($m_p = 0,2$ %) размер карбидной фазы резко убывает, оставаясь равномерно распределенной по сечению слоя, и эта тенденция продолжается с последующем увеличением вводимого модификатора ($m_p = 0,4$ %).

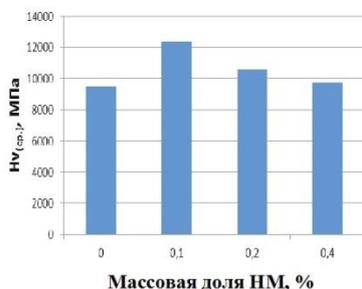


Рис. 6. Диаграмма изменения микротвердости образцов в зависимости от массовой доли НМ.

Соответственно этому падает твердость покрытия (рис. 6). Видно, что наибольшей микротвердостью обладает образец с модифицирующей добавкой равной 0,1 % НМ.

Для анализа износостойкости покрытий применялся 3 D-профилометр MICRO MEASURE 3D station французской фирмы STIL. Измерения были проведены по схеме (см.

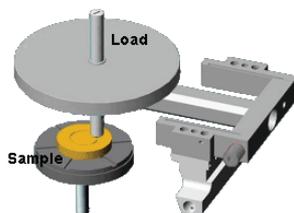


Рис.7. Кинематическая схема механизма исследования износостойкости .

рис. 7): вращение образца при неподвижном контртеле. Нагрузка на алмазный конус составляла 5 Н, конечное число оборотов образца – 2500. С помощью микрометрической системы «Micromesure System STIL» (Science et Techniques Industrielles de la Lumere. STILS. A, Франция) в непрерывном режиме фиксировали силы трения с последующим пересчетом в абсолютные значения коэффициента трения. С помощью 3D-профилометра MICRO MEASURE 3D station французской фирмы STIL, по окончании процесса резания, были проведены измерения профиля поперечного резания алмазным контртелом поверхности металлокерамических образцов с численным определением глубины резания и площади поперечного сечения канавки резания, что характеризует износостойкость покрытия. На рис.8 представлена диаграмма относительных глубин реза $\varepsilon = h_i/h_0$ в зависимости от массовой доли наномодифицирующей добавки, где h_i – глубина реза модифицированного слоя, h_0 – глубина реза слоя без наномодификатора.

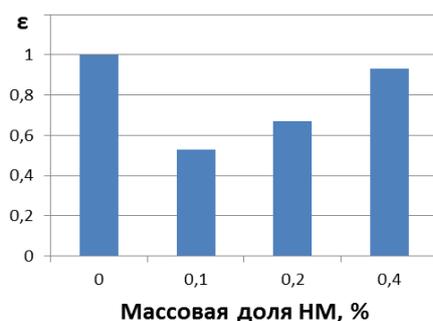


Рис. 8. Относительная глубина реза (износа) с учетом различного содержания (НМ) в композиционном материале ПС-12НВК-01.

Как видно из диаграммы наименьший износ (максимальная износостойкость) наблюдается в образце, полученном с 0,1% по массе модификатора в композиционной смеси, что почти в 2 раза больше, чем у образца с покрытием без наномодифицирующей добавки. Полученная закономерность согласуется с диаграммой микротвердости (рис. 6).

Таким образом, исследования структуры и механических свойств защитных покрытий показывают, что рациональным содержанием для повышения стойкости композиционных покрытий системы Ni-Cr-B-Si-Fe/WC является добавка 0,1% по массе наномодификатора в композиционном материале ПС-12НВК-01.

2. Численное моделирование теплофизических процессов высокочастотной индукционной обработки стали с наномодифицирующими добавками

Постановка задачи

Рассматривается воздействие высокочастотного электромагнитного поля на перемещающуюся с постоянной скоростью металлическую подложку. Схему рассматриваемого процесса иллюстрирует рис. 9.

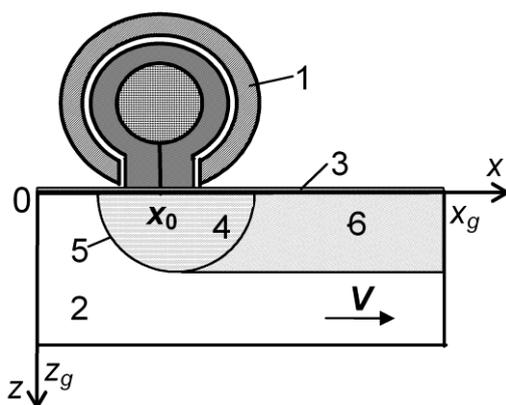


Рис. 9. Схема индукционной обработки поверхности пластины
1 – индуктор, 2 – металлическая подложка и частицы модифицирующего материала (3) на её поверхности, 4 – расплав, 5 – граница проплавленной зоны, 6 – модифицированный металл

Цилиндрическая головка индуктора магнитного поля расположена над плоской поверхностью пластины из углеродистой стали. Индукционное воздействие на подложку осуществляется в области пятна радиуса r_0 . Распределение электромагнитной энергии в металле

описывается эмпирическими формулами используемыми в инженерных тепловых расчётах индукционных нагревателей [9]. Поверхность подложки покрыта слоем специально подготовленных модифицирующих наноразмерных частиц тугоплавкого соединения, которые после проникновения в расплав служат активными центрами кристаллизации [8]. Пластина движется с постоянной скоростью V вдоль оси x , поэтому процессы, происходящие в ней под воздействием энергии высокочастотного электромагнитного поля – разогрев, плавления и последующее затвердевание металла, рассматриваются в квазистационарном приближении. Фазовый переход происходит при температуре фазового перехода материала подложки $T_m = (T_s + T_l)/2$, где T_s, T_l температуры солидуса и ликвидуса сплава соответственно. Предполагается, согласно [10], что наноразмерные частицы с поверхности равномерно распределяются по всему объёму расплава. После перемещения пластины из области воздействия индуктора за счет отвода тепла в не разогревшийся материал и теплообмена с окружающей средой происходит остывание расплава и его затвердевание в предположении, что все проникшие частицы являются центрами кристаллизации. Для защиты металла от окисления поверхность обрабатываемой пластины обдувается инертным газом. Границы x_g, y_g, z_g рассматриваемой области выбраны таким образом, чтобы их положение не оказывало влияние на исследуемые процессы.

Для упрощения задачи считается, что теплофизические характеристики жидкой, твердой и двухфазной сред одинаковые и не зависят от температуры. Массовое содержание частиц m_p проникающих в расплав мало ($m_p \leq 0,05\%$), их диаметр d_p много меньше характерного размера жидкой лунки, так что влиянием включений на физические параметры расплава можно пренебречь. Количество растворённых примесных компонентов в расплаве незначительно, так что можно не учитывать их влияние на температуру фазового перехода, полагая $T_m = const$. Плавление металла рассматривается в приближении Стефана. Предполагается, что при рассматриваемых режимах нагрева небольшие величины конвективных скоростей в расплаве обуславливают плоскую форму свободной поверхности жидкости.

Математическая модель

В декартовой системе координат процессы теплопереноса, плавления и кристаллизации металла в пластине с учетом объемных источников тепла описываются в квазистационарном случае уравнением

$$c_p \rho V \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \kappa \rho V \frac{\partial f_s}{\partial x} + w_0(x, y, z),$$

$$0 \leq x \leq x_g, \quad 0 \leq y \leq y_g, \quad 0 \leq z \leq z_g,$$

где T – температура; ρ – плотность материала пластины; c_p – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; κ – удельная теплота плавления; f_s – доля твердой фазы в материале; w_0 – объемная плотность внутренних источников тепла, для которой, согласно [7], используется соотношение

$$w_0(x, y, z) = \frac{P_0}{r_0} w(x, y, z).$$

Здесь $w(x, y, z)$ – безразмерная функция, зависящая только от координат, r_0 – характерный размер, в нашем случае радиус пятна индукционного воздействия на поверхность подложки, p_0 – удельная мощность, поглощаемая единицей поверхности нагреваемого тела.

Считаем, что центральная точка «пятна» индукционного воздействия радиуса r_0 расположена в точке $(x_0, 0, 0)$. В этом случае распределение энерговыделения по толщине пластины, согласно [9], можно описать следующей зависимостью:

$$w(x, y, z) = e^{-z/\Delta_1}, \quad ((x - x_0)^2 + y^2)^{0.5} \leq r_0,$$

где Δ_1 – глубина проникновения тока в материал (м), т.е. толщина скинслоя, $\Delta_1 = 503\sqrt{\rho_{e1}/(\mu_1 f)}$, ρ_{e1} – удельное электрическое сопротивление, μ_1 – относительная магнитная проницаемость при разогреве металла ниже температуры магнитных превращений T_K (точка Кюри), f – рабочая частота генератора поля (Гц). При достижении температуры магнитных превращений относительная магнитная проницаемость снижается до значения $\mu_2 = 1$, а удельное электрическое сопротивление возрастает до величины ρ_{e2} , вследствие чего глубина проникновения тока в материал становится $\Delta_2 = 503\sqrt{\rho_{e2}/(\mu_2 f)}$, а распределение энергии по глубине подложки описывается выражениями

$$w(x, y, z) = \begin{cases} e^{-z/\Delta_2}, & 0 \leq z \leq z_k(x, y) \\ e^{-z_k/\Delta_2} e^{-(z-z_k)/\Delta_1}, & z > z_k, ((x - x_0)^2 + y^2)^{1/2} \leq r_0, \end{cases}$$

где $z_k(x, y)$ – расстояние от поверхности подложки до точки с температурой магнитных превращений ($T = T_K$).

На поверхности пластины $z=0$ вне области индукционного нагрева $((x - x_0)^2 + y^2)^{0.5} \leq r_0$ задаются граничные условия

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = (\alpha_k + \alpha_r)(T - T_g).$$

Здесь T_g – температура защитного газа, $\alpha_r = \varepsilon \sigma_0 (T^2 + T_g^2)(T + T_g)$, ε – приведённая степень черноты, σ_0 – константа Стефана-Больцмана, α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи.

На плоскости $y = 0, 0 \leq x \leq x_g, 0 \leq z \leq z_g$ используется условие симметрии

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0.$$

Условия на остальных границах следующие:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad x = x_g; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad z = z_g; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad y = y_g.$$

При плавлении материала скорость движения v_n каждой точки границы «расплав-твёрдая фаза» $\zeta(x, y, z)$ при $T = T_m$ определяется условием

$$\kappa v_n = \lambda (\partial T / \partial \mathbf{n}|_{T=T_m^-} - \partial T / \partial \mathbf{n}|_{T=T_m^+}),$$

где \mathbf{n} – единичный вектор нормали.

При затвердевании предполагается, что все наночастицы являются центрами кристаллизации, тогда доля твердой фазы f_s в двухфазной зоне расплава определяется согласно [11] из соотношения

$$f_s = 1 - \exp\{-\Omega N_p\}$$

где

$$\Omega(x - \xi, y, z) = \frac{4\pi}{3} \left[r_p + \frac{K_v}{V} \int_{\xi}^x (T_m - T) d\zeta \right]^3$$

- объем растущего зародыша, возникшего в точке $\xi(x, y, z)$ остывающего расплава при температуре T_m , N_p – число наноразмерных частиц в единице объема расплава, $r_p = d_p/2$, K_v – эмпирическая константа скорости роста кристаллов. Полагаем, что концу затвердевания соответствует $f_s = 0,95$.

Алгоритм реализации математической модели

При реализации описанной выше математической модели целесообразно перейти к безразмерным переменным

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \bar{a} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + St \frac{\partial f_s}{\partial x} + Ki \bar{a} w(x, y, x)$$

Безразмерные параметры определяются с помощью характерного размера r_0 , скорости V и температуры T_m : $x = x/r_0$, $y = y/r_0$, $z = z/r_0$, $\theta = T/T_m$; $St = \kappa/(c_p T_m)$ – число Стефана; $\bar{a} = a/(r_0 V)$, $a = \lambda/(c_p \rho)$; $Ki = (p_0 r_0)/(\lambda T_m)$ – число Кирпичёва.

Приводим уравнение к виду

$$-\bar{a} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) = St \frac{\partial f_s}{\partial x} + Ki \bar{a} w(x, y, x),$$

где $\mu = \exp\left\{-\int_0^x \frac{1}{\bar{a}} d\xi\right\}$, что позволяет при его аппроксимации получить консервативную монотонную схему второго порядка точности по пространственным переменным.

Для численной реализации модели применялся конечно-разностный алгоритм. Дискретизация пространственной расчетной области осуществлялась на $I \times J \times K$ ячеек в виде параллелепипедов. Распределение температуры описывалось значениями в узлах сетки. Разностные уравнения строились посредством аппроксимации балансных соотношений, получаемых интегрированием уравнения с учетом соответствующих граничных условий. В результате получаем систему вида

$$A\mathbf{\theta} = \mathbf{F},$$

где A – блочно-трёхдиагональная матрица с диагональным преобладанием, $\mathbf{\theta}$, \mathbf{F} – векторы. Полученная система уравнений реализуется итерационным методом

$$(\theta^n - \theta^{n-1})/\tau + A\theta^n = F^n,$$

где n – шаг итерации, τ – итерационный параметр, $\theta^0 = \theta_0$.

Система уравнений не является линейной, так как в ходе её решения меняется F^n , учитывающая выделение или поглощение тепла при фазовом переходе, влияющего на тепловой баланс в системе. С этой целью проводится ряд итераций по уточнению решения

$$(\theta^{n,k} - \theta^{n-1})/\tau + A\theta^{n,k} = F^{n,k-1}.$$

Решение системы прекращается по достижению требуемой точности.

Результаты численных экспериментов

Численные исследования проводились при следующих параметрах: $r_0=0,001$ м, $x_g=0,006$ м, $y_g=0,003$ м, $z_g=0,003$ м; $V=0,005-0,025$ м/с; $T_g=300$ К; $T_0=300$ К; $p_0=(3,5-4,0)\cdot 10^8$ Вт/м²; $f=4\cdot 10^5$ Гц; $\alpha_k=100$ Вт/(м²·К). Теплофизические свойства сплава (средние в диапазоне температур) [6]: $\rho=7065$ кг/м³, $c_p=787$ Дж/(кг·К), $\lambda=27$ Вт/(м·К), $\kappa=2,77\cdot 10^5$ Дж/кг, $T_m=1745$ К, $\varepsilon=0,7$, $\sigma_0=5,7\cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); $T_K=1141$ К; $\rho_{e1}=5,2\cdot 10^{-7}$ Ом·м, $\mu_1=14$, $\rho_{e2}=1,0\cdot 10^{-6}$ Ом·м, $\mu_2=1$; $K_v=0,025$ м/(с·К), $d_p=10^{-7}$ м, $N_p=2,0\cdot 10^{15}$ 1/м³.

Рисунки 10 - 12 иллюстрируют полученные результаты. На рис. 10 отображено изменение температурного поля на поверхности ($x, y, 0$) обрабатываемой подложки (рис. 10 а) и в плоскости ($x, 0, z$), симметрично рассекающей подложку в направлении её движения (рис. 10 б) при $V=0,015$ м/с, $p_0=3,5\cdot 10^8$ Вт/м².

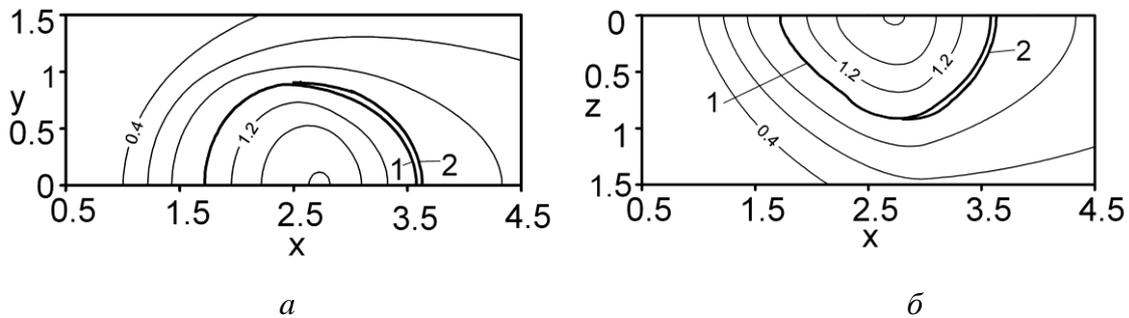


Рис. 10. Изотермы температурного поля θ на поверхности (а) и в плоскости симметрии (б).

1 – изотерма температуры (T_m) фазового перехода при плавлении металла и начала кристаллизации; 2 – изотерма температуры окончания кристаллизации

Из полученных результатов следует, что разогрев и плавление металла происходит непосредственно в области индукционного воздействия с центральной точкой $x_0=2$, при этом точка максимального разогрева смещена по ходу движения подложки. Ширина проплавленной лунки составляет около 900 мкм, а глубина – около 800 мкм, что значительно больше, чем при лазерной обработке лучом с такими же значениями радиуса и мощности [10]. После того, как разогретая часть подложки перемещается из области индукционного нагрева, расплав остывает, чему способствует низкая начальная температура подложки и теплоотвод с её поверхности. После снятия перегрева в металле начинается объемно-последовательная кристаллизация, причем ширина двухфазной зоны может достигать при рассматриваемых параметрах 100 мкм,

что укладывается во временной интервал около 0,067 с. Как показали численные расчеты, условий для гомогенного зарождения кристаллов при наличии в расплаве высокоактивированных наноразмерных частиц не возникает.

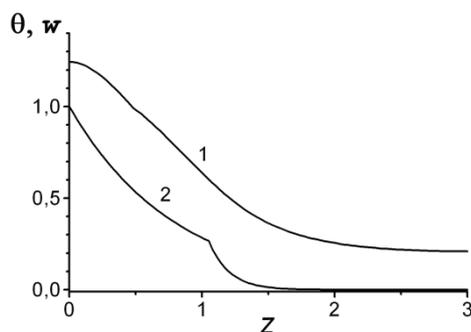


Рис. 11. Изменение температуры θ (1) и функции w (2) в стальной подложке, нагретой выше точки Кюри на глубину $z \approx 1.1$

Рисунок 11 иллюстрирует распределения безразмерных температуры и энерговыделения по толщине подложки в центральной точке ($x_0=2$) области индукционного воздействия. Из представленных результатов следует, что глубина проникновения тока не превышает половины толщины рассматриваемой пластины, а основное выделение энергии происходит в слое металла нагретого выше температуры магнитных превращений. Как следствие, температура принимает максимальные значения на обрабатываемой поверхности и монотонно снижается по мере удаления от неё, разогрева движущейся подложки по всей толщине не происходит.

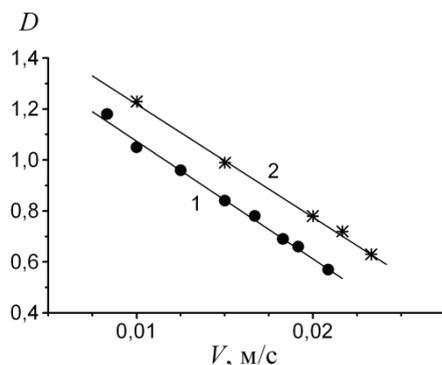


Рис. 12. Отношение D ширины проплавленной лунки относительно диаметра пятна индукционного воздействия в зависимости от скорости перемещения подложки при $p_0 = 3,5 \cdot 10^8$ Вт/м² (1), $4,0 \cdot 10^8$ Вт/м² (2)

●, * – результаты расчётов

Рисунок 12 отражает влияние скорости перемещения подложки V на ширину области проплавления поверхностного слоя металла. Из результатов расчётов следует, что при малых скоростях движения ширина проплавленной лунки может быть шире зоны воздействия высокочастотного индукционного поля, но при этом происходит значительный перегрев расплава в его центральной зоне. С увеличением скорости обработки ширина модифицированного участка поверхностного слоя подложки сокращается, снижается и

величина перегрева металла. При этом, если оценивать производительность процесса модифицирования поверхностного слоя металла при рассмотренных скоростях, то получено, что при более высоких скоростях за одно и то же время площадь обрабатываемой поверхности на 20% больше чем при минимальных. В пользу увеличения скорости обработки необходимо отметить, что уменьшение перегрева относительно температуры фазового перехода положительно влияет на структуру формирующихся течений в расплаве и, как следствие, однородность распределения попадающих в него модифицирующих частиц [10].

Выводы

Результаты численного моделирования показали, что использование индукционной обработки для модифицирования расплава наноразмерными частицами тугоплавких соединений позволяет улучшить структурные составляющие затвердевшего металла на значительно большей глубине, чем при применении лазерного излучения. Ширина зоны фазового перехода оценивается около 100 мкм, а время затвердевания не превышает 0,1 с. Из анализа полученных данных представляется возможным использование таких параметров, как скорости перемещения подложки и плотности внутренних источников энергии, в качестве механизмов управления процессом модификации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Goia, F., M. de Lima Surface Hardening of an AISI D6 Cold Work Steel Using a Fiber Laser / Journal of ASTM International. - 2011. - № 8(2). - P. 315-318/
2. Bernacki, A. V. Laser surface alloying of steel products (Review). Welding production. - 2013. - № 12. - S. 3-10.
3. ТУ 48-19-383-91. Порошки для наплавки и напыления. Технические условия. - М.: Торезтврдосплав, 1991.
4. Арзамасов Б.Н. Материаловедение / Арзамасов Б.Н. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2008. - 648 с.
5. Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами / Сабуров В.П., Еремин Е.Н., Черепанов А.Н., Миннеханов Г.Н. Омск: изд-во ОмГТУ. 2002, 212 с.
6. А.М. Оришич, А.Н. Черепанов, В.П. Шапеев, Н.Б. Пугачева. Наномодифицирование при лазерной сварке сплавов. Новосибирск: Сибирское научное издание, 2014. 252 с.
7. Сидоров, А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / М.: Машиностроение, 1987. - 192 с.
8. Сабуров В.П., Еремин Е.Н., Черепанов А.Н., Миннеханов Г.Н. Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами. Омск: изд-во ОмГТУ. 2002, 212 с.
9. Павлов Н.А. Инженерные тепловые расчёты индукционных нагревателей. М.: Энергия, 1978. 120 с.
10. Попов В.Н., Черепанов А.Н., Дроздов В.О. Моделирование конвективного тепло-массообмена при лазерной обработке металла с использованием модифицирующих материалов // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 2013. № 12. С. 3-7.
11. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования слитка. М.: Машиностроение. 1979. 335 с.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все этапы и задания, представленные в Проекте, выполнены в полном объеме в соответствии с планом научно – исследовательских работ. Проведен обширный цикл расчетно-теоретических и экспериментальных работ по исследованию влияния специально подготовленных наноразмерных тугоплавких соединений на структуру и свойства упрочняющих покрытий, получаемых с помощью высокоэнергетических воздействий (лазерного луча и высокочастотного индукционного поля). Произведен научно – обоснованный выбор наплавочных материалов и наномодифицирующих материалов, способов их подготовки и ввода в расплав. С использованием современных методов электронной микроскопии и методов исследования механических свойств материалов проведен анализ микроструктуры, химического состава, прочности и износостойкости полученных опытных образцов и их сравнение с контрольными (немодифицированными) образцами. На основе проведенных опытных данных определены рациональные тепловые режимы обработки и содержание наномодифицирующих добавок, позволяющих существенно повысить механические и служебные свойства изделий. Так, применение наномодифицирующей добавки в виде смеси $TiN + Y_2O_3$ в композиционный наплавочный порошок ПС-12НВК-01 в количестве порядка 0,1% позволяет увеличивать абразивную стойкость защитного покрытия почти в 2 раза по сравнению с покрытием, полученным исходной наплавочной смесью без наномодификатора. Разработаны математические модели термоконвективных процессов переноса тепла и наномодифицирующих тугоплавких частиц в жидкометаллической ванне при лазерном воздействии на подложку. Численными расчетами показано, что с помощью поверхностно активных веществ и рациональных режимов лазерной обработки можно эффективно управлять течением расплава в ванне и распределением наночастиц, обеспечивая их гомогенность в ее объеме. При непрерывном охлаждении расплава это способствует формированию однородной высокодисперсной структуры в наплавляемом слое. Полученные результаты и предложенные технологические решения не уступают известным отечественным и зарубежным достижениям. Использование наноструктурированных композиций, содержащих нанодисперсные тугоплавкие соединения в интерметаллической матрице для поверхностного упрочнения при наплавке и в технологии лазерного соединения разнородных металлов с промежуточной вставкой является пионерским решением.

Практическая значимость. Применение наномодифицирующих добавок при поверхностной наплавке защитных покрытий стали, содержащих упрочняющие фазы, открывает новые технологические возможности в повышении конструкционной и эксплуатационной стойкости деталей и механизмов в условиях абразивного и абразивно-ударного износа (горнодобывающее и обогатительное оборудование, сельхозтехника и др.).

4. ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2016 г. в соответствии с государственным заданием

Монографии

1. А.М. Оришич, А.Н. Черепанов, В.П., Шапеев, Н.Б. Пугачева. Лазерная сварка металлов с применением нанопорошковых модификаторов. Учебное пособие. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2016. 267 с.

Статьи в рецензируемых журналах

2. V.I. Isaev a, A.N. Cherepanov a, V.P. Shapeev. Numerical study of Heat Modes of laser welding of dissimilar metals with an intermediate insert// International Journal of Heat and Mass Transfer. 99 (2016), pp. 711–720.
3. A. N. Cherepanov, V. I. Mali, Iu. N. Maliutina, A. M. Orishich, A. G. Malikov, V. O. Drozdov. Laser welding of stainless steel to titanium using explosively welded composite inserts. Int. J. Adv. Manuf. Technol. DOI 10.1007/s00170-016-9657-26. (2016)
4. В.П. Шапеев, В.А. Беляев. Варианты метода коллокации и наименьших невязок повышенной точности в области с криволинейной границей. Вычислительные технологии. 2016, т. 21, № 5. С. 95-110)/ (НВУW).
5. A.N. Cherepanov, A.M. Orishich1, A.G. Malikov, V.E. Ovcharenko. Modification of structure and strength properties of permanent joints under laser beam welding with application of nanopowder modifiers// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 142 (2016) 012092 doi:10.1088/1757-899X/142/1/012092.
6. A. N. Cherepanov, V. I. Mali, A. M. Orishich, A. G. Malikov, V. O. Drozdov, and Y. N. Malyutina. Welding of titanium and stainless steel using the composite insert// AIP Conference Proceedings 1783, 020023.1 – 020023.4 (2016); doi: 10.1063/1.4966316.
7. А. Н. Черепанов, В. Н. Дроздов, А. Г. Маликов, А. М. Оришич, Д. О.Муль, Л. И. Шевцова. Влияние наноструктурированных порошковых композиций на характеристики поверхностного слоя стали при лазерной обработке// Тяжелое машиностроение. 2016. № 6. С. 2- 4.
8. Galevsky G.V., Rudneva, V.V., Cherepanov A.N., Galevsky S.G., Efimova K.A. Plasma metallurgical production of nanocrystalline borides and carbides. 2016, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 150 (1), 012043.
9. Galevsky G.V., Rudneva V.V., Cherepanov A.N., Galevsky S.G., Efimova K.A . Protective metal matrix coating with nanocomponents. 2016. IOP Conference .Series: Materials Science and Engineeringю 150 (1), 012044.
10. Drozdov V.O., Malikov A.G., Orishich A.M., Cherepanov A.N. Creation of heterogeneous materials by laser cladding of heterogeneous powder compositions on the base of steel and nickel // AIP Conference Proceedings. –S.l.: 2016. –Vol. 1783. –P. 020045. DOI: 10.1063/1.4966338.

Конференции

1. Шапеев В.П., Исаев В.И., Черепанов А.Н. Моделирование лазерной сварки пластин из разнородных металлов с применением композитных вставок. Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций». 19-23 сентября 2016 г. ИФПМ СО РАН. Тезисы докладов. С. 400-401.
2. Shapeev V.P. Collocation and least residuals method and its applications [Электронный ресурс] // Mathematical Modeling and Computational Physics (ММСР 2015) (Slovakia, Stara Lesna, 13-17 Jul., 2015) : Proceedings (EPJ Web of Conferences). -Vol.108. -S.l., 2016. -P. 01009 - (12). DOI: 10.1051/epjconf/201610801009
3. А. Н. Черепанов, В. К. Манолов. Наномодифицирование в литейном производстве. Тез. Докл. на VII Всероссийской конференции с международным участием «Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии». КРИС-2016, 6–9 апреля , 2016. С.70-72. Ижевск.

4. А.Н. Черепанов, А.М. Оришич, А.Г. Маликов, В.О. Дроздов, В.Е. Овчаренко. Повышение качества неразъемных соединений, получаемых лазерной сваркой с применением наномодифицирующих добавок/ Современные проблемы сварочного производства: сборник С568 научных трудов под ред.: М.А. Иванова, И.А. Ильина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – 332 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2013-2015 гг. в соответствии с государственным заданием

Монографии

1. Черепанов А.Н., Оришич А.М., Малов А.Н., Марусин В.В. Модификация поверхности деталей породоразрушающих импульсных машин с помощью высокоэнергетических воздействий (лазерное, взрывное, электронно – лучевое) / Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. Интегр. Проекты СО РАН. Вып. 43. С. 181 – 191.
2. В.М. Фомин, А.М. Оришич, А.Н. Черепанов. Лазерная сварка стали и сплавов с применением нанопорошковых наномодифицирующих добавок. С. 190 - 212/ Научное обеспечение инновационного развития и повышения эффективности деятельности железнодорожного транспорта: коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»/ под ред. Б.М. Лapidуса. М: Mittel Press, 2014. 288 с.
3. Модификация зеренной структуры и прочностных свойств никелевого сплава наноразмерными частицами тугоплавких химических соединений (С. 205–311) / Современные тенденции модифицирования структуры и свойств материалов. Под общей редакцией Н.Н. Коваля и В.Е. Гранова. Томск. Изд-во НТЛ, 2015.
4. Черепанова В.К., Черепанов А.Н., Шарапов В.Н. Модели динамики фазовых превращений в магматических системах и металлических сплавах. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. 243 с. ISBN 978-5-7782-2761-3.

Статьи в цитируемых журналах

1. A. Cherepanov, V. Manolov, V. Poluboyarov. Grey Iron Properties Modified by Nanopowders of Refractory Compounds// Journal of Materials Science and Technology, 2013, Vol. 21, No3. P. 161 – 170.
2. В.Н. Попов, А.Н. Черепанов, В.О. Дроздов, Моделирование конвективного теплопереноса при лазерной обработке металла с использованием модифицирующих материалов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2013. №12. С.21 -24.
3. Пугачева Н. Б., Трушина Е. Б., Пугачева Е. И., Оришич А. М., Черепанов А. Н. Структура сварных швов стали 18X18N10T и титанового сплава В1-0 с промежуточной медной пластиной после лазерного проплавления // Вопросы материаловедения. 2013. № 1(73). С. 166 -174.
4. Шапеев В.П., Черепанов А.Н. Численное моделирование лазерной сварки плоских деталей с использованием модифицирующих нанопорошков. Теплофизика и аэромеханика. 2013, Т. 20 . № 2. С. 239–253.
5. Черепанов А.Н., Оришич А.М., Шапеев В.П., Лазерная сварка металлов и сплавов с применением нанопорошковых модифицирующих добавок. Теория, эксперимент// Физическая мезомеханика. 2013, Т. 16. № 1, с. 91–104.

6. Протопопов Е.В., Селезнев Ю.А., Черепанов А.Н., Чинокалов В.Я., Ганзер Л.А., Фойгт Д.В. Модифицирование металла нанопорошковыми инокуляторами на сортовой МНЛЗ для повышения качества проката // Известия вузов. Черная металлургия. - 2013. -№6. -С. 33-35.
7. Протопопов Е.В., Селезнев Ю.А., Черепанов А.Н., Фойгт Д.В., Ганзер Л.А., Айзатулов Р.С. Модифицирование металла нанопорошковыми материалами для повышения качества слябовой непрерывно литой заготовки. Изв. ВУЗов. "Черная металлургия". – 2013. - № 12. с. 8-11.
8. A. N. Cherepanov, A. M. Orishich, V. I. Mali. Laser welding of stainless steel with a titanium alloy with the use of a multilayer insert obtained in an explosion// Combustion, Explosion, and Shock Waves. July 2014, Volume 50, Issue 4, pp 483-487.
9. А.М. Оришич, А.Н. Черепанов, А.Г. Маликов. Лазерная микрометаллургия // Металлообработка. Специализированный журнал. 2014. № 4. С. 40 – 43.
10. V. O. Drozdov and A. N. Cherepanov. Melting Point of the Coating on a Refractory Nanoparticle // Steel in Translation, 2014, Vol. 44, No. 2, pp. 96–98 (ISSN 0967 0912).
11. A. N. Cherepanov, V. N. Popov. Numerical analysis of the influence of surface-active substance in the melt on the distribution of modifying particles and crystallization at the treatment of metal surface by a laser pulse// Thermophysics and Aeromechanics. June 2014, Volume 21, Issue 3, pp 355-363.
12. Н. М. Божанова., В. К. Манолов, Р. Н. Димитрова, Р. Л. Лазарова, А. Н. Черепанов. Повышение качества отливок из алюминиевых сплавов с помощью наномодифицирования // Тяжелое машиностроение. 2014. № 6. С. 2 - 6.
13. В.Г. Буров, А.Г. Маликов, А.М. Оришич, А.Н. Черепанов. Лазерная термообработка с оплавлением поверхности с целью повышения эксплуатационных свойств инструмента // Сварщик в России. 2014. №3. С 24 – 26.
14. Пугачева Н.Б., Вичужанин, Д.И. Трушина Е.Б., Антенорова Н.П, Мичуров Н.С., Оришич А.М., Черепанов А.Н., Маликов А.Г. Влияние нанопорошков на усталостную прочность лазерных сварных швов сплава ВТ1-0. Деформация и разрушение металлов . 2014. №7. С.7-12.
15. А.М. Orishich, А.Г. Malikov, А.Н Cherepanov. Effect of Nanopowder Modifiers on Properties of Metal Laser-welded Joints // Elsevier Physics Procedia. 2014. V. 56. P. 507-514.
16. В.В. Марусин, В.Г. Щукин. Упрочнение фрикционного клина вагонной тележки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты), 2015, №2, с.17-23.
17. А.Н. Cherepanov, V.E. Ovcharenko. Effect of Nanostructured Composite Powders on the Structure and Strength Properties of the High_Temperature Inconel 718 Alloy // The Physics of Metals and Metallography, 2015, Vol. 116, No. 12, pp. 1279–1284.
18. В. Г. Щукин, В. В. Марусин. Индукционное борирование сталей // Материаловедение, 2015, № 4, с. 27-32.
19. А.Н. Черепанов, А.М. Оришич, Пугачева Н.Б., В.П. Шапеев. Исследование структуры и свойств соединений титан – нержавеющей сталь с использованием промежуточных вставок и нанопорошков. // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т.22. №2. С.143 -150.
20. А.Н. Черепанов, В.Е. Овчаренко, Г. Лю, Л. Цао. Модификация структуры и свойств никелевых сплавов наноструктурированными композиционными порошками // Теплофизика и аэромеханика, 2015. Т. 22, № 1. С. 131 – 136.
21. Н.Б. Пугачева, Д.И. Вичужанин, Е.Б. Трушина, Н.П. Антенорова, А.М. Оришич, А.Н. Черепанов, А.Г. Маликов. Влияние нанопорошков на усталостную прочность лазерных сварных швов стали 12Х18Н10Т. Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2015. № 3 (68). С. 89 – 98.

22. A. N. Cherepanov, V. P. Shapeev, b, and V. I. Isaev. Simulation of Heat Transfer Processes in Laser Welding of Dissimilar Metals with an Insert/High Temperature, 2015, Vol. 53, No. 6, pp. 841–846.
23. С.С. Кацнельсон, Г.А. Поздняков, А.Н. Черепанов. Исследование влияния наночастиц на структуру и свойства алюминиевого сплава, разлитого с помощью дискового кондукционного МГД-насоса. ПМТФ. 2015. Т. 56, № 5.

Конференции

1. V.E. Ovcharenko, A.N. Cherepanov, Liu Guangxun, Cao Lamei . The Structural Modification effect of composite inoculating particles on the grain structure formation / Prosidings in this ISSUE. 1st International Conference “Problems of Metallurgy and Materials Science”. Dedicated to the 90th Anniversary of the national Leader of Azerbaijan Heydar Aliev. 29 -30 April 2013. Baku. Scientific Works. Baku: AzTU. 2013. P.70 -75.
2. Ovcharenko V.E., Cherepanov A.N., Liu GM, Cao L. The structural modification effect of composite inoculating particles on the grain structure format-ion of nickel-base alloys. Proceedings of the 8th International Forum on Strategic Technology, Ulaanbaator, Mongolia, June 28 – July 1, 2013, vol.2, p.108-111.
3. Ovcharenko V.E., Cherepanov A.N., Liu Guangxun, Cao Lamei. Модификация зеренной структуры никелевого сплава композиционными инокуляторами// IV Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы для молодых ученых «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», сб. трудов – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013.-С.132-137.
4. А.Н. Черепанов, А.М. Оришич, В.И. Мали, В.О. Дроздов. Свойства сварных соединений титана с нержавеющей сталью с применением металлических вставок/ Докл.V Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине. 26-29 марта, 2013. Новосибирск: Параллель, 2013. Т.І. С. 272-274.
5. Шапеев В.П., Черепанов А.Н., Исаев В.И. Моделирование теплофизических процессов лазерной сварки пластин из разнородных сплавов с применением промежуточной вставки/ Докл. V Всероссийской конференции «Взаимодействие высоко-концентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине. 26-29 марта, 2013. Новосибирск: Параллель, 2013. Т. II. С. 192- 198.
6. Дроздов В.О., Маликов А.Г., Оришич А.М., Черепанов А.Н. Экспериментальное исследование лазерной сварки металлов с применением нанопорошковых добавок/ Докл.V Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине. 26-29 марта, 2013. Новосибирск: Параллель, 2013. Т.І. С. 97 – 101.
7. Дроздов В.О., Черепанов А.Н. Об устойчивости плакирующей поверхность дисперсной частицы металлического слоя в перегретом расплаве/Докл. V Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине. 26-29 марта,2013.Новосибирск: Параллель, 2013. Т.І. С.102–105.
8. Черепанов А.Н., Попов В.Н. Моделирование процессов в жидкометаллической лунке при лазерной обработке металла с использованием модифицирующих материалов/Докл.V Всероссийской конференции «Взаимодействие высоко-концентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине». 26-29 марта, 2013. Новосибирск: Параллель, 2013. Т.І. С. 275 – 278.

9. Н.М. Божанова, А.Н. Черепанов, Р.Н. Димитрова, Р.Л. Лазарова, В.К. Манолов. Влияние наноразмерных модифицирующих добавок структуру и свойства отливок из сплавов AlSi7Mg и AlSi12Cu2MgNi/ Докл. V Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине. 26-29 марта, 2013. Новосибирск: Параллель, 2013. Т. II. С. 21 – 23.
10. П. Кузманов, Р. Лазарова, А. Черепанов, В. Манолов. Структура и механические свойства отливок из чугуна GG25 и стали GX120Mn1, модифицированных нано-размерными порошками/ Докл. V Всероссийской конференции «Взаимодействие высоко-концентрированных потоков энергии с материалами в перспективных техно-логиях и медицине. 26-29 марта, 2013. Новосибирск: Параллель, 2013. Т. II. С. 101 – 109.
11. Черепанова В.К., Черепанов А.Н. Математическая модель термо – и гидродинамических процессов при эволюции эндогенных гидротермальных систем/ Материалы XII Всероссийского семинара «Динамика многофазных сред». 8-10 октября 2013. Под ред. В.М. Фомина, А.В.Федорова. Новосибирск: Параллель, 2013. С.175 – 177.
12. V.P. Shapeev, A.N., Cherepanov, V.I. Isaev. Numerical study of temperature fields at laser welding of steel and titanium with the use of an intermediate insert / 17th International conference on the methods of aerophysical research, June 30 – July 6, 2014, Novosibirsk. Abstracts. Part 1, p. 185-186.
13. Malikov A.G, Orishich A.M, Cherepanov A.N. Laser welding of light alloys with nano- modifying admixtures / 17th International conference on the methods of aerophysical research, June 30 – July 6, 2014, Novosibirsk. Abstracts. Part 1, P. 134 -135.
14. Pugacheva N.B., Michurov N.S., Orishich A.M., Cherepanov A.N., Malikov A.G. Fatigue strength and distruction type of austenitic steel and titanic alloy with a cooper insert laser welded seam 17th International conference on the methods of aerophysical research, June 30 – July 6, 2014, Novosibirsk. Abstracts. Part 1, P. 155 -156.
15. В.И. Исаев, В.П. Шапеев, А.Н. Черепанов. Математическая и численная модели лазерной сварки пластин из разнородных материалов. Доклад. Всероссийская конференция, приуроченная к 95-летию академика Л.В. Овсянникова "Новые математические модели в механике сплошных сред: построение и изучение", 18–22 апреля 2014. С. 60-61.
16. Черепанова В.К., Черепанов А.Н. О сублимировании пород литосферы над очагами базитовых расплавов [Электронный ресурс] // Докл. Всероссийской конф. «XXXI Сибирский теплофизический семинар», Новосибирск, 17-19 ноября 2014 г. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2014. - С. 302-305. - ISBN 978-5-89017-039-2.
17. П. Ташев, Н. Алексиев, А. Черепанов, В. Манолов. Модифицирование жидкой фазы наноразмерными порошками в процессах сварки и наплавки. Доклады VI Всероссийской конференции с международным участием. Т.2. Новосибирск: Параллель, 2015. С. 92-97.
18. Н.М. Божанова, В.Т. Панов, В.К. Манолов, А.Н. Черепанов, Р.Л. Лазарова. Влияние наноразмерных порошков на электрохимические характеристики алюминиевых протекторных анодов. Доклады VI Всероссийской конференции с международным участием. Т.2. Новосибирск: Параллель, 2015. С. 128-131.
19. Черепанов А.Н., Оришич А.М. Наномодифицирование в макро- и микро металлургических процессах. Доклады VI Всероссийской конференции с международным участием. Т.2. Новосибирск: Параллель, 2015. С. 131-145.

Таблица 2. Данные о публикациях по результатам исследований

индикатор	Ед. измерения	Всего за 2013-2016 гг.	2013	2014	2015	2016
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта	единиц	37	8	9	10	10
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	единиц	16	2	2	4	8
Число тезисов в конференциях	единиц	23	11	5	3	4
Число охраняемых объектов интеллектуальной собственности: зарегистрированных патентов в России зарегистрированных патентов за рубежом	единиц	нет				