

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента Смирнова Александра Николаевича**  
**на диссертационную работу Малушина Николая Николаевича**  
**«Физические основы комплексной технологии упрочнения теплостойких**  
**сплавов высокой твердости, сформированных плазмой в среде азота»,**  
**представленной на соискание ученой степени доктора технических наук**  
**по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»**

**Актуальность темы**

Важнейшей научной проблемой в физике конденсированного состояния является создание физических основ промышленной технологии получения новых теплостойких покрытий с высокой износостойкостью. Существующие технологии получения таких теплостойких покрытий обладают рядом недостатков, включающих образование холодных трещин, для предотвращения которых обязательно применяют предварительный и сопутствующий высокотемпературный подогрев и замедленное охлаждение деталей. В итоге наплавленные детали имеют неравномерную и низкую твердость и износостойкость, а высокие служебные характеристики высоколегированных теплостойких сплавов используются не в полной мере. Для восстановления высокой твердости и износостойкости детали после наплавки подвергают сложной термической обработке, что для многих видов деталей является затруднительным или даже практически невозможным. Поэтому актуальным является поиск способов наплавки, позволяющих получать наплавленные теплостойкие сплавы высокой твердости в закаленном состоянии без трещин, пор и дефектов макро- и микроструктуры.

Совокупность теоретических разработок и базы достоверных экспериментальных данных, приведенных в работах российских и зарубежных ученых, позволяют решать задачи по созданию и совершенствованию наплавочных материалов на основе теплостойких сплавов высокой твердости, а также по разработке современных высокоэффективных способов нанесения их на поверхность упрочняемого изделия. В последние годы получили развитие плазменные методы легирования поверхности металлов и сплавов: плазменная наплавка и напыление, поверхностное легирование импульсными плазменными струями, ионно-плазменное осаждение и др. Широко применяются различные способы химико-термической обработки и ультразвуковой упрочняющей обработки. Комбинированное применение различных технологий упрочнения позволяет получать рабочие слои, которые обладают повышенными эксплуатационными свойствами (высокой твердостью и износостойкостью).

В связи со сложностью физических процессов, происходящих при создании на поверхности изделий теплостойких сплавов сжатой (плазменной) дугой в среде азота, возможности этого метода упрочнения продолжают изучаться. Это обуславливает актуальность проведения новых теоретических и экспериментальных иссле-

<b>СибГИУ</b>		
Вход. №	622	
16.	06	2022г.

дований физических основ упрочнения поверхностных слоев из теплостойких сплавов. Повышение качества и износостойкости деталей машин и механизмов путем создания поверхностного слоя из теплостойких сплавов, сформированного плазменной дугой в среде азота, и разработка комплекса технических и технологических решений для дополнительного повышения твердости являются своевременными и актуальными.

### **Анализ содержания диссертации**

Диссертация включает в себя введение, шесть глав, заключение, список литературы из 396 наименований и 6 приложений. Содержит 289 страниц машинописного текста, включая 69 рисунков и 16 таблиц.

*Во введении* обоснована актуальность исследования, перечислены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

*В первой главе*, которая является обзорной, сформулирована цель и определены задачи исследования. На основании литературных данных показано, что физическая природа упрочнения наплавленного слоя определяется его структурно-фазовым и напряженным состояниями. Для упрочнения деталей широко применяются наплавочные материалы, разработанные на основе теплостойких сталей высокой твердости, типичными представителями которых являются классические стали типа 3X2B8 и P18. Теплостойкие стали выбраны в качестве базовых для разработки и исследования наплавочных материалов и новых способов наплавки. Показана перспективность применения теплостойких сталей для упрочнения поверхностных слоев деталей, работающих в условиях абразивного износа и высоких температур.

Проведен анализ традиционной технологии наплавки теплостойкими сплавами. Показано, что традиционная технология наплавки, направленная на преодоление основной трудности при наплавке данными сплавами (образование холодных трещин), недостаточно эффективна и трудоемка. Основными недостатками при этом являются обязательное применение высокотемпературного подогрева до 350 – 700 °С, замедленное охлаждение и, как следствие, необходимость проведения последующей сложной термической обработки для увеличения твердости и износостойкости. Показано, что методы борьбы с холодными трещинами, основанные на уменьшении скорости охлаждения наплавленного металла, недостаточно эффективны.

Высказано предположение, что новым и перспективным способом борьбы с холодными (закалочными) трещинами в процессе охлаждения наплавленного изделия может явиться использование эффекта повышенной пластичности (сверхпластичности) в момент протекания мартенситного превращения. Наплавленный теплостойкий сплав обладает высокой твердостью и износостойкостью, что затрудняет механическую обработку детали. Для ряда деталей механическая обработка может быть сведена к чистовой шлифовке рабочей



поверхности. К таким деталям необходимо, в первую очередь, отнести рабочие валки станов холодной прокатки, которые и выбраны в качестве объекта для исследований. Анализ рассмотренных способов упрочнения валков показал, что использование наплавки – наиболее приемлемый способ.

*Во второй главе* для изготовления наплавленных деталей предложено использовать плазменную наплавку как способ получения износостойких покрытий. Для упрочнения активного слоя деталей разработан технологический процесс плазменной наплавки на обратной полярности нетоковедущей порошковой проволокой и оборудование для его реализации. Для плазменной наплавки в защитно-легирующей среде азота разработаны порошковые проволоки, обеспечивающие получение наплавленного металла типа теплостойких сплавов высокой твердости – таких, как Р18, Р6М5, Р2М9 и др.

В работе предложен алгоритм комплексного обеспечения качества наплавленных деталей, построенный на основе причинно-следственной диаграммы Исикавы с использованием метода расслоения 5М.

Улучшить свойства наплавленного высоколегированного сплава, а также обеспечить благоприятное напряженное состояние позволяет применение дополнительно, после наплавки, высокотемпературного отпуска и ультразвуковой упрочняющей обработки (УПУО) или азотирования. Резервом повышения качества наплавленных деталей является применение рекристаллизационного отжига в процессе эксплуатации изделия.

*В третьей главе* рассмотрены физические основы способов многослойной наплавки и исследованы основные параметры их термических циклов. Анализ существующих предпосылок позволил выработать требования к «идеальному» термическому циклу наплавки и теоретически разработать способы многослойной наплавки, в которых для предотвращения образования холодных трещин предложено использовать эффект сверхпластичности в момент протекания мартенситного превращения.

Исследовано проявление эффекта сверхпластичности в теплостойком наплавленном металле и возможность его применения для регулирования уровня временных напряжений. Показано, что при охлаждении образцов из теплостойкого сплава наблюдается эффект повышенной пластичности при фазовом превращении, который проявляется в снижении временных напряжений в мартенситном интервале. Релаксация напряжений в интервале температур мартенситного превращения происходит в результате объемных изменений при  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении, дополнительных линейных изменений в направлении действия напряжений вследствие образования текстурованного мартенсита и повышенной пластичности сплава в момент превращения. В работе доказана определяющая роль сверхпластичного состояния в релаксации временных напряжений в образцах теплостойких сплавов высокой твердости. Исследования эффекта сверхпластичности показали, что величина остаточных

напряжений зависит от температур мартенситного превращения, от степени легирования твердого раствора и, соответственно, связана с кинетикой процесса.

Исследовано влияние комплексного легирования на формирование временных напряжений в наплавленном металле, легированном углеродом от 0,3 до 1,2 %, хромом от 2 до 4,5 %, вольфрамом от 8 до 18 %, алюминием от 0,5 до 2,0 %, кобальтом от 0,5 до 2,0 % и никелем от 0,5 до 2,0 %. Показано, что совместное легирование углеродом, хромом, вольфрамом, алюминием и азотом приводит к значительному уменьшению степени дисперсности мартенсита. Показано, что наиболее низкий уровень остаточных напряжений наблюдается в наплавленном сплаве Р18Ю, дополнительно легированном 1 % алюминия, 0,080 % азота и 1 % никеля. Определены точки начала мартенситного превращения и рекомендована температура подогрева (230 – 280 °С).

*В четвертой главе* проведено исследование структурно-фазового состояния поверхностного слоя методами растровой электронной микроскопии и рентгено-спектрального микроанализа. Установлено, что многослойная плазменная наплавка в среде азота приводит к неравномерности распределения твердости и микротвердости по сечению наплавленного слоя.

Исследовано структурно-фазовое состояние наплавленного металла и зоны сплавления методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) и микрорентгено-спектрального анализа (МРСА). Исследования, проведенные методом МРСА, показали, что в сплавах после наплавки и наплавки с последующим высокотемпературным отпуском наблюдается равномерное распределение практически всех легирующих элементов С, N, Al, Si, V, Cr, Fe, Mo, W.

*В пятой главе* проведено исследование напряженного состояния в наплавленных валках и влияния дополнительных упрочняющих факторов на свойства теплостойких сплавов высокой твердости. Для определения величины и характера распределения остаточных напряжений в наплавленных рабочих валках холодной прокатки с высокой твердостью активного слоя (55 – 64 HRC) в работе использован метод канавки, наносимой электроэрозионной резкой медным пластинчатым электродом, при этом диски для исследований из наплавленного вала вырезали анодно-механической резкой.

В работе определены характеристики напряженного состояния наплавленного в среде азота теплостойкого сплава Р18Ю после наплавки и наплавки с отпуском, определенные методом рентгеноструктурного анализа. В работе рассмотрены мероприятия, направленные на повышение стойкости наплавленных рабочих валков холодной прокатки путем регулирования в них напряженного состояния в процессе изготовления и эксплуатации.

Проведенные исследования показали возможность получения благоприятной эпюры остаточных напряжений, увеличения твердости и микротвердости поверхности обработанных ультразвуком сплавов, получения оптимальной микроструктуры поверхностного слоя наплавленного металла.



В шестой главе приведены примеры использования предложенного алгоритма повышения качества наплавленных деталей для решения конкретных инженерных задач. Результаты теоретических и экспериментальных исследований явились основой для разработки новых технических и технологических решений, использование которых на Ленинградском сталепрокатном заводе, заводе «Кулон» НПО «Позитрон», Новосибирском металлургическом заводе, Западно-Сибирском металлургическом комбинате, ООО «Вест 2002» и разрезе «Бунгурский-Северный» обеспечило повышение стойкости наплавленных деталей в 1,5–2,0 раза.

Предложена и реализована схема комплексных технологий упрочнения деталей: плазменная наплавка; термообработка после наплавки в виде высокотемпературного отпуска; азотирование наплавленного слоя или ультразвуковая поверхностная упрочняющая обработка; отжиг в процессе эксплуатации изделия, восстановительная наплавка изношенного слоя.

В заключении сформулированы основные выводы по работе. В конце диссертации приведены *список литературы и приложения*. Приложения содержат 6 актов по использованию разработанных в диссертации материалов на предприятиях РФ и в учебном процессе СибГИУ.

### **Научная новизна и практическая значимость**

Теоретическая значимость полученных в работе Малушина Н.Н. данных заключается в разработке физических основ формирования структуры и свойств наплавленных в защитно-легирующей среде азота теплостойких сплавов в закаленном состоянии без трещин, пор и дефектов макро- и микроструктуры.

Научная новизна:

1. Методами физического материаловедения проведены исследования структуры и фазового состояния, распределения твердости и микротвердости в различных зонах поверхностного слоя, сформированного плазменной наплавкой в среде азота. Установлено, что в наплавленных теплостойких сплавах основными фазами являются: твердый раствор  $\alpha$ -железа, карбиды и карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена, алюминия. Высокотемпературный отпуск наплавленных сплавов приводит к изменению фазового состава, параметра кристаллической решетки, размеров блоков когерентного рассеяния и изменению внутренних упругих напряжений.

2. Установлено, что физическую основу повышения твердости (52 – 57 HRC) обеспечивает плазменная наплавка теплостойкими сплавами высокой твердости в среде азота; дополнительное упрочнение (8 – 10 HRC) в основном происходит в процессе высокотемпературного отпуска; азотирование и ультразвуковая обработка увеличивают твердость наплавленного сплава на 1 – 2 HRC каждая.

3. Впервые установлено проявление эффекта повышенной пластичности («сверхпластичности») в наплавленных теплостойких сплавах в момент протекания мартенситного превращения и доказана возможность его применения для регулирования напряженного состояния в процессе многослойной наплавки.

4. Установлена физическая природа высоких эксплуатационных свойств наплавленного слоя, заключающаяся в формировании мелкозернистой структуры, содержащей твердый раствор  $\alpha$ -железа, карбиды и карбонитриды, в совершенстве наплавленного слоя (без трещин, пор и дефектов микроструктуры).

5. Разработаны новые способы многослойной наплавки теплостойкими сплавами, основанные на применении низкотемпературного регулируемого термического цикла с использованием эффекта сверхпластичности, обеспечивающие получение наплавленного сплава в закаленном состоянии с низкой склонностью к образованию холодных трещин.

6. Для плазменной наплавки в среде азота разработаны порошковые проволоки, обеспечивающие химический состав и эксплуатационные свойства наплавленного слоя типа теплостойких сплавов высокой твердости (62 – 64 HRC) и износостойкости.

7. Доказано, что регулирование напряженного состояния в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации наплавленных валков позволяет значительно повысить их стойкость. Напряженное состояние наплавленных деталей в процессе изготовления регулируется в процессе наплавки по термическому циклу с применением эффекта сверхпластичности, в процессе эксплуатации – рекристаллизационным отжигом.

Практическая значимость результатов диссертации Малушина Н. Н. заключается в том, что на их основе разработаны и реализованы способы многослойной плазменной наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости в среде азота, обеспечивающие получение наплавленных сплавов в закаленном состоянии с низкой склонностью к образованию холодных трещин при высоком качестве наплавленного слоя. Разработаны порошковые проволоки для плазменной наплавки в защитно-легирующей среде азота, которые обеспечивают получение наплавленного слоя из теплостойких сплавов высокой твердости различного химического состава и эксплуатационных свойств. Разработаны способы регулирования напряженного состояния в наплавленных деталях на всех этапах их жизненного цикла. В диссертации Малушина Н. Н. разработана комплексная технология упрочнения прокатных валков, включающая следующие операции: базовая технология – плазменная наплавка теплостойкими сплавами; дополнительные операции – высокотемпературный отпуск после наплавки, УПУО или азотирование после чистовой шлифовки, рекристаллизационный отжиг в процессе эксплуатации изделия, восстановительная наплавка изношенного слоя. Результаты теоретических и экспериментальных исследований явились физической основой для разработки новых технических и технологических решений, использование которых на Ленинградском сталепрокатном заводе, заводе «Кулон» НПО «Позитрон», Новосибирском металлургическом заводе, Западно-Сибирском металлургическом комбинате, ООО «Вест 2002» и разрезе «Бунгурский-Северный» обеспечило повышение стойкости наплавленных деталей в 1,5–2,0 раза. Результаты



работы внедрены в производство со значительным экономическим эффектом, что подтверждается актами внедрения. Общий экономический эффект в ценах 2021 года составил более 80 млн рублей, вклад автора составил 40 млн рублей. Результаты работы используются обучающимися в учебном процессе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» при подготовке бакалавров, магистрантов и аспирантов по направлениям подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» и 03.06.01 «Физика и астрономия».

Научные результаты, полученные в работе Малушина Н. Н., могут быть использованы для научных исследований, проводимых в научных учреждениях и образовательных организациях – таких как Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Институт проблем машиноведения РАН, Институт физики твердого тела РАН, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Институт металловедения и физики металлов им. Г. В. Курдюмова, ЦНИИ черной металлургии им. И. П. Бардина, Национальный исследовательский технологический университет «МИС и С», Самарский национальный исследовательский университет им. С. П. Королева – для развития физических основ комплексной технологии упрочнения теплостойких сплавов высокой твердости, сформированных плазменной наплавкой в защитно-легирующей среде азота. Результаты работы можно рекомендовать в качестве учебного материала в курсах лекций и при написании курсовых и выпускных работ по дисциплинам подготовки бакалавров, магистрантов и аспирантов по направлениям «Материаловедение и технологии материалов» и «Физика и астрономия».

#### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и заключений**

Основные положения и выводы диссертационного исследования базируются на многолетних исследованиях автора по установлению физических основ комплексной технологии упрочнения теплостойких сплавов высокой твердости и износостойкости, сформированных плазменной наплавкой в среде азота.

Достоверность полученных результатов подтверждаются большим объемом экспериментального материала, полученного с применением современных методов физического материаловедения, корректным использованием математических и статистических методов; согласованным сравнительным анализом аналитических и экспериментальных результатов и зависимостей; сопоставлением полученных экспериментальных результатов с данными других исследователей; соответствием их известным теоретическим представлениям физики прочности; эффективностью предложенных технических и технологических решений, подтвержденных результатами промышленных испытаний и внедрением в производство. Достоверность и

новизна технических решений подтверждена 15 охранными документами на объекты интеллектуальной собственности.

Результаты работы соответствуют поставленным целям и задачам исследования. Все сформулированные в работе научные положения, выводы и рекомендации имеют достаточное обоснование. Научные результаты, выносимые на защиту, получены лично автором Малушиным Н. Н.

### **Апробация работы и публикации**

Результаты работы неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях. По материалам диссертации опубликовано 122 работы, в том числе 29 – в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК для публикации результатов диссертационных исследований, 13 – в статьях, включенных в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, в трех монографиях, двух учебных пособиях, а также в 15 охранных документах на объекты интеллектуальной собственности, остальные – в трудах всероссийских и международных конференций и других научных мероприятий.

### **Соответствие диссертации паспорту специальности**

По своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне диссертационная работа соответствует специальности 01.04.07. – «Физика конденсированного состояния» по пункту 6 – «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами» и пункту п. 7 – «Технические и технологические приложения физики конденсированного состояния» паспорта специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

### **Замечания по диссертации**

В качестве замечаний по диссертационной работе можно указать следующее:

1) В название диссертации использован термин «комплексные технологии», хотя согласно пункту 6 паспорта специальности речь идет о создании физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами;

2) В тексте автореферата и диссертации говорится о плазменной наплавке теплостойкими сплавами высокой твердости в среде азота, однако в действительности производится плазменная наплавка на обратной полярности нетоковедущей порошковой проволокой, обеспечивающей получение наплавленного металла типа теплостойких сплавов высокой твердости, что приводит к некоторому непониманию процесса наплавки;

3) К сожалению, Малушин Н. Н. не использовал в своей работе высокоинформативный метод просвечивающий электронной микроскопии для углубления знаний о структуре полученных покрытий, что позволило бы говорить не о физической основе, а о физической природе упрочнения;



4) В состав комплексной технологии включен процесс газового азотирования, однако в работе показано, что он существенного вклада в упрочнение не вносит. Следовало бы уточнить, что азотирование следует применять в том случае, если деталь работает в агрессивной среде;

5) В работе показано, что разработанная технология обеспечивает высокую твердость рабочего слоя до HRC 62–64, однако высокая износостойкость подтверждена только актами промышленных испытаний и результатами лабораторных исследований на установке для ускоренных испытания деталей тел вращения на износостойкость и контактную прочность. Как известно, наплавленные детали в процессе эксплуатации подвергаются абразивному износу. Было бы желательно привести экспериментальные данные по этому виду износа;

6) В своей работе Малушин Н. Н. кроме комплексного применения различных упрочняющих технологий предлагает повысить содержание азота в наплавленном металле в 1,5–2,0 раза за счет введения в состав шихты порошковой проволоки порошков азотированного феррохрома и титана. Введение азотированного феррохрома и титана в состав шихты увеличивает количество остаточного аустенита и карбонитридной фазы, что увеличивает твердость и износостойкость. Однако это направление в диссертационной работе раскрыто недостаточно;

7) В представленном автореферате и в списке литературы вызывают сомнения авторские свидетельства, заявленные в период с 1977 по 1987 год, а опубликованные только в 2013 году. Требуются объяснения;

8) Необходимо отметить, что в тексте автореферата на рисунке 3 отсутствуют доверительные интервалы по оси напряжений;

9) В Положении 1, выносимом на защиту, считаю некорректной фразу о том, что физические основы упрочнения наплавленных слоев позволяют обеспечить их высокую твердость и износостойкость.

Несмотря на высказанные замечания, которые носят дискуссионный и рекомендательный характер, можно констатировать, что диссертация Малушина Н. Н. заслуживает высокой оценки. Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности работы, не затрагивают её основных положений и выводов, не влияют на достоверность полученных результатов.

### **Заключение**

Диссертация «Физические основы комплексной технологии упрочнения теплостойких сплавов высокой твердости, сформированных плазмой в среде азота», представляемая на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» Малушиным Николаем Николаевичем, соответствует пункту 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 с изменениями: постановления Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней» и постановление

Правительства Российской Федерации от 20.03.2021 г. № 426 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней»). Она является научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема установления физических основ комплексной технологии упрочнения теплостойких сплавов высокой твердости, сформированных плазмой в среде азота, имеющая важное хозяйственное значение. Автореферат и основные публикации полностью отражают содержание диссертации.

На основании вышеизложенного считаю, что автор диссертации Малушин Николай Николаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Даю свое согласие на включение моих персональных данных в аттестационное дело Н. Н. Малушина и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Смирнов Александр Николаевич

Доктор технических наук, профессор,

05.16.01– «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

05.02.11– «Методы контроля и диагностика в машиностроении»

тел.: +7 903-946-47-13, e-mail: office@kcsk.group

650000, гор. Кемерово, ул. Красная, дом 25, кв. 54

Профессор кафедры «Технология машиностроения»

ФГБОУ ВО «Кузбасский

государственный технический

университет имени Т. Ф. Горбачева», д.т.н., проф.

А. Н. Смирнов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева».

Адрес: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28



Подпись А. Н. Смирнова  
**ЗАВЕРЯЮ**  
начальник отдела управления делами  
О. С. Карнадуд  
"06" 06 2022 г.