

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный
технический университет»
доктор технических наук, профессор
Брованов Сергей Викторович



«17» июня 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ) на диссертационную работу Малушина Николая Николаевича «Физические основы комплексной технологии упрочнения теплостойких сплавов высокой твердости, сформированных плазмой в среде азота», представленную к защите по специальности «01.04.07 – физика конденсированного состояния» на соискание ученой степени доктора технических наук.

На отзыв представлены:

- диссертационная работа объемом 289 страниц, состоящая из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 396 источников и 6 приложений
- автореферат диссертации на 36 страницах, включая список из 63 публикаций, в том числе 30 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК. 13 статей зарубежных и переводных научных изданиях. 15 авторских свидетельств. 5 монографий и учебных пособий.

Актуальность темы диссертационной работы

В своей работе Н.Н. Малушин решает проблему разработки научных и технологических основ получения высококачественных бездефектных наплавленных слоев из теплостойких износостойких сплавов высокой твердости. Используемая в работе технология плазменной наплавки является перспективным процессом, который позволяет не только повышать служебные характеристики новых изделий, но и с успехом может быть использован для восстановления геометрических размеров и свойств деталей после их длительной эксплуатации. Несмотря на большое количество научных исследований, посвященных технологическим процессам плазменной наплавки, особенности структурных и фазовых превращений в наплавленных слоях из теплостойких сталей, обеспечивающих их малую дефектность и высокий уровень эксплуатационных свойств, остаются недостаточно изученными. Свои исследования автор проводит с использованием как оригинального, так и серийно выпускаемого исследовательского, аналитического и технологического оборудования, что позволяет решить ряд фундаментальных задач и расширить представления о процессах фазовых и структурных преобразований в теплостойких сталях, сформированных плазменной наплавкой в среде азота. Не вызывает сомнения, что научные исследования, связанные с разработкой новых методов повышения износостойкости и долговечности деталей машин и технологического оборудования, работающих при высоких температурах и удельных нагрузках

СибГИУ	
Вход. №	644
№	06 2022 г.

следует считать актуальными, а полученные Н.Н. Малушиным результаты имеют важное научное и прикладное значение. Содержание диссертации, изложенной в шести главах, в полной мере отражает логику, методологию и результаты проведенных исследований.

Научная новизна и практическая значимость работы

Основные теоретические результаты работы заключаются в разработке физических основ формирования структуры и свойств теплостойких сплавов, наплавленных в защитно – легирующей среде азота, выявлении особенностей формирования их структуры, фазового состояния, а так же механических свойств в различных зонах поверхностного слоя. При выполнении работы Н.Н. Малушиным впервые обнаружен эффект повышенной пластичности наплавленных слоев из теплостойких сплавов в диапазоне температур мартенситного превращения, который может быть использован для регулирования уровня внутренних напряжений в материале многослойной наплавки и предотвращения образования в нем холодных трещин на этапе финального охлаждения. Доказано, что регулирование напряженного состояния в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации наплавленных валков позволяет значительно повысить их ресурс работы. Напряженное состояние наплавленных деталей можно регулировать использованием термического цикла основанном на использовании эффекта сверхпластичности. В процессе эксплуатации напряженное состояние детали можно изменять использованием рекристаллизационного отжига. Результаты работы позволили установить, что физическая природа высоких эксплуатационных свойств наплавленного слоя обусловлена формированием в них мелкозернистой структуры, содержащей твердый раствор α – железа, карбиды и карбонитриды, совершенством наплавленного слоя (без трещин, пор и дефектов микроструктуры) в совокупности с благоприятным напряженным состоянием

Практическая значимость работы заключается в разработке новых способов многослойной плазменной наплавки в среде азота теплостойкими сплавами высокой твердости, обеспечивающими в закаленном состоянии высокие показатели твердости, износостойкости наплавленного слоя при отсутствии дефектов макро – и микроструктуры, в частности трещин. Для плазменной наплавки в среде азота разработаны новые составы порошковых проволок на основе теплостойких сталей высокой твердости, обеспечивающие заданный химический состав наплавленных сплавов, их высокую твердость (62 – 64 HRC) и износостойкость. Проведенные автором исследования позволили разработать способы регулирования напряженного состояния в наплавленных деталях на всех этапах их жизненного цикла. По результатам работы предложен комплекс технических решений по практической реализации технологии упрочнения прокатных валков с применением новых способов многослойной плазменной наплавки теплостойкими сплавами, предусматривающими дополнительные операции высокотемпературного отпуска и ультразвуковой поверхностной обработки, а так же восстановительной наплавки изношенного слоя с периодическим рекристаллизационным отжигом в процессе эксплуатации изделия.

Обоснованность и достоверность научных результатов

Достоверность экспериментальных данных, научных положений, рекомендаций и выводов обеспечивается применением современного исследовательского оборудования, реализующих комплекс взаимодополняющих традиционных и новых методов исследования, использованием методов

статистической обработки результатов. Основные результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях, опубликованы в ведущих научных журналах, том числе 30 в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 13 в статьях зарубежных научных изданий, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus, в трех монографиях, двух учебных пособиях, а также защищены 15 патентами и авторскими свидетельствами. Результаты работы апробированы на промышленных предприятиях и подтверждаются 6 актами внедрения.

Рекомендации использованию результатов работы

Результаты диссертационной работы целесообразно использовать на предприятиях, использующих для формообразования деталей и заготовок технологические процессы горячей обработки металлов давлением, а так же на заводах, выпускающих машины и оборудование, детали которого работают при повышенных температурах, значительном внешнем силовом воздействии в условиях сухого трения и допускающие значительный нагрев поверхности без снижения эксплуатационных характеристик. Теоретические знания, полученные автором диссертационной работы, несомненно, будут востребованы научными коллективами, связанными с разработкой новых технологических процессов плазменной и электродуговой наплавки теплостойких сталей, а также исследователями изучающими влияние структурных и фазовых превращений, внутренних напряжений на свойства наплавленных слоев из теплостойких материалов высокой твердости.

Анализ содержания диссертационной работы

Во введении обоснована актуальность темы исследований, описана степень разработанности темы исследования, поставлена цель и сформулированы задачи исследования, приведена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, изложены методология и методы, используемые при исследованиях, приведены положения, выносимые на защиту, даны сведения о публикациях автора по теме диссертации, оценен его личный вклад при проведении исследований.

В первой главе «Развитие и современное состояние применения теплостойких сталей высокой твердости для упрочнения деталей машин и механизмов» выполнен анализ литературы по теме диссертационной работы. Показана целесообразность применения теплостойких быстрорежущих сталей в качестве наплавочных материалов для повышения эксплуатационных свойств деталей, работающих в условиях высокой температуры и воздействия абразивных частиц. Установлено, что свойства наплавленного слоя определяются не только его структурно – фазовым но и напряженным состоянием. Выполнен анализ традиционных технологий наплавки теплостойкими сплавами, свидетельствующий, что при их использовании типичным дефектом наплавки из теплостойких сталей являются холодные трещины. Показано, что для устранения этого недостатка требуются применение предварительного высокотемпературного подогрева и последующего замедленного охлаждения. Вследствие этого известные технологии наплавки теплостойкими сплавами требуют дорогостоящего термического оборудования, достаточно трудоемки и низкоэффективны. Для крупногабаритных деталей проведение обработки с предварительным подогревом практически неосуществимо. Другие известные методы борьбы с холодными трещинами, как правило, основаны на уменьшении скорости охлаждения

наплавленного металла. Они так же недостаточно эффективны и не позволяют достичь высоких эксплуатационных свойств обработанных деталей вследствие недостаточной и неравномерной твердости наплавленных слоев.

Проведенный анализ литературы показал, что наиболее рациональным способом борьбы с холодными трещинами и способом получения наплавленных слоев из дорогостоящих и дефицитных теплостойких сталей, является регулирование термического цикла наплавки. Данные литературных источников позволили сформулировать условия «идеального» термического цикла, при которых отсутствует перегрев околошовной зоны, интенсивно протекают процессы релаксации термических и структурных напряжений и обеспечиваются условия закалки наплавленного металла непосредственно в процессе наплавки. В литературном обзоре показано, что перспективным способом борьбы с холодными (закалочными) трещинами в наплавленном изделии является использование эффекта повышенной пластичности стали при охлаждении в диапазоне температур мартенситного превращения. Рассмотрены новые современные способы упрочнения поверхностного слоя рабочих валков холодной прокатки. На основании анализа литературы обозначены основные проблемы в области разработки физических основ технологии плазменной наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости и износостойкости и определены наиболее рациональные и перспективные методы их решения.

Во второй главе «Оборудование и материалы для плазменной наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости» дано обоснование выбора плазменной наплавки, как основного способа нанесения износостойких покрытий. Предложено использовать плазменную наплавку. Она обладает высокой производительностью, широкой возможностью применения различных наплавочных металлов и режимов наплавки, а так возможность реализации на практике первой стадии термического цикла, положенной в основу разработанных новых способов наплавки. В разделе описаны диффузионные и тепловые процессы, происходящие в основном и наплавленном металле, которые определяют структуру и эксплуатационные свойства. Изложены основные технические решения и их режимы, при которых обеспечивается качество наплавленных деталей. Описаны основы оригинального технологического процесса плазменной наплавки в защитно – легирующей среде азота с использованием специального плазмотрона, изложен принцип работы и состав технологической установки для упрочнения активного слоя деталей, разработанной автором совместно с сотрудниками СибИИУ. Указаны составы новых наплавочных материалов на основе теплостойких сплавов высокой твердости таких, как P18, P6M5, P2M9. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили сформулировать новые подходы к решению проблемы повышения качества и долговечности наплавленных деталей машин и механизмов

В третьей главе «Исследование физических основ способов многослойной наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости» изучены процессы, происходящие в наплавленном слое на этапе охлаждения, и установлено, что основной причиной образования холодных трещин в теплостойких наплавленных сталях высокой твердости являются закалочные явления. В главе изучено влияние легирования сплава, температуры предварительного нагрева, скорости охлаждения и времени изотермической выдержки в области мартенситного превращения на релаксацию временных напряжений в наплавленном слое. Получены новые

научные результаты по исследованию эффекта повышенной пластичности теплостойких сплавов при мартенситном превращении. Доказано, что кратковременное снижение температуры подогрева на 20 – 100 °С ниже температуры начала мартенситного превращения позволяет реализовать эффект сверхпластичности, что приводит к частичной релаксации временных напряжений и предотвращает образование трещин в процессе многослойной наплавки. Полученные результаты позволили разработать новый термический цикл наплавки с низкотемпературным подогревом, оптимизировать его режимы и получить наплавленный металл в закаленном состоянии с низким уровнем остаточных напряжений.

В четвертой главе «Исследование структурно-фазового состояния поверхностного слоя наплавленных теплостойких сплавов, методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального анализа» изучены структура и фазовый состав наплавленных слоев из теплостойких сталей. Проведенные исследования показали, что после наплавки основными фазами являются твердый раствор α -железа, карбиды и карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена, алюминия, твердые растворы на основе алюминия и фаза AlN. Высокотемпературный отпуск наплавленного сплава приводит к превращению остаточного аустенита и выделению карбидов и карбонитридов, изменению фазового состава, параметра кристаллической решетки, размеров блоков когерентного рассеяния, что в свою очередь, ведет к снижению уровня внутренних упругих напряжений с 1000 до 600 МПа при одновременном росте показателей микротвердости приблизительно в 1,5 раза.

В пятой главе «Оценка напряженного состояния и способы его регулирования в прокатных валках, изготовленных с применением плазменной наплавки активного слоя теплостойкими сплавами» изучены характер и уровень остаточных напряжений в наплавленных слоях прокатных валков. Для этого использованы методы канавки и рентгеноструктурный анализ. Результаты исследований свидетельствуют, что создание благоприятного напряженного состояния в поверхностном слое за счет реализации термического цикла плазменной наплавки в среде азота с низкотемпературным подогревом, а так же применение финальных операций азотирования и ультразвуковой поверхностно-упрочняющая обработки (по рациональным режимам, определенным в данной главе) позволяют увеличить стойкость рабочих валков холодной прокатки в полтора – два раза.

В шестой главе «Практическое использование комплексных технологий упрочнения деталей машин теплостойкими сплавами высокой твердости» описана новая комплексная технология упрочнения прокатных валков, основанная на применении плазменной наплавки теплостойкими сталями в защитно – легирующей среде азота. Приведены результаты ее промышленного внедрения на металлургических комбинатах Западной Сибири, которые свидетельствуют о высокой эффективности найденных технических решений. Предложенные способы многослойной наплавки с успехом могут применяться для получения наплавленного металла, обладающего высокой твердостью (≥ 64 HRC) при отсутствии холодных трещин.

В заключении изложены основные выводы по диссертационной работе, представлены перспективы и направления дальнейшей разработки темы.

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации и отражает все основные положения и выводы, выносимые на защиту.

Соответствие работы паспорту указанной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности «01.04.07 – физика конденсированного состояния» в части пунктов №6- «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами и №7 «Технические и технологические приложения физики конденсированного состояния».

По диссертационной работе имеются следующие замечания

1. В литературном обзоре описана положительная роль остаточного аустенита на показатели сопротивления зарождению и росту холодных трещин. Однако высокое содержание остаточного аустенита обычно существенно снижает твердость и износостойкость быстрорежущей стали. При упрочнении быстрорежущей стали для уменьшения количества остаточного аустенита, как правило, выполняют многократный отпуск или криогенную обработку. При выполнении работы было целесообразно произвести оценку содержания остаточного аустенита в наплавленном слое и его влияние на показатели механических свойств при различных условиях наплавки.
2. Во второй главе подробно описаны конструкции современных плазмотронов и применяемых за рубежом наплавочных материалов. Эту информацию целесообразно указать в первой главе (в литературном обзоре)
3. В работе не указан способ обнаружения холодных трещин в наплавленном слое, а так же определены критические размеры трещин, при которых они оказывают наиболее негативное влияние на эксплуатационные свойства прокатных валков.
4. Автор говорит о явлении повышенной пластичности в области мартенситного превращения (сверхпластичности), при этом абсолютные значения пластичности стали Р18 не превышают 15-20 % (таблица 3.4). Поэтому использование термина «сверхпластичность», обычно подразумевающее изменение пластичности более чем на порядок, является спорным.

Заключение

Оценивая в целом диссертационную работу Малушина Николая Николаевича «Физические основы комплексной технологии упрочнения теплостойких сплавов высокой твердости, сформированных плазмой в среде азота», можно констатировать, что указанные выше недостатки не снижают значимости проведенных исследований в целом. Диссертация Н.Н. Малушина представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую всем критериям действующего Положения о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук, (Постановление правительства РФ №842 от 24 сентября 2013г.) в которой на основании выполненных автором исследований получены новые знания и изложены новые научно обоснованные технологические решения, позволяющие существенно расширить область применения износостойких и теплостойких сплавов высокой твердости. Результаты работы вносят значительный вклад в развитие страны в сфере процессов прокатного производства металлических сплавов и технологий горячей обработки металлов давлением. Автор диссертации

заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности «01.04.07 – физика конденсированного состояния».

Отзыв на диссертационную работу составлен и утвержден на научном семинаре кафедры материаловедения в машиностроении Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (протокол № 6 от 16 июня 2022 года)

Председатель научного семинара
профессор, доктор технических наук
(05.16.09 - материаловедение (машиностроение)).
Заведующий кафедрой материаловедения
в машиностроении Федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего образования
«Новосибирский государственный
технический университет»



Батаев
Владимир Андреевич

Секретарь научного семинара
кандидат технических наук
(05.16.09 - материаловедение (машиностроение)),
доцент кафедры материаловедения
в машиностроении Федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего образования
«Новосибирского государственного
технического университета»



Огнева
Татьяна Сергеевна

"Подписи Батаева В.А. и Огневой Т.С. «заверяю»
начальник ОК НГТУ Пустовалова О.К.



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»
Адрес 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Тел.: 8 (383) 346-08-43.
Адрес электронной почты: rector@nstu.ru Сайт: <http://www.nstu.ru>