

Минобрнауки России



Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)» (МАИ)

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4
тел.: +7 499 158-92-09 | www.mai.ru | e-mail: mai@mai.ru
ОКПО 02066606 | ОГРН 1037739180820 | ИНН 7712038455 | КПП 774301001

26.01.2026 № 035-10-1589
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный
исследовательский университет)»,
доктор технических наук



Иванов А.В.

26 01 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Черненко Дмитрия Владимировича
«Триботехнические свойства высокоазотистых аустенитных Cr-Ni-Mn сталей в
среде жидкого азота», представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов»

Актуальность темы исследования.

Высокоазотистые аустенитные Cr-Ni-Mn стали являются востребованными конструкционными материалами в авиакосмической, энергетической и химической отраслях промышленности, в частности для освоения месторождений арктического шельфа. Они превосходят традиционные углеродистые аустенитные стали по комплексу прочностных, пластических и усталостных характеристик, сохраняя работоспособность в коррозионно-агрессивных средах при низких температурах. Эксплуатационные свойства деталей из этих сталей определяются формирующейся структурой, которая зависит как от термической обработкой, так и от пластической деформации. В связи с этим диссертация Черненко Д.В., посвященная исследованию взаимосвязи структурно-фазового состава и триботехнических свойств высокоазотистых аустенитных Cr-Ni-Mn сталей в среде жидкого азота, является актуальной и соответствует приоритетным направлениям развития науки и технологий РФ, в частности развитию Арктической зоны.

Научная новизна полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

1. Установлено, что высокие значения износостойкости Cr-Mn-N и Cr-Mn-Ni-N аустенитных сталей достигаются при значениях энергии дефектов упаковки 15-35 мДж/м², когда деформация при трении происходит микродвойникованием.

2. Доказано, что для стали 05X22AG15N8M2Ф высокая износостойкость при трении скольжения при -196°С обусловлена интенсивным деформационным упрочнением в процессе испытаний, а не фазовыми превращениями.

Результаты диссертационной работы отличаются высокой степенью научной новизны, подтверждены экспериментально и доведены до уровня практических рекомендаций.

Практическая значимость полученных автором результатов диссертационной работы.

Диссертационная работа имеет практическую направленность, которая заключается в разработке конкретных технологических решений, направленных на повышение надежности и долговечности высоконагруженных узлов трения криогенной техники. В результате исследований определен режим термической обработки (закалка от 1100°С в воду) для высокоазотистой стали 05X22AG15N8M2Ф, обеспечивающий её максимальную износостойкость в условиях трения скольжения при криогенной температуре (-196°С). Установлено, что после рекомендованной термообработки износостойкость этой стали в самосопряжённой паре в три раза превышает показатель широко применяемой стали 08X18H9T.

Результаты работы опробованы в АО «Криогенмаш» и использованы в специализированной организации: ООО «Синтоген».

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.

Результаты диссертации представляют значительный интерес для практического применения в криогенной технике:

- для изготовления подшипников скольжения роторов, работающих в условиях ограниченной или граничной смазки жидким азотом, где ключевым преимуществом является способность к самоупрочнению при нагружении;

- в поршневых компрессорах и насосах с возвратно-поступательным движением при низких температурах;
- в парах трения «сталь - сталь» в зоне штока, работающих в контакте с жидким или холодным газообразным азотом, где важны высокая износостойкость и стабильность структуры для предотвращения утечек.
- В запорно-регулирующей арматуре (ЗРА) шаровых кранов, задвижек и вентилей систем хранения и транспортировки сжиженного природного газа, где износ может привести к потере герметичности.

Полученные результаты позволяют рекомендовать высокоазотистую сталь 05X22AG15N8M2Ф (после закалки с температуры 1100°C) для применения в ответственных узлах трения криогенной техники, работающих при низких и криогенных температурах.

Публикация и апробация основных положений работы.

Основные материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на 6 всероссийских и международных конференциях: XIX – XXI Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», Москва, ИМЕТ РАН. 2022, 2023, 2024; L – LI Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения», Москва, МАИ. 2024, 2025; 62-й Международной научной студенческой конференции «МНСК-2024», Новосибирск, НГУ. 2024.

По теме диссертации опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в базе данных RSCI и рекомендованных ВАК.

Общая характеристика диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 150 страницах, содержит 69 рисунков, 33 таблицы. Список литературы включает 116 источников.

Во введении обоснована актуальность темы выбранного исследования, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту.

В работе проведен глубокий анализ современного состояния исследований в области износостойкости коррозионностойких аустенитных сталей. Подробно рассмотрены триботехнические свойства высокоазотистых хромомарганцевоникелевых аустенитных сталей в различных структурных состояниях при комнатной температуре. Выявлены нерешенные проблемы, что обосновывает выбор сталей и условий проведения испытаний. Описаны материалы и методы исследования: объектом исследования являлась

высокоазотистая сталь 05X22AG15H8M2Ф, а так же материалы сравнения: стали 02X22AG10H4MФ, 08X18H9Т и 03X17H13M2. Приведены условия их выплавки, обработки и схема уникальной установки для испытаний на изнашивание при -196°C (ИМЕТ РАН). Подробно представлены методы структурного анализа, механических и триботехнических испытаний.

В работе определены режимы термопластической обработки стали 05X22AG15H8M2Ф, обеспечивающие ей максимальную износостойкость при сохранении высокой прочности и достаточной для практического применения пластичности и ударной вязкости. Установлена взаимосвязь между структурой, формирующейся в процессе трения и износостойкостью исследуемой стали в самосопряженной системе при температуре -196°C . Исследовано влияния условий триботехнических испытаний (температуры, скорости скольжения и нагрузки) на износостойкость изучаемых сталей. Показано, что с ростом приложенной нагрузки или увеличением скорости скольжения, высокоазотистые аустенитные стали не только значительно (более чем в 3 раза) превосходят по износостойкости стали 08X18H9Т и 03X17H13M2, но и способны к самоупрочнению в результате деформации.

Показана взаимосвязь между энергией дефектов упаковки азотистых аустенитных сталей и их износостойкостью. Установлено, что с понижением температуры испытаний от $+20$ до -196°C максимальной износостойкостью обладают стали с ЭДУ $15-35\text{мДж/м}^2$, в которых реализуется механизм интенсивного микродвойникования без протекания фазовых превращений, приводящих к охрупчиванию.

В выводах представлены основные результаты, согласующиеся с поставленной целью и задачами работы, подчеркнута прикладная направленность работы на повышение надежности и долговечности деталей и узлов криогенной техники.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов в диссертационной работе Черненко Д.В. подтверждается использованием современного исследовательского оборудования, применением комплекса экспериментальных методов, сопоставлением полученных результатов с литературными данными и результатами независимых экспериментов. Все выводы обоснованы систематическим характером исследований и воспроизводимостью данных.

Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертационным работам: выполнены все требования, предъявляемые к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук. Проведен подробный

литературный анализ, правильно определены цели и задачи исследования. Экспериментальные результаты представлены четко, как в виде графиков и фотографий структур, так и текста, их описывающего. Работа написана ясным языком, хорошо иллюстрирована. Диссертация и автореферат содержат необходимые разделы и соответствуют друг другу.

Тематика диссертации Черненко Д.В., ее содержание, цель, научная новизна, практическая значимость и основные полученные результаты полностью соответствуют требованиям паспорта научной специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Замечания по диссертационной работе.

1. Какие условия испытаний на трение использовались при проведении экспериментов, описанных в главе 3, и чем они отличаются от условий, описанных в главе 4 диссертации.

2. Реальные узлы трения испытывают не только постоянную, но и вибрационную, ударную и циклическую нагрузки. Для таких условий важны не только статическая прочность и износостойкость, но и усталостная прочность при криогенных температурах. Поэтому целесообразно было бы привести такие исследования.

3. Для широкого практического применения необходимы дополнительные испытания исследуемой стали в паре с другими типовыми материалами (бронза, полимеры и пр.).

4. На основании литературных данных, а также результатов проведенных исследований автор работы утверждает, что основным механизмом разрушения поверхности являлся адгезионный механизм износа. Для более информативного представления данных по механизму износа следовало бы построить кинетические кривые (зависимость интенсивности изнашивания от пути трения).

5. В третьем пункте выводов по главе 3 сказано, что в закаленном и деформированном состоянии происходит снижение степени деформационного упрочнения, хотя в общих выводах по работе (п.2) говорится о наклепе в деформированном состоянии.

6. В таблице 3.2 диссертации (таблица 2 в автореферате) показано, что увеличение приложенной нагрузки при испытаниях на трение происходит увеличение интенсивности изнашивания, исключение составляют результаты, полученные после закалки сплава с 1100°C , с чем это связано?

7. На рисунке 3.4 в диссертации (рисунок 2 в автореферате) не указано увеличение.

8. Не указано время отпуска при температурах 600° и 800°C .

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Черненко Д.В.

Заключение.

Представленная диссертация Черненко Д.В. является самостоятельной научно-квалификационной работой, посвященной актуальной научной теме. В работе получены результаты, несомненно обладающие научной новизной, и решен ряд задач, имеющих теоретическое и практическое значение. Представленные в диссертационной работе результаты играют важную роль в развитии металловедения высокопрочных аустенитных сталей. Целесообразно использовать их для повышения ресурса надежности и долговечности узлов трения криогенной техники. Результаты работы опробованы в АО «Криогенмаш» и использованы в ООО «Синтоген».

По экспериментальному, методическому и теоретическому уровням, объему работы, научной новизне, практической значимости и актуальности данная диссертационная работа полностью отвечает требованиям ВАК РФ (п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Черненко Дмитрий Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Диссертация работа и отзыв рассмотрены на заседании Ученого совета Института №11 «Новые материалы и производственные технологии».

Присутствовало на заседании 14 человек из 18.

Результаты голосования:

«за» – 14 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

Протокол № 5 от 19 января 2026 г.

Заключение составлено д.т.н., профессором Скворцовой С.В.

Беспалов Александр Владимирович, к.т.н.,
доцент, директор Дирекции Института № 11