

ОТЗЫВ

Официального оппонента д.т.н. Капуткина Дмитрия Ефимовича 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 диссертации

Активное развитие арктических регионов страны, авиакосмической и энергетической отраслей невозможно без создания материалов с повышенными физико-механическими, технологическими, коррозионными и триботехническими свойствами. Среди аустенитных сталей в криогенной технике наиболее широко применяются стали типа X18H9T и X17H13M2, существенным недостатком которых является относительно низкие статическая и циклическая прочность, вязкость разрушения и износостойкость. Над решением проблемы создания новых немагнитных сталей, способных длительное время работать в условиях трения под воздействием высоких статических, циклических, динамических нагрузок при криогенных температурах в ИМЕТ РАН работали в течение ряда лет.

Одним из путей решения данной проблемы является создание высокоазотистых конструкционных Cr-Mn-Ni сталей. Как показано в многочисленных работах, такие стали могут обладать уникальным сочетанием механических ($\sigma_{0,2} \geq 550\text{МПа}$, $\delta \geq 45\%$, $KCU^{+20^\circ\text{C}} \geq 3,5\text{МДж/м}^2$), физических ($\mu=1,01\text{ Гс/Э}$) и технологических (литье, свариваемость, обработка резанием, давлением) свойств, а также значительно превосходить стали типа X18H9T по коррозионной стойкости и триботехническим характеристикам при комнатной температуре. Однако до настоящего момента отсутствовали прямые экспериментальные данные об износостойкости высокоазотистых Cr-Mn-Ni сталей в криогенной среде. Получение таких результатов позволит повысить надежность и долговечность деталей, работающих в условиях износа при низких температурах, за счет замены традиционных сталей на высокоазотистые стали системы Cr-Ni-Mn. Поэтому актуальность темы диссертации Черненко Д.В., посвященной исследованию триботехнических свойств высокоазотистых аустенитных Cr-Ni-Mn сталей в среде жидкого азота, не вызывает сомнений.

Структура и объём диссертации

Диссертация объемом 150 страниц, состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, приложения и списка литературы из 116 источников. Работа содержит 69 рисунков и 33 таблицы. Основные результаты представлены в 4 рецензируемых журналах, индексируемых в базе данных RSCI и рекомендованных ВАК, представлены на 6 всероссийских и международных конференциях.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость, приведены данные по апробации, положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой комплексный аналитический обзор современного состояния исследований, посвященных износостойкости Cr-Ni и Cr-Ni-Mn сталей. В ней систематизировано и проанализировано влияние химического состава, структуры, фазового состава, скорости скольжения и нагрузки на триботехнические свойства высокоазотистых аустенитных сталей. На основании этого анализа выявлены нерешенные проблемы, и определены условия проведения триботехнических испытаний.

Вторая глава представляет собой детальное описание материалов и методик, использованных в исследовании. Использован комплекс современных методов исследования: рентгеноструктурный анализ, электронная микроскопия, механические испытания. Описана собранная в ИМЕТ РАН установка, на которой были проведены испытания на трение скольжения в среде жидкого азота.

В третьей главе представлено комплексное экспериментальное исследование, посвященное установлению взаимосвязи между структурой, сформированной в результате различных термопластических воздействий, и интенсивностью изнашивания высокоазотистой хромомарганцевоникелевой аустенитной стали в самосопряженной системе при криогенной температуре.

Установлено, что наименьшее значение интенсивности изнашивания ($I_h = 2,74 \times 10^{-9}$) при -196°C у исследуемой стали достигается после предварительной закалки от 1100°C в воде при скорости скольжения контртела $4,2\text{ м/с}$ и приложенной нагрузке 20 Н за счет формирования практически однородной структуры азотистого аустенита, обеспечивающей в процессе трения деформационное упрочнение двойникованием. Наличие небольшого ($\approx 1\%$) количества наноразмерных нитридов ванадия и хрома, сохраняющихся после такой закалки, сдерживает рост зерна аустенита стали и способствует дисперсионному упрочнению. Повышение температуры закалки до 1200°C , ведущее к обогащению твердого раствора азотом, не

улучшает износостойкость из-за увеличения дефектности структуры в зоне контакта и ее охрупчивания.

Показана нецелесообразность предварительной упрочняющей обработки: выделение частиц Cr_2N при отпуске увеличивает интенсивность изнашивания из-за снижения способности аустенита к деформационному упрочнению. Исследовано влияние холодной прокатки со степенями обжатия 15-60%. Установлено, что наклеп незначительно влияет на износостойкость в среде жидкого азота, уступая по данному показателю состоянию после закалки от 1100°C , что связано со снижением степени деформационного упрочнения и увеличением дефектности структуры. Во всех структурных состояниях сталь 05X22AG15H8M2Ф превосходила по триботехническим свойствам сталь 08X18H9T.

Четвертая глава посвящена изучению влияния температуры, скорости скольжения и приложенной нагрузки на триботехнические свойства закаленных от 1100°C сталей 05X22AG15H8M2Ф, 02X22AG10H4MФ, 08X18H9T и 03X17H13M2 в самосопряженной системе. Показано преимущество высокоазотистых сталей: они имеют в 3 раза меньшую интенсивность изнашивания и коэффициент трения при комнатной температуре и, согласно проведенной по косвенным признакам оценке, в среде жидкого азота. Кроме того, они способны к деформационному упрочнению при ужесточении условий трения (повышении нагрузки с 10 до 20 Н или скорости с 4,2 до 6,5 м/с), что ведет к снижению интенсивности изнашивания.

На основе экспериментальных данных и литературного обзора установлена взаимосвязь износостойкости со стабильностью фазового состава и энергией дефектов упаковки (ЭДУ) аустенита. Определено, что при комнатной температуре стали с ЭДУ <15 мДж/м², в которых протекает мартенситное превращение, имеют незначительно большую износостойкость, чем стали с ЭДУ 15-35 мДж/м², где реализуется микродвойникование. С понижением температуры до -196°C максимальной износостойкостью обладают стали с ЭДУ 15-35 мДж/м², в которых не происходит $\gamma \rightarrow \alpha$ или $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$ превращений, ведущих к охрупчиванию поверхностного слоя.

В выводах достаточно подробно представлены основные результаты, отражающие суть работы и подчеркивающие прикладную направленность работы на повышение надежности узлов криогенной техники.

В приложении представлен акт опробования от АО «Криогенмаш».

Научная новизна диссертационной работы заключается в выявлении связи между износостойкостью и энергией дефектов упаковки Cr-Mn-N и Cr-Mn-Ni-N аустенитных сталей. Высокие значения износостойкости этих сталей достигаются при энергии дефектов упаковки 15-35 мДж/м², при которой деформация в процессе трения происходит микродвойникованием. Определен оптимальный химический состав стали 05X22. Дополнительное легирование этой стали азотом в количестве 0,50%, марганцем 14-15%, никелем 7-8% и молибденом 1-2% мас., обеспечивает ей высокую износостойкость при +20 и -196°С без $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$ мартенситного превращения, т.е. при сохранении немагнитности стали. Установлено, что износостойкость при трении скольжения высокоазотистой стали 05X22АГ15Н8М2Ф при +20 и -196°С определяется в большей мере степенью деформационного упрочнения азотистого аустенита в процессе трения.

Практическая значимость заключается в возможности значительного повышения надежности и долговечности узлов, работающих в условиях трения скольжения при низких температурах, за счет замены сталей 08X18Н9Т и 03X17Н13М2 на высокоазотистую сталь 05X22АГ15Н8М2Ф (после закалки от 1100°С в воду). Это подтверждено актом опробования от АО «Криогенмаш». Результаты работы использованы в ООО «Синтоген».

Обоснованность и достоверность

Достоверность и научная обоснованность полученных результатов подтверждены комплексным подходом, включающим использование современного аналитического оборудования, воспроизводимостью результатов экспериментов, взаимным подтверждением данных различными методами и их соответствие с литературой.

Замечания по диссертационной работе

1. Во введении указана проблема низкой износостойкости сталей типа X18Н9Т при криогенных температурах. Однако переход к необходимости исследования триботехнических характеристик именно стали 05X22АГ15Н8М2Ф, а не каких-либо других сталей со стабильным аустенитом, приведённых автором в табл. 4.8 (стр. 124-125 диссертации) и выбора для нее термопластической обработки представлен без четкой логической связи.
2. В главе 2 в разделе «ковка и прокатка» не указано количество проходов для получения прутков с разной степенью деформации, отсутствуют данные по глубине упрочненного слоя. В связи с этим неясно,

- учитывалась ли возможность удаления наклепанного слоя в процессе токарной обработки и приработки образцов перед испытаниями.
3. В главе 3 сведения о наличии дисперсных наночастиц нитридов хрома и ванадия после закалки от 1100°C приведены со ссылкой на литературу, однако в диссертации прямых подтверждений этому нет. Также указано, что механически-перемешанный слой в зоне трибоконтакта выполняет амортизирующую функцию, но механизм явления не раскрыт. Данные по изменению состава этого слоя (например, методом ЭДС-анализа) могли бы прояснить этот важный момент.
 4. При определении взаимосвязи между энергией дефектов упаковки и износостойкостью аустенитных высокоазотистых сталей в четвертой главе не учитывается фактор локального разогрева в зоне контакта пары трения, который может привести к изменению ЭДУ в процессе испытаний.
 5. Повышение скорости скольжения и нагрузки меняет локальную температуру в зоне трения, реальную площадь контакта и скорость удаления продуктов износа. Это не было учтено автором.
 6. В работе представлены данные по ударной вязкости и износостойкости исследуемых высокоазотистых и углеродистых аустенитных сталей при комнатной температуре и в среде жидкого азота, однако не проведен сравнительный анализ изломов после ударных испытаний с морфологией изношенной поверхности. Наличие таких данных могло бы определить сходство или различие механизмов объемного и поверхностного разрушения.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации, а носят исключительно уточняющий или рекомендательный характер.

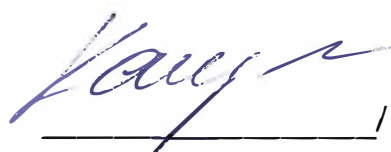
Заключение

Диссертационная работа Черненко Д.В. является законченной научно-квалификационной работой, содержащей совокупность новых научных и научно-технологических решений, имеющих большое прикладное значение. По результатам работы опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в базе данных RSCI и рекомендованных ВАК. Исследования по диссертационной работе докладывались на международных всероссийских конференциях.

Автореферат и публикации достаточно полно отражают содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа Черненко Д.В. отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, полностью соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" ВАК РФ и паспорту специальности 2.6.1, 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.

Согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Черненко Д.В.



/ Капуткин Дмитрий Ефимович

Капуткин Дмитрий Ефимович, д.т.н., специальность - 2.6.1 (05.16.01) - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; доцент, профессор кафедры физики ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА).

Адрес: 125493, г. Москва, Кронштадтский б-р, д.20

Тел. +7 (499)459-07-33

E-mail: kaputkin@mail.ru

Подпись Капуткина Дмитрия Ефимовича удостоверяю



На основании заявления перепечатан
С.В. Бужин
19.01.2026