

На правах рукописи

АНДРЕЕВ Андрей Константинович

**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЛИТЫХ
СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР**

Специальность 05.16.01 – Metalловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Анастасиadi Григорий Панeодович

доктор технических наук, профессор
Блинов Виктор Михайлович

доктор технических наук, профессор,
Пряхин Евгений Иванович

Ведущая организация: Институт физико-технических проблем Севера СО РАН

Защита состоится « » 2010 г. в часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.03 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « » 2010 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д 212.229.03,
доктор технических наук, профессор

Кондратьев С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. С начала восьмидесятых годов прошлого века наблюдается интенсивный рост добывающих отраслей промышленности. За счет расширения имеющихся и освоения новых месторождений в труднодоступных северных и восточных районах страны в несколько раз увеличилась добыча полезных ископаемых, нефти и газа.

В связи с этим резко возросла потребность в горнодобывающей технике северного исполнения. Из-за нехватки такой техники, а в большинстве случаев просто из-за её отсутствия, в районах с низкими температурами в зимний период эксплуатировались машины в исполнении для более умеренного климата. Это вызвало снижение их производительности в среднем в 1,5 раза по сравнению с летним периодом, наработка на отказ уменьшалась в 2-3 раза, а фактический срок службы сокращался по сравнению с нормативами в 2-3,5 раза, что привело к потерям, которые исчислялись десятками миллиардов рублей.

Поэтому одной из важнейших научно-технических проблем, в рамках комплекса поставленных задач по освоению северных территорий страны, явилась необходимость разработки новых хладостойких материалов, технологий их изготовления и обработки позволяющих повысить работоспособность и ресурс техники, эксплуатируемой в условиях низких климатических температур.

Значительную долю общей массы машин занимают литые детали, например, в тракторах, бульдозерах, экскаваторах до 20-40%. При постановке задач исследований был проведен анализ производства машиностроительных заводов различных отраслей промышленности, который показал, что:

- более 70 % стальных отливок изготавливались из обычных углеродистых сталей марок 20-55Л, которые обладают низкой трещиностойкостью и не гарантируют эксплуатационную надежность деталей при низких температурах;
- в различных отраслях машиностроения ответственные литые детали необоснованно были отнесены к первой группе (ГОСТ 977-75) т.е. контроль качества осуществлялся только по химическому составу и размерам отливок;
- допускаемые отраслевыми техническими условиями высокие содержания серы и фосфора в стали не способствовали повышению культуры производства, совершенствованию технологии ее выплавки и модифицирования, что не позволяло обеспечить надежную работоспособность литых деталей в условиях низких климатических температур;
- выбор сталей для литых деталей часто осуществлялся без учета реальных условий, возникающих при эксплуатации техники, что приводило к неоправданному завышению массы машин, увеличению расхода запасных частей и снижало эффективность использования техники;

Указанные недостатки делали неконкурентоспособными отечественную технику с продукцией ведущих иностранных машиностроительных фирм. Проведенные исследования показали, что более высокая работоспособность импортных деталей при низких температурах связана, в основном, с традиционно известным способом повышения механических свойств и хладостойкости - ле-

гированием стали никелем и молибденом. Однако высокая стоимость и дефицит указанных элементов делают экономически невозможным использование их для отливок массового назначения.

В связи с этим многие предприятия были вынуждены сами разрабатывать новые составы сталей, работать по собственным ТУ, ОСТам, по заключениям и рекомендациям НИИ и т.п.

Для исправления сложившейся ситуации требовалось создание теоретической базы позволяющей решать поставленные задачи в едином комплексе. Поэтому особо значимыми становятся задачи разработки составов низко- и рационально легированных хладостойких сталей и технологии их производства.

Настоящая работа посвящена поиску путей решения указанных проблем. Полученные результаты, особенно актуальны сегодня, когда среди приоритетных направлений развития экономики России важнейшее место отводится освоению природных ресурсов северных регионов страны.

Цель работы. Целью работы является разработка научных принципов легирования литых хладостойких сталей различного уровня прочности и износостойкости; уточнение теоретических положений и практических рекомендаций по технологии изготовления, обработки и методам их испытаний, позволяющих повысить работоспособность и ресурс ответственных литых деталей и сварно-литых конструкций техники в северном исполнении.

Для достижения поставленной цели были решены **следующие задачи:**

- проведен научно-технический анализ и выявлено влияние конструкционных, технологических, эксплуатационных факторов на хладостойкость и трещиностойкость литых сталей и установлена связь их структурных особенностей с характеристиками разрушения;

- выполнены теоретические и экспериментальные исследования по влиянию раздельного и комплексного легирования, конечного раскисления, модифицирования и режима термической обработки на структуру, механические свойства, абразивную износостойкость и хладостойкость литых сталей; на основании проведенных исследований научно обоснованы технические требования к хладостойким сталям и технологические условия их производства необходимые для повышения эксплуатационной надежности отливок в экстремальных климатических условиях;

- определен необходимый для требуемой работоспособности уровень механических свойств, абразивной износостойкости и хладостойкости сталей для сварно-литых деталей рам большегрузных тракторов, опорных катков и зубьев ковшей мощных карьерных экскаваторов;

- проведены исследования по определению в диапазоне температур до минус 60 °С фактической хладостойкости ряда ответственных литых деталей горнодобывающей техники и разработаны требования к сталям, обеспечивающих их надежную работу в условиях низких климатических температур;

- разработаны рациональные составы литых хладостойких сталей различного уровня прочности, технология их производства, изготовлены промышленные партии отливок, оценены их технологические свойства и проведены натурные испытания у потребителей;

- для разработки нового надежного метода оценки сопротивления стали хрупкому разрушению исследовано влияние химического состава, термической обработки, размеров и качества поверхности образцов, прикладываемой нагрузки на скорость микропластической деформации в диапазоне температур от -196 до $+20$ °С.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработаны научные принципы легирования литых хладостойких сталей с повышенной работоспособностью для деталей ответственного назначения техники, эксплуатирующейся в условиях низких климатических температур, включающие в себя вопросы оптимизации химического состава, технологии выплавки, обработки, методов их испытаний на стадии изготовления и эксплуатации;

- установлено влияние отдельного и комплексного легирования на механические свойства, хладостойкость и трещиностойкость литейных конструкционных сталей; на основании чего разработаны и оптимизированы составы сталей различного уровня прочности и износостойкости;

- определены оптимальные концентрации нитридообразующих элементов по температуре начала образования нитридов, а на основе анализа фазового равновесия в системе твердый раствор - легирующие элементы – условия, при которых в максимальной степени обеспечивается эффект дисперсионного твердения и измельчения зерна в малоперлитной ванадийсодержащей стали;

- обоснована необходимость создания и разработана методика исследования абразивной износостойкости сталей, в том числе при низких температурах, позволившая изучить влияние химического состава, механических свойств и режимов термической обработки на износостойкость среднеуглеродистых легированных литых сталей;

- для оценки склонности сталей к хрупкому разрушению предложена новая характеристика критической температуры хрупкости - $T_{к.р.}$ (температура критической релаксации), которая определяется по положению максимума температурной зависимости скорости микропластической деформации;

- установлена зависимость между характеристиками трещиностойкости, хладостойкости и структурным состоянием различных литейных сталей, работающих в условиях Сибири и Крайнего Севера.

Практическая значимость работы:

- разработаны высокопрочные стали для ответственных деталей техники в северном исполнении, в частности, для опорных катков и зубьев ковшей мощных карьерных экскаваторов и хладостойкая, малоперлитная, экономнолегированная сталь для сварно-литых конструкций;

- разработана и рекомендована технология выплавки, раскисления и модифицирования хладостойких сталей с гарантированной ударной вязкостью при температуре минус 60 °С;

- разработана установка для проведения ускоренных испытаний абразивной износостойкости сталей для рабочего оборудования горнодобывающей техники, в том числе, при низких температурах;

- предложены рекомендации по выбору материалов для изготовления зубьев ковшей экскаваторов в зависимости от твердости добываемых пород;

- предложен новый надежный и экономичный метод оценки критической температуры хрупкости по пику температурной зависимости микропластической деформации. Этот метод был использован при разработке литых хладостойких сталей и оценке надежности сталей, включенных в ГОСТ;

Результаты работы легли в основу разработки Государственного Стандарта «Отливки из хладостойкой и износостойкой стали», внедрение которого позволило обеспечить отечественную технику в северном исполнении высококачественными отливками из хладостойких сталей.

На защиту выносятся: разработка научных принципов легирования литых хладостойких сталей различного уровня прочности и износостойкости; уточнение теоретических положений и практических рекомендаций по технологии изготовления, обработки и методам их испытаний, позволяющих повысить работоспособность и ресурс ответственных литых деталей и сварно-литых конструкций техники в северном исполнении.

Достоверность научных положений и полученных результатов обоснована:

- общепринятыми исходными положениями;
- применением апробированных методов исследований и обработки результатов;
- соответствием результатов исследований, полученных автором, с результатами других исследователей в этой области;
- практической реализацией полученных результатов.

Личный вклад автора состоит в том, что, являясь ответственным исполнителем проводимых работ, участвовал:

- в постановке задач исследований, формулировке основных положений, определяющих научную новизну и её практическую значимость;
- в непосредственном руководстве и в проведении всех этапов исследований, обработки результатов экспериментов и практической реализации полученных результатов;

Апробация работы: Материалы, составляющие основное содержание работы, докладывались и обсуждались на более, чем 20 международных и всесоюзных конференциях и семинарах, в том числе: «Химия, технология и применение ванадиевых соединений», Свердловск, 1982г.,г. Чусовой (Пермская обл.) , 1987г.; У Всесоюзной научной конференции «Современным проблемы электрометаллургии стали», Челябинск, 1984г.; всесоюзной научно-технической конференции «Неметаллические включения и газы в литейных сплавах», Запорожье, ЗМИ, 1988г.; научно-технических конференциях «Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий», Запорожье, 1983, 1989г.г.; совещании рабочей группы № 4 Научно-технического совета ГКНТ СССР Ленинград 1982,1983,1985г.г.; всесоюзных научно-технических конференциях «Прочность и разрушение сталей при низких температурах», СПб, 1987, 1988, 1990г.г.; международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы

прочности материалов и конструкций при низких и криогенных температурах» СПб, 1995, 1997, 1998, 2000, 2002г.г.; международных научно-технических конференциях «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов», СПб, 2003, 2004, 2006, 2007, 2008, 2009 г.г.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано 35 научных работах, в том числе в двух монографиях.

Объем и структура работы: диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и основных выводов. Основное содержание работы и выводы изложены на 258 страницах машинописного текста. Диссертация содержит 122 рисунка и 47 таблиц, 327 наименований библиографического указателя.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, исходя из проблем повышения работоспособности и ресурса техники, эксплуатируемой в условиях низких климатических температур. Сформулирована цель исследований и поставлены основные задачи необходимые для её решения. Показана научная новизна результатов работы и их практическая ценность.

Глава 1. Проблемы создания литых деталей для техники в хладостойком исполнении. В практике эксплуатации современной техники хорошо известна опасность хрупкого разрушения деталей машин и механизмов при понижении температуры. Чаще всего хрупкие разрушения являются результатом воздействия ряда факторов. Однако, точная классификация причин поломок часто затруднена сложностью получения достоверной информации. Тем не менее, установлено, что в большинстве случаев основной причиной является хладноломкость сталей.

Исследованиями, проведенными сотрудниками ИФТПС ЯФ СО РАН (г. Якутск), было показано, что число хрупких разрушений литых деталей промышленных тракторов, в холодное время года увеличивалось в 2-4 раза. Заметный рост разрушений отливок происходил уже в температурном интервале от $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Например, количество поломок деталей ходовой части экскаваторов увеличивалось с 4-5% (в летний период) до 20 % (при $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$), а ковша и других рабочих органов - с 8% до 45% , соответственно.

Чтобы выяснить причины сложившейся ситуации нами был проведен анализ номенклатуры используемых сталей для отливок и технологии их производства на ряде машиностроительных и сталелитейных заводах: Чебоксарский завод промышленных тракторов (ЧЗПТ), Кировский (КЗ) и Ижорский (ИЗ) заводы, Уралвагонзавод (УВЗ), Люблинский литейно-механический завод (ЛЛМЗ), Бежицкий сталелитейный завод (БСЗ) и др., который позволил выяснить следующие основные причины низкой работоспособности литых деталей в суровых климатических условиях:

- более 70 % стальных отливок изготавливались из сталей марок 20-55Л, которые обладают низкой хладостойкостью и не гарантируют надежную работоспособность деталей при низких температурах;

- допускаемые отраслевыми техническими условиями высокие содержания серы и фосфора в стали 0,03-0,05% каждого элемента, а их суммарное содержание 0,07-0,09%;

- низкое содержание остаточного алюминия в расплаве (менее 0,030 %) и низкая основность шлака восстановительного периода (1,2-1,5), при высоком содержании FeO (2,5-4,5%) делают неэффективным модифицирование стали лигатурами содержащими ЩЗМ и РЗМ;

- в различных отраслях машиностроения ответственные литые детали необоснованно были отнесены к первой группе (ГОСТ 977-75) т.е. контроль качества осуществлялся только по химическому составу и размерам отливок;

- отсутствие действующего единого нормативного документа на отливки из хладостойких и износостойких сталей.

Указанные недостатки производства объясняют высокий разброс значений ударной вязкости (5 – 100 Дж/см²) при минус 60 °С, который наблюдался в сталях контролируемых плавов. При этом практически 100 % проконтролированных плавов на ЧЗПТ, КЗ, РВЗ не соответствовали требованиям по ударной вязкости при минус 60 °С на остальных предприятиях этот показатель был равен 15-80 %.

Ещё одной из важнейших причин низкого ресурса техники в северном исполнении являлось то, что при выборе материалов часто наблюдалось несоответствие структуры, механических свойств и хладостойкости сталей условиям эксплуатации литых деталей в суровых климатических зонах.

Примером этому может служить использование сталей 20Л и проката из стали 09Г2С для изготовления несущих сварно-литых рам тракторов «Кировец». Кроме того, стендовые испытания показали, что в отдельных сечениях литых деталей напряжения могут достигать 250 МПа, т.е. превышать предел текучести стали 20Л, равный 220 МПа. Следовательно, уже при первых циклах нагружения возможно пластическое течение металла в микрообъемах, что является недопустимым. Последнее подтверждает анализ 186 случаев наработки на отказ рам тракторов. При нормативе 8000 мото - часов - 9% отказов произошло при крайне малом количестве наработки трактора - менее 50м/ч; 36% < 500; 24% < 1000; 18% < 1500 м/час.

Несоответствие выбора стали реальным условиям работы литых деталей наблюдалось и у импортной техники. В частности, это относится к опорным каткам японских экскаваторов 204М и 201МSS с вместимостью ковша 20 м³ и 16 м³ соответственно, фирмы «Сумитомо-Марион». Средняя наработка на отказ одного опорного катка экскаватора 204М составляла 1904 мото-часа вместо 5000 м/час, гарантированных изготовителем.

Исследования металла катков, имевших типичный характер разрушений, показали, что их невысокая работоспособность, связана, прежде всего, с низким уровнем прочностных свойств и хладостойкости.

Анализ опыта эксплуатации карьерных экскаваторов отечественного производства показывает, что одной из проблем резкого снижения эффективности работы с понижением температуры, является повышенный расход зубьев ков-

шей. Абразивный износ зубьев в интервале температур от -30 до -45°C увеличивается почти в 2 раза.

В отечественной практике зубья ковша изготавливаются, в основном, из стали 110Г13Л. Марганцевый аустенит хорошо наклепывается при высоких удельных давлениях. После деформации его твердость может достигать 50 - 55 HRC.

Однако, как показали проведенные нами исследования, для увеличения твердости, хотя бы до 45 HRC на подвеске ковша экскаватора типа ЭКГ необходимо усилие в 18 раз превышающее предусмотренное конструкцией. Это подтверждается данными замеров твердости отработавшей в ОАО «Качканарский ГОК» передней стенки ковша экскаватора ЭКГ-10. В местах контакта с горной породой твердость стали 110Г13Л составляла всего 240 НВ. Поэтому при существующих конструкции и нагрузках на экскаваторах типа ЭКГ, в зубьях ковша из стали 110Г13Л не следует ожидать существенного наклепа. В этом случае по износостойкости она практически не отличается от обычной углеродистой стали. Этим, например, объясняется низкая стойкость зубьев из стали 110Г13Л в среде железистых кварцитов Полтавского ГОКа, где скорость износа составляет 0,17 кг/ч.

На основании вышеизложенного, были сформулированы задачи исследований.

Для повышения работоспособности техники холодного климата, в том числе промышленных тракторов в северном исполнении требовалось создание малоперлитной, экономнолегированной стали, обеспечивающей равнопрочность конструкции сварно-литой рамы в наиболее напряженных сечениях литых связей и лонжеронов. В результате анализа напряженного состояния рамы трактора, полученного по данным тензометрирования при стендовых испытаниях, был определен требуемый уровень свойств стали для отливок: $\sigma_{0,2} \geq 340$ МПа; $\sigma_b \geq 470$ МПа, $\delta \geq 20$ %, $\psi \geq 35$ %, $\text{KCV}^{-60} \geq 20$ Дж/см², которые должны обеспечиваться после нормализации.

Решение этой проблемы потребовало провести теоретические и экспериментальные исследования по изучению температуры образования и растворимости карбидных и нитридных фаз при нагреве в зависимости от химического состава стали. Установить закономерности процессов карбонитридообразования, упрочнения, разрушения сталей после термической обработки. Изучить влияние различных модификаторов на структуру, рафинирование, количество, состав и размеры неметаллические включений.

Увеличение ресурса работы тяжело нагруженных литых деталей разных видов техники, вызвало необходимость изучить широкий диапазон легирования сталей и на базе полученных данных научно обосновать и оптимизировать их составы для различных условий эксплуатации.

В частности, для повышения надежной работы ходовой части импортных экскаваторов, были выполнены расчеты напряженного состояния опорного катка и эквивалентных напряжений, возникающих в его объеме при максимально возможных нагрузках. На основании этого были определены свойства ($\sigma_{0,2} \geq 900$ МПа; $\delta > 10$ %; $\psi > 20$ %; $\text{KCV}^{-60} > 20$ Дж/см²) и состав стали, необходимый для надежной работы опорных катков.

При изготовлении рабочего оборудования горнодобывающей техники требуются не только высокая прочность, но и высокая износостойкость стали. В этой связи необходимо было дополнительно изучить влияние легирующих элементов на механизм износа и сопротивляемость абразивному изнашиванию. Результаты исследований были использованы при разработке рациональных составов литых хладо- и износостойких сталей для зубьев ковшей экскаваторов.

Решение проблем создания новых перспективных экономнолегированных материалов и ресурсосберегающих технологий осуществлялось с использованием научных принципов роли влияния карбонитридных упрочняющих фаз и легирующих элементов, структурных факторов, неметаллических включений на оптимальное сочетание прочности, износостойкости и сопротивление хрупким разрушениям. На основании этого были разработаны методы управления свойствами сталей, работающих в различных экстремальных условиях. Практическая реализация этого легла в основу создания сталей различного назначения. Технология их производства внедрена в сталелитейной промышленности. Стали используются для изготовления литых деталей горнодобывающей техники и являются перспективными для расширения их применения.

Принципиально важным моментом в повышении эксплуатационной надёжности техники в северном исполнении является существенное возрастание роли конструктивных и технологических факторов. Рассмотрение этих вопросов также нашло отражение в настоящей работе.

Практический опыт использования результатов данной работы в значительной степени способствовал созданию единого нормативного документа на отливки из хладостойкой и износостойкой стали.

Глава 2. Методы исследования, материалы, оборудование и образцы.

Дано обоснование выбора материалов для исследования, описаны технологии и режимы их выплавки, термической обработки, технологии изготовления образцов для механических испытаний и износостойкости.

В качестве материалов для исследований были выбраны обычные углеродистые 20-55Л, малоперлитные и среднеуглеродистые, низколегированные и сложнелегированные литые стали.

Опытные составы сталей выплавлялись в индукционных печах с основной футеровкой ёмкостью 60 и 120 кг. Промышленные плавки проводили в 7 - 12-тонных электродуговых печах в условиях ПО «Кировский завод», ОАО «Ижорские заводы» и ОАО «Обуховский завод». Определение химического состава сталей осуществлялось в аналитических лабораториях указанных предприятий, как стандартными методами аналитической химии, так и с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра и квантометра фирмы «Филипс», спектрального анализа на эмиссионном вакуумном спектрометре фирмы «Аэрель», спектрофотометра атомной адсорбции «Перкин Эльмер 703», дифракционного спектрофотометра ДФС - 13. Содержание газов в стали проводилось на установках фирм «Штройляйн» и «Бальцерс».

Заготовками для изготовления образцов для механических испытаний являлись тrefы по ГОСТ 977-75, плиты размером 35x120x250мм, слитки 80x80x250мм. Заготовки подвергались различным видам термической обработ-

ки, что позволило получить широкий спектр механических свойств и структур в исследуемых сталях.

Механические свойства сталей определялись при статических и динамических нагрузках на стандартных образцах по ГОСТ 1497-73 и ГОСТ 9454-78. Статические испытания выполнялись по стандартной методике на машинах «Инстрон -1196», «Инстрон -1255», «ИМ-4А», а динамически на ротационном копре и маятниковых копрах с осцилографированием. Исследование структуры сталей выполняли методами оптической металлографии и электронной просвечивающей микроскопии. Металлографические исследования производились на микроскопах «Неофот-21», ММР-2Р.

Распределение и морфологию структурных составляющих изучали на просвечивающем электронном микроскопе JEM-200СХ. Анализ поверхностей разрушения выполнялся с помощью растровых электронных микроскопов EM 535 фирмы «Philips», «Stereoscan-150», JSM-U3.

Исследования неметаллических включений в сталях проводили металлографическим и микрорентгеноспектральным и электролитическим методами.

*Определение критической температуры хрупкости по скорости микропластической деформации**. В данной работе исследовалась возможность определения критической температуры хрупкости литых и деформированных сталей с помощью измерения скорости микропластической деформации. Изготовленная для этого установка состоит из испытательной камеры, нагружающего устройства и измерителя скорости микропластической деформации. В качестве последнего использован лазерный интерферометр, позволяющий измерять скорость на базе деформации до 0,15 мкм (половина колебаний на интерферограмме). Точность определения скорости деформации при использовании лазерного интерферометра составляет $\pm 1\%$. Испытания образцов можно проводить в диапазоне температур от -196 до 20 С.

Испытания проводили следующим образом. Цилиндрический образец диаметром 6 и высотой 10 мм помещали в камеру и охлаждали до нижней из исследуемых температур. После этого его нагружали до напряжения значительно меньше предела текучести, чаще всего до $\sigma = 0,3\sigma_{0,2}$, и через определенный промежуток времени (3-10сек) измеряли скорость микропластической деформации образца. Затем образец разгружали, повышали его температуру до следующего из исследуемых значений, вновь нагружали той же нагрузкой и спустя тот же промежуток времени, с момента приложения нагрузки, осуществляли измерение скорости микропластической деформации образца и т.д.

Методика испытаний на абразивное изнашивание. На основании анализа существующих методов для исследования износостойкости были разработаны и приняты следующие схемы испытаний.

1. Совместно с Техническим Университетом г. Зиген (Германия) была разработана установка для испытания металлов на абразивное изнашивание о закрепленные на бумаге абразивные частицы. Схема испытания приведена на рис.1.

* Работа проводилась совместно с ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

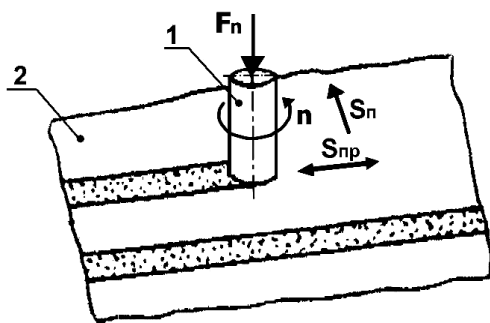


Рис. 1. Схема испытания износостойкости при низких температурах:

1 – образец; 2 – абразивная бумага;

F_n – нагрузка на образец; n – вращение образца вокруг оси;

S_{np} – продольное перемещение стола с абразивной бумагой;

S_n – поперечное перемещение образца

Закрепленный в шпинделе станка образец совершает поперечное движение и одновременно вращается вокруг своей оси. Благодаря этому образец не только всегда движется по новому абразиву, но и стачивается равномерного, имея неизменную площадь контакта. Стол с закрепленной на нем абразивной бумагой совершает возвратно поступательные движения в горизонтальной плоскости. По окончании испытания измеряется потеря массы образца, отнесенная к длине пробега.

Для испытаний на изнашивание металлических материалов при трении о закреплённые на бумаге абразивные частицы, были выбраны следующие характеристики образцов: диаметр образца 6 мм; длина образца – 40 мм; площадь $0,283 \text{ см}^2$. В качестве абразива использовали: SiO_2 - оксид кремния (HV 1000), Al_2O_3 - корунд (HV 1800) и SiC - карбид кремния (HV 2200). Размер абразивных частиц составлял 70 мкм и 200 мкм. Испытания проводились при начальных температурах $+20^\circ\text{C}$ и -80°C . Путь трения образца был выбран равным 10 м; удельная нагрузка - 175 и 310 Н; скорость скольжения - 10 м/мин. Эти режимы обеспечивают постоянство температуры в зоне трения и минимальный разброс значений величины износа испытываемых материалов.

2. Совместно с ОАО «Ижорские заводы» была разработана установка для испытания металлов на ударно-абразивный износ. За основу была взята испытательная машина Instron, на которой в циклическом режиме с частотой 2 Герца и усилием около 1500 кг в емкость с гранитным щебнем внедрялся образец сечением 10×10 мм. Оценка износа определялась по потере массы образца.

Глава 3. Влияние технологических, конструкционных и эксплуатационных факторов на хладостойкость литых сталей. Создание научных основ легирования и разработки новых конструкционных материалов, позволяющих повысить работоспособность литых деталей в условиях низких климатических температур, невозможно осуществить без изучения вопросов, связанных с влиянием различных факторов производства и эксплуатации на структуру, механические свойства и сопротивление разрушению сталей.

Влияние раскисления и модифицирования на хладостойкость литой стали исследовалось при разработке технологии производства отливок из стали 12ХГФЛ. При раскислении стали алюминием и силикокальцием требуемые значения ударной вязкости (KCV^{60} не менее 20 Дж/см^2) были получены только при введении 0,2-0,3 % силикокальция.

Обработка стали таким же количеством кальцийбарийсодержащим сплавом позволило получить более высокие и устойчивые значения KCV^{-60} на уровне 31-42 Дж/см²

Совместное раскисление стали лигатурами с ЦЗМ и РЗМ привело к получению высоких и стабильных результатов только в случае введения 0,2% силикокальция и 0,05% ферроцерия.

Проведенное исследование показывает, что для большей части ответственных изделий, работающих в условиях низких температур, вполне удовлетворяет вариант раскисления - модифицирования стали алюминием и ЦЗМ, являющийся наиболее технологичным и экономичным. В случае тяжело нагруженных деталей, целесообразно рекомендовать трехкомпонентное раскисление.

Модифицирующая способность лигатур определяется, в первую очередь, степенью раскисления стали. При высоком содержании кислорода в расплаве основное количество ЦЗМ и РЗМ расходуется на раскисление.

Для определения условий десульфурации был проведен анализ раскислительной и десульфурующей способности кальция при обработке стали.

Результаты расчетов показали, что для получения содержания серы $< 0,02\%$ необходимо предварительно раскислить металл до концентраций несвязанного кислорода не более $1,4 \cdot 10^{-3}$, $1,1 \cdot 10^{-3}$ и $0,9 \cdot 10^{-3}\%$ соответственно при 1550, 1600 и 1650 °С. Равновесная концентрация кислорода $< 1 \cdot 10^{-3}\%$ достигается только при наличии в стали остаточного алюминия $\geq 0,03\%$.

С целью проверки полученных результатов сталь указанного состава в первом случае раскисляли только алюминием, который вводили в расплав по расчету на остаточное содержание его в пределах 0,01-0,10%. Во втором случае ту же сталь дополнительно обрабатывали, лигатурой содержащей кальций и барий. Полученные результаты представлены на рис.2.

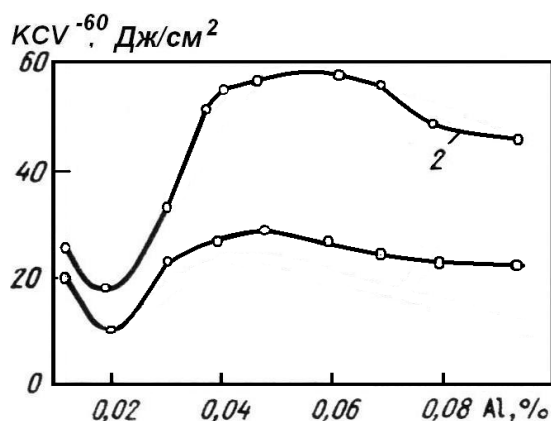


Рис.2 Влияние ЦЗМ и остаточного Al на ударную вязкость литой стали 12ХГФЛ при температуре -60 °С:
1 – без обработки ЦЗМ
2 – с обработкой ЦЗМ

Анализ найденных зависимостей подтверждает выводы, сделанные на основании расчетов. При концентрации остаточного алюминия в стали 0,02% наблюдается минимальная ударная вязкость, при этом обработка стали лигатурой содержащей ЦЗМ малоэффективна и незначительно уменьшает загрязненность ее пленочными сульфидами рис.3.

Исследование влияния остаточного алюминия на хладостойкость среднеуглеродистой сложнолегированной стали показало, что при содержании его более 0,06% наблюдается резкое снижение ударной вязкости при -60 °С. При этом

вязкий характер излома, меняется на межкристаллитный. В последнем случае поверхность кристаллитов обогащена нитридами алюминия (рис.4).

Таким образом, эффективная обработка стали ЦЗМ может быть достигнута только при глубоком раскислении стали алюминием и тщательном контроле его содержания в расплаве. Массовая доля алюминия в стали всех марок рекомендуется в пределах 0,03-0,06%.

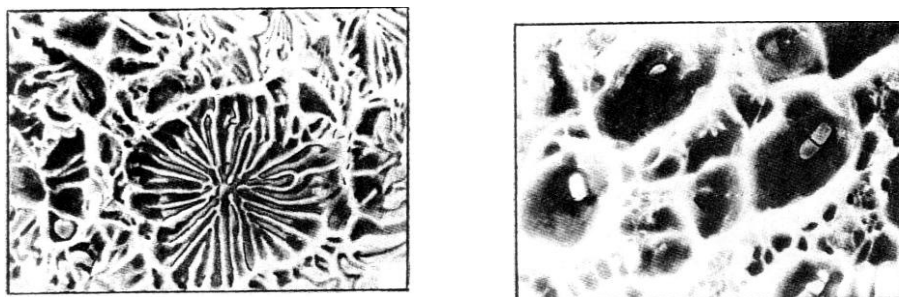


Рис.3. Неметаллические включения в изломе стали 12ХГФЛ: а – сульфиды в немодифицированной стали, х1000; б - сульфиды в модифицированной стали, х1200

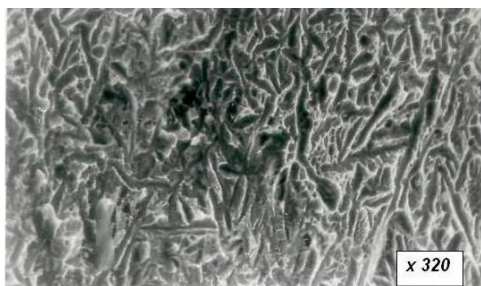


Рис. 4. Нитриды алюминия на поверхности кристаллитов.

В работе также изучалось влияние кальция, кальция и бария, кальция и церия на структурные параметры среднеуглеродистой нормализованной стали.

В металле, раскисленном алюминием перлит неравномерно распределялся по площади шлифа и располагался по границам ферритных полей в виде удлиненных конгломератов. Межпластинчатое расстояние изменялось (от 0,15 до 0,40 мкм). Модифицирование металла силикокальцием улучшало характер исходной структуры. Кальций способствовал образованию перлитных зерен более компактной формы.

Было показано, что при модифицировании комплексной кальцийбариевой лигатурой перлитные участки приобретали более компактную форму и имели тенденцию к глобуляризации Перлит в стали, содержащей ЦЗМ и РЗМ, также приобрел более компактную форму.

Рассмотренные особенности формирования ферритно – перлитной структуры существенным образом повлияли на характер микрорельефа изломов, уровень ударной вязкости и критическую температуру хрупкости.

Последняя, определённая, как температура, при которой ударная вязкость на образцах Шарпи составляла 30 Дж/см² для стали, раскисленной только Al была равна минус 30 °С; для стали раскисленной Al +SiCa - минус 45 °С; Al+(Ca+Ba) - минус 60 °С; Al + (SiCa + FeCe) – минус 55 °С.

На основании проведенных исследований была разработана технология выплавки стали гарантирующая требуемый уровень ударной вязкости, которая в

качестве рекомендаций включена в Государственный Стандарт «Отливки из хладостойкой и износостойкой стали».

Воздействие термической обработки на структуру и сопротивление разрушению литой стали. Термическая обработка является эффективным методом повышения прочности, вязкости и хладостойкости сталей. В связи с этим были проведены исследования влияния режимов термической обработки на свойства стали 20Л и 12ХГФЛ.

Термическую обработку осуществляли по следующим режимам : - нормализация при температуре 940 °С (1); закалка 940 °С в воде; отпуск 600 °С (2); гомогенизация 1100°С; закалка 940°С вода; отпуск 600°С (3); нагрев до 1100°С, четырехкратный нагрев в межкритическом интервале, охлаждение в воде после первого цикла, после последующих – на воздухе (4).

Из результатов испытаний следует, что термоулучшение, ступенчатый режим и термоциклическая обработка обеспечили более высокий уровень прочностных свойств и ударной вязкости сталей по сравнению с нормализацией. Критическая температура хрупкости ($T_{кр}^{50}$) для 2 и 3 вариантов термической обработки снизилась относительно варианта 1 в 1,5 раза, а после ТЦО в 2 раза. Это объясняется характером получаемой структуры и измельчением зерна.

При замене нормализации на ТЦО произошло изменение структуры от ферритно-перлитной к мелкодисперсной упорядоченной смеси перлитобразного сорбита и феррита. В нормализованной структуре достаточно хорошо видны контуры грануляционной сетки, которые почти полностью исчезают после термоциклирования.

Микрорельеф излома образцов, испытанных на ударный изгиб при -60 °С в первом случае образован фасетками скола, а во втором (при термоциклировании) в изломе наблюдается квазискол, что свидетельствует о более высокой энергоемкости разрушения.

Следует отметить, что гомогенизация с последующим улучшением и термоциклическая обработка значительно увеличивают затраты и время на производство отливок, что может быть оправдано при изготовлении деталей из сложнолегированных сталей ответственного назначения. Для малоуглеродистых экономнолегированных сталей наибольший интерес представляет термоулучшение. Однако применение этого вида термической обработки для мало-перлитных сталей не нашло пока широкого распространения из-за недостатка данных о влиянии улучшения на механические свойства стали. Поэтому в ходе работы были проведены такие исследования, которые показали, что применение для низкоуглеродистой стали закалки и отпуска позволяют получить ощутимый рост комплекса механических свойств. Целесообразность этих режимов заключается не только в реализации эффекта упрочнения, но и появлении широкой возможности варьирования прочностными, пластическими свойствами путем применения различных температур отпуска.

Таким образом, закалка с отпуском для стали 12ХГФЛ позволяет получать значительно больший эффект, чем обычная нормализация.

Для сталей, закаливающихся на мартенсит, термоулучшение позволяет получить наилучшее сочетание механических свойств. Однако в случае низкой прокаливаемости или отпускной хрупкости эта термическая обработка не дает положительного эффекта.

В работе было исследовано влияние прокаливаемости на свойства стали 30ХМЛ. При проведении закалки и высокого отпуска с увеличением размера отливок вследствие неудовлетворительной прокаливаемости были получены более низкие значения механических свойств и существенно более высокие критические температуры хрупкости. Увеличение сечения привело к образованию смеси структур мартенсита (около 20%) верхнего и нижнего бейнита (около 70%) и участков феррита (около 10%).

Видимо, наличие верхнего бейнита и особенно свободного феррита привело к существенному падению уровня механических свойств.

Контроль качества деталей при создании техники в северном исполнении имеет важное значение. В этой связи, проведенные исследования по изучению влияния масштабных факторов характера прикладываемой нагрузки формы, размеров дефектов и т. п. на структуру, механические свойства и хладостойкость литых сталей, позволяет получать достоверную информацию о надежности крупногабаритных изделий и конструкций. Это относится и к разработанной методике определения критической температуры хрупкости по скорости микропластической деформации. Анализ температурной зависимости спектров скоростей деформации образцов разных сталей показал, что существуют интервалы температур в которых микропластическая деформация имеет ярко выраженный максимум (пик) рис.5. При температурах ниже этой области процессы, выравнивающие локальные напряжения, практически не протекают. При более высоких температурах они протекают весьма быстро, и основная часть деформации реализуется ещё при нагружении, а измеряемая скорость соответствует участку кривой затухающей ползучести. В том и другом случае значения скорости микропластической деформации существенно ниже, чем при температуре пика, названной нами критической температурой релаксации ($T_{к.р}$).

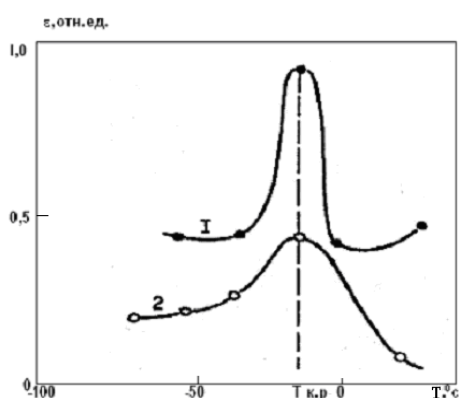


Рис.5. Положение пика температурной зависимости скорости микропластической деформации образца стали 20ГТЛ при $\sigma = 250$ (1) и 130 (2) МПа .

$T_{к.р}$ нечувствительна к состоянию поверхности образца, виду напряженного состояния, размерам образцов, что дает возможность испытывать малогабаритные образцы, и использовать простые схемы нагружения. К значительным изменениям вида спектра могут приводить термообработка и предварительная

макропластическая деформация. Для сталей относящихся к разным классам, данная зависимость может существенно различаться и по температуре максимумов, и по их относительной амплитуде.

Установлено, что в диапазоне климатических температур у сталей наблюдается только один пик на температурной зависимости скорости микропластической деформации, а температура $T_{к.р.}$, соответствующая её максимуму, хорошо коррелирует с критической температурой хрупкости, определяемой по 50% - ной вязкой составляющей в изломе (табл. 1).

Таблица 1. Критические температуры T_{50} и $T_{к.р.}$ различных марок сталей

Марка стали	T_{50}	$T_{к.р.}$	Марка стали	T_{50}	$T_{к.р.}$
08ГТЛ	-40	-36	38ХМА	-60	-50
08ГТФЛ	-16	-11	38Х2Н2МА	-100	-97
20ГТЛ	-12	-10	38ХС	-38	-34
12ХГФЛ	-25	-22	38ХСБ	-42	-37
35Л	-36	-30	38ХСФ	-50	-45

Таким образом, оценка критической температуры хрупкости по пику температурной зависимости скорости микропластической деформации отличается от других методов существенно большей определенностью и имеет четкий физический смысл, что свидетельствует о перспективности использования критерия $T_{к.р.}$ для оценки склонности сталей к хрупкому разрушению в научных исследованиях и для контроля качества при производстве хладостойких сталей.

Глава 4. Создание малоперлитной экономнолегированной стали для сварно-литых конструкций. В общем объеме отливок для техники в северном исполнении большую долю составляют крупногабаритные отливки для сварно-литых конструкций с требуемым уровнем прочности до 500 МПа. Для повышения надежности сварных соединений и хладостойкости указанных отливок целесообразно использовать малоперлитную сталь с содержанием углерода менее 0,20 %. В сталях с малоперлитной структурой, в первую очередь необходимо повысить способность феррита сопротивляться развитию трещины.

Механизмами упрочнения сталей являются: твердорастворный ($\Delta\sigma_{т.р.}$); дислокационный ($\Delta\sigma_{д.}$); дисперсионный ($\Delta\sigma_{д.у.}$); зернограничный ($\Delta\sigma_{з.}$). Основными факторами упрочнения литых ферритно-перлитных сталей являются твердорастворное (25-45 %), дисперсионное (20-25 %) и зернограничное (30-40 %) упрочнение. Как правило, доля других компонентов упрочнения не превышает в сумме 20%, т. е. они не вносят существенного вклада в предел текучести низколегированной стали. На практике наиболее целесообразно использовать дисперсионное упрочнение, так как карбонитридные фазы вызывают упрочнение в результате не только собственного вклада, но и косвенного воздействия на зернограничное упрочнение.

Ванадий образует карбонитриды количество которых наиболее легко регулировать в процессе нормализации, т.е. при сравнительно небольших температурах.

Определение состава стали осуществляли исследованием сталей с содержанием углерода в диапазоне 0,08 – 0,20% углерода (верхний предел установлен исходя из требований к свариваемости, а нижний обеспечением необходимой прочности) при последовательном повышении комплексности легирования. Анализ полученных данных показывает, что основным фактором повышения хладостойкости является снижение содержания углерода. Уменьшение его количества с 0,22 до 0,07 % привело к снижению T_{50} с 5 до -38°C при одновременном уменьшении прочности на 30 %. Несмотря на то, что ударная вязкость повышалась и при легировании марганцем, а также марганцем совместно с ванадием, снижение содержания углерода в стали действует в этом направлении более эффективно (рис.6).

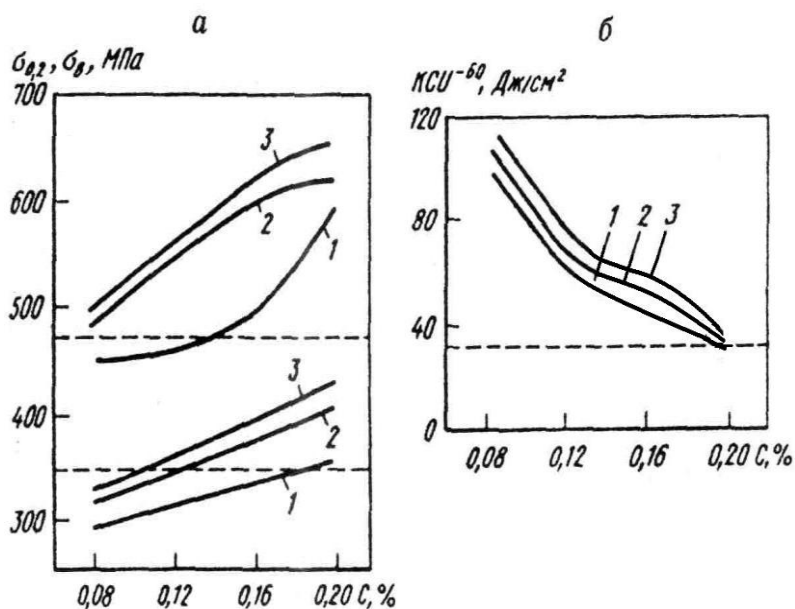


Рис.6. Зависимость прочностных характеристик (а) и ударной вязкости (б) в сталях, легированных:

1,2 % Mn (1); 1,2 % Mn и 0,1 % V (2); 1,2 % Mn и 0,1 % V и 0,6 % Cr (3) от содержания углерода.

(пунктирной линией обозначен требуемый уровень свойств)

Исследования показали, что требуемая хладостойкость стали после нормализации достигается за счет одновременного снижения количества перлита в структуре, измельчения зерна и изменения морфологии неметаллических включений. Установлено также, что необходимый уровень механических характеристик обеспечивается дополнительным легированием стали марганцем, хромом и ванадием при содержании углерода в пределах 0,10-0,16%, т.е. наиболее высокая хладостойкость при заданной прочности наблюдается у стали типа 12ХГФЛ.

В сталях с карбонитридным упрочнением очень важно определить оптимальное содержание карбонитридообразующих элементов и азота. Положительное влияние нитридов на качество проявляется, как правило, только при определенных для данной марки стали концентрациях нитридообразующих элементов и азота. Повышение служебных характеристик вызывают нитриды, имеющие благоприятную морфологию, определяемую температурой начала выделения нитридных фаз.

Расчет проводился по программе, разработанной на кафедре «Металлургия чёрных металлов» ГПУ СПб. Ставилась задача найти зависимость значений ударной вязкости при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ от температуры начала образования нитридов в стали 12ХГФЛ. (рис. 7).

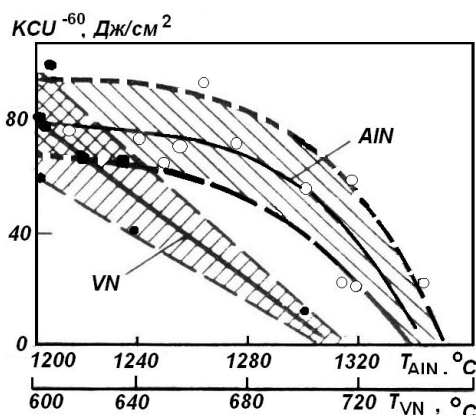


Рис. 7. Влияние температуры образования нитридов Al и V на ударную вязкость сталей: 0,10-0,16%С, 1,20%Mn, 0,30%Si, 0,40%Cr, 0,01-0,20%Al, 0,05-0,20%V, 0,01-0,03%N

Как показывает расчет, нитриды алюминия выделяются в зависимости от концентрации алюминия и азота в стали указанного состава при температуре 1200-1340 $^{\circ}\text{C}$. При этом опытные данные с точностью $\pm 15\%$ описываются уравнением параболы, $KCU^{-60} = -10126 + 16,6 T_{AIN} - 0,00675 T_{AIN}^2$.

Нитриды ванадия выделяются в стали в температурном интервале 600-700 $^{\circ}\text{C}$. Прослеживается связь между температурой выделения нитридов VN и ударной вязкостью при -60°C . Эта зависимость с точностью $\pm 23\%$ описывается уравнением прямой $KCU^{-60} = 471 - 0,65 T_{VN}$.

Найденные оптимальные температуры начала выделения нитридов ($T_{\text{опт AlN}} = 1200 - 1270\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{\text{опт VN}} = 600 - 630\text{ }^{\circ}\text{C}$) послужили инвариантом для расчета областей оптимальных концентрации нитридообразующих и азота в стали (рис.8).

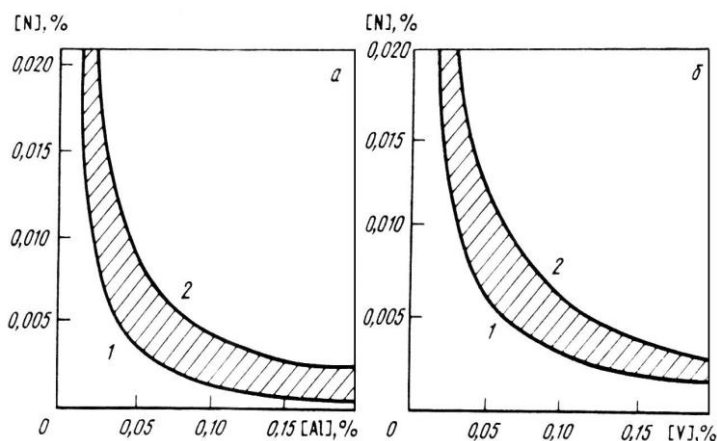


Рис. 8 Области оптимальных концентраций азота и нитридообразующих элементов в малоперлитной стали а) - изотермы, соответствующие равновесию стали с нитридом алюминия (1 - 1200 $^{\circ}\text{C}$; 2 - 1270 $^{\circ}\text{C}$); б) - изотермы, соответствующие равновесию стали с нитридом ванадия (1 - 600 $^{\circ}\text{C}$; 2 - 630 $^{\circ}\text{C}$)

Эти области ограничены изотермами реакций нитридообразования, соответствующие верхним и нижним границам оптимальных температур и могут быть использованы для выбора составов сталей (по нитридообразующему элементу и азоту), обладающих высокой ударной вязкостью при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. В данном случае оптимальные концентрации алюминия составляют 0,03-0,08 %, ванадия - 0,04-0,10%, азота - 0,008-0,012 %.

Качество стали будет определяться не только морфологией образования нитридов стали но и поведением их в процессе термической обработки. Для максимального повышения прочности стали за счет дисперсионного твердения карбонитриды ванадия при нагреве должны быть полностью растворены в аустените. В этих условиях необходимо иметь оптимальное содержание алюминия нитриды которого могли бы эффективно сдерживать рост зерна аустенита при термической обработке.

С целью выяснения условий при которых в максимальной степени обеспечивается дисперсионное твердение и измельчение зерна за счет дисперсионных частиц, был выполнен термодинамический анализ фазового равновесия в системе $\gamma\text{-Fe} - \text{V}(\text{C}, \text{N}) - \text{AlN} - \text{Al}_2\text{O}_3$.

Было принято допущение, что отклонения от стехиометрических соотношений в карбонитридах отсутствуют. Для расчета приняли следующие области исследуемых концентраций: ванадия - 0,05-0,20%, алюминия - 0,02-0,10%, азота - 0,005-0,03%. Расчеты проводили для двух содержаний углерода (0,12 и 0,16%) и двух температур нормализации (900 и 950°C). Учитывали также, что сталь содержит 1% марганца, 0,2% кремния и 0,01% кислорода.

Систему из четырех уравнений с четырьмя неизвестными решали численным методом Ньютона-Рафсона. В результате решения систем уравнений были рассчитаны концентрации углерода, азота, алюминия и ванадия в аустените, количество алюминия, связанного в AlN и Al_2O_3 , количество азота, связанного в AlN и $\text{V}(\text{CN})$. Данные расчетов сведены на диаграммах фазового равновесия (рис.9).

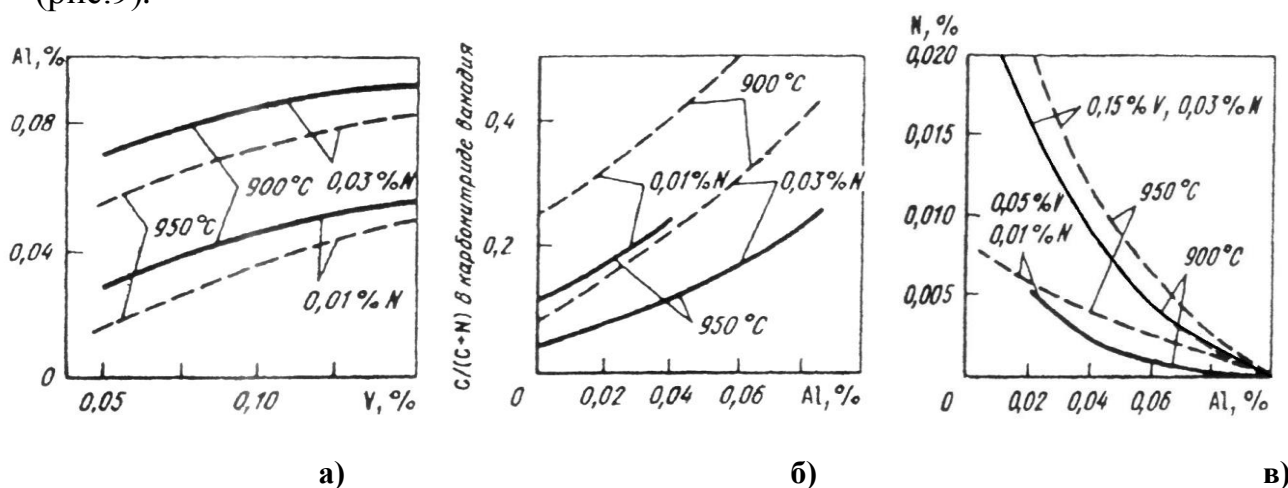


Рис. 9(а). Влияние ванадия, азота и температуры нагрева на максимально допустимую концентрацию алюминия в стали

Рис. 9(б). Влияние алюминия и температуры нагрева на состав карбонитридов в стали с 0,12 % С и 0,15 % V

Рис.9(в). Влияние алюминия, ванадия, азота и температуры нагрева на концентрацию азота аустените.

Полученные диаграммы позволяют проследить изменение равновесных концентраций элементов при изменении исходного химического состава стали и температуры ее нагрева под нормализацию и установить температурно-концентрационные условия, при которых достигается полное растворение карбонитридов ванадия в стали.

На основании проведенных экспериментальных исследований и теоретических расчётов для изготовления сварно-литых рам большегрузных тракторов был определён следующий химический состав литой хладостойкой стали 12ХГФЛ (масс.%) : углерод 0,10 – 0,16; марганец 0,9 – 1,3; кремний 0,2 – 0,6; хром 0,2 – 0,6; ванадий 0,10 – 0,15; содержание серы и фосфора не более 0,020% каждого. Рекомендуемое содержание остаточного алюминия составляет 0,3–0,06%, а кальция при обработке ЦЗМ 0,025 – 0,035%. Температура нагрева под нормализацию 900–950°C.

В ходе проведения промышленных испытаний стали 12ХГФЛ было выплавлено более 250 тонн металла из которого были изготовлены литые детали для рам. Отливки рамы для трактора имеют массу от 200 до 250 кг, сложную конфигурацию, характеризуются наличием протяженных участков с толщиной стенки 12 мм.

Анализ металла промышленных плавов показал, что склонность к хрупкому разрушению стали 12ХГФЛ в сравнении с 20Л существенно ниже. Критический коэффициент интенсивности напряжений при динамическом нагружении в 1,4 раза выше. Работа развития трещины при – 60 °С у стали 12ХГФЛ составляет 14 Дж/см² (у стали 20Л – 6 Дж/см²), а критическая температура хрупкости T₅₀ равна – 22 °С (у стали 20Л она составляет + 5°C).

Сталь 12ХГФЛ имеет высокие литейно-технологические свойства, хорошую свариваемость и обрабатываемость резанием. Сталь не склонна к образованию горячих и холодных трещин при сварке, а механические свойства и хладостойкость сварных соединений удовлетворяют указанным требованиям. Износ режущего инструмента при обработке литых деталей из стали 12ХГФЛ снижается по сравнению с 20Л в 1,35 раза.

Натурные испытания более 500 тракторов с литыми деталями из стали 12ХГФЛ подтвердили свою высокую надёжность в суровых климатических районах нашей страны, что послужило основанием для включения ее в ГОСТ 21357-87 («Отливки из хладостойкой и износостойкой стали»).

Глава 5. Разработка составов литых высокопрочных сталей для деталей, работающих при низких климатических температурах. Для сталей со структурой мартенсита и продуктов его отпуска методы расчёта вклада каждого механизма упрочнения значительно сложнее, чем для ферритно – перлитных сталей. Поэтому, чтобы одновременно получить высокую прочность и вязкость стали, требуется сложное комплексное легирование с использованием многофакторного планируемого эксперимента. В связи с этим, в работе было исследовано влияние легирующего комплекса (C, Ni, Cu, Cr, Mn, N) при постоянном содержании V, Al, Mo, Si и Ca на механические свойства стали. В качестве параметров оптимизации были приняты: временное сопротивление при комнатной температуре, ударная вязкость и вязкость разрушения при температуре эксплуатации, а в качестве факторов – концентрации шести компонентов сплава. Предельные концентрации остальных легирующих элементов были установлены на основании результатов всестороннего анализа опыта эксплуатации хладостойких литейных сталей высокой прочности. В связи с тем, что температура отпуска существенно сказывается на механических свойствах стали, в матрицу

планирования был введен дополнительно этот фактор. Температура отпуска составляла 620 и 670 °С.

В соответствии с принятой моделью и числом степеней свободы равным двум по программе "Синтез квази-D-оптимального плана" был построен план из 25 опытов.

По результатам механических испытаний и значениям вязкости разрушения, характеризуемым K_{IC}^{-60} , используя алгоритм отбора признаков, были получены математические модели зависимости параметров оптимизации от состава стали и температуры отпуска. На основании их анализа было установлено, что:

- при комплексном легировании литой стали повышение содержания хрома от 1,05 до 2,23 % разупрочняет сталь при малом содержании углерода (0,15%);

- повышение содержания марганца от 0,49 до 1,95% в рассматриваемых составах сталей снижает ударную вязкость при всех температурах испытаний, вязкость разрушения при минус 60 °С и оказывает сильное стабилизирующее влияние на первичную структуру;

- наиболее интенсивное положительное влияние на свойства стали оказывает увеличение содержания никеля от 2,1 до 5,0%, повышая прочность, ударную вязкость и вязкость разрушения при температуре минус 60 °С;

- влияние углерода на вязкость стали носит экстремальный характер. Интервал концентраций, оказывающий неблагоприятное воздействие, зависит от температуры отпуска и содержания в стали хрома и марганца.

- с повышением вязкости разрушения сложнолегированных сталей при увеличении содержания меди с 0,33 до 0,95% и никеля с 2,1 до 5,0% возрастает доля вязкого и квазивязкого разрушения. Отрицательное влияние марганца на вязкость стали при увеличении концентрации от 0,49 до 1,95% сопровождается увеличением в изломе доли микрохрупкого разрушения.

Полученные модели, связывающие состав стали и ее свойства, были положены в основу оптимизации, которую проводили методом Розенброка с учетом обеспечения наилучших механических свойств при содержании легирующих элементов в выбранных пределах. При этом решались задачи оптимизации различной постановки:

1. Найти состав стали с максимальным значением временного сопротивления σ_b при ограничениях на ударную вязкость $KCU^{-60} \geq 50$ Дж/см².

2. Определить состав стали с максимальной ударной вязкостью $KCU^{-60} \Rightarrow \max$ при ограничениях на временное сопротивление $\sigma_b \geq 1100$ МПа.

3. Найти состав стали с максимальным значением вязкости разрушения при температуре - 60 °С.

Задачу решали при различных граничных условиях:

$$K_{IC}^{-60} \rightarrow \max \quad \text{при } \sigma_b \geq 1100 \text{ МПа}; \quad K_{IC}^{-60} \rightarrow \max \quad \text{при } \sigma_b \geq 1000 \text{ МПа};$$

$$K_{IC}^{-60} \rightarrow \max \quad \text{при } \sigma_b \geq 1100 \text{ МПа} \quad \text{и} \quad KCU^{-60} \geq 40 \text{ Дж/см}^2;$$

$$K_{IC}^{-60} \rightarrow \max \quad \text{при } \sigma_b \geq 1000 \text{ МПа} \quad \text{и} \quad KCU^{-60} \geq 40 \text{ Дж/см}^2.$$

Ограничения при оптимизации на K_{IC}^{-60} по уровню ударной вязкости исключают чисто хрупкие материалы. Остаются только те материалы, которые сохраняют запас пластичности при минимальной температуре эксплуатации.

Для полной экспериментальной проверки результатов оптимизации было выплавлено 15 составов сталей с содержанием легирующих элементов на разных уровнях. Решение задач оптимизации и результаты опытной проверки механических сталей полученных составов представлены в табл. 2. Стали содержали 0,38-0,47% Mo, 0,4-0,5 % Si, 0,13-0,14 % V и 0,03-0,04 % Al.

Пробные отливки подвергали гомогенизации при температуре 1180 °С, нормализации с 980 °С, отпуску при 650 °С. Окончательная термообработка включала нормализацию с 980 °С и отпуск при 650-670 °С

После указанной термообработки стали обеспечивают высокий комплекс механических свойств. При всех температурах испытаний сохранялся вязкий характер разрушения. Фрактографический анализ показал, что разрушение проходит по типу образования и слияния микропустот и сопровождается значительной локальной пластической деформацией. С повышением содержания углерода увеличивается дисперсность ямочных образований. На рис. 10 приведены фрактограммы типичных участков разрушения ударных образцов сталей с 0,15 и 0,30 % углерода при + 20 °С

Таблица 2. Результаты опытной проверки механических свойств
(в числителе - расчетные значения, в знаменателе - экспериментальные)

Содержание элементов, %						σ_B , МПа	КСУ ⁻⁶⁰ , Дж/см ²	K_{IC}^{-60} , МПа·м ^{1/2}
C	Mn	Cr	Ni	Cu	N			
0,14-0,18	0,5-0,8	1,8-2,2	3,0-3,6	0,7-0,8	0,015-0,030	900	50	95
0,15	0,5	2,1	3,2	0,8	0,020	880	60	89
0,22-0,27	0,5-0,8	2,1-2,4	4,1-4,5	0,8-0,9	0,025-0,030	1100	46	99
0,24	0,6	2,2	4,2	0,9	0,030	1060	50	94
0,28-0,35	0,5-0,8	2,0-2,2	3,6-4,0	0,6-0,8	0,025-0,030	1150	43	113
0,30	0,5	2,1	4,0	0,7	0,030	1080	41	109

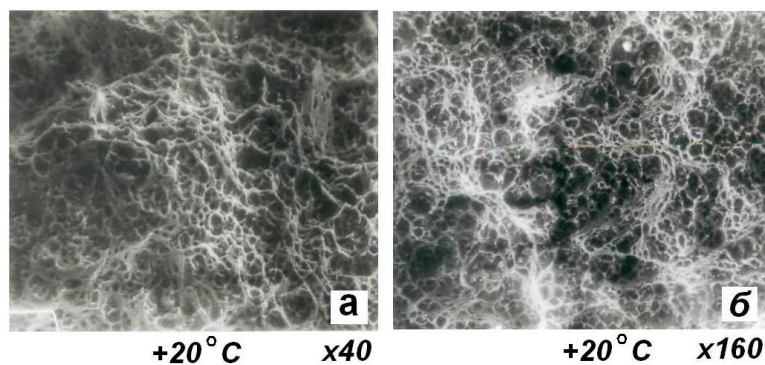


Рис.10. Фрактограммы ударных образцов сталей оптимальных составов табл. 2 а) (0,15% С) б) (0,30% С)

На рис. 11 показаны три основных типа неметаллических включений, присутствующих в стали. Нитридные частицы (3) мелкодисперсны и прочно связаны с матрицей.

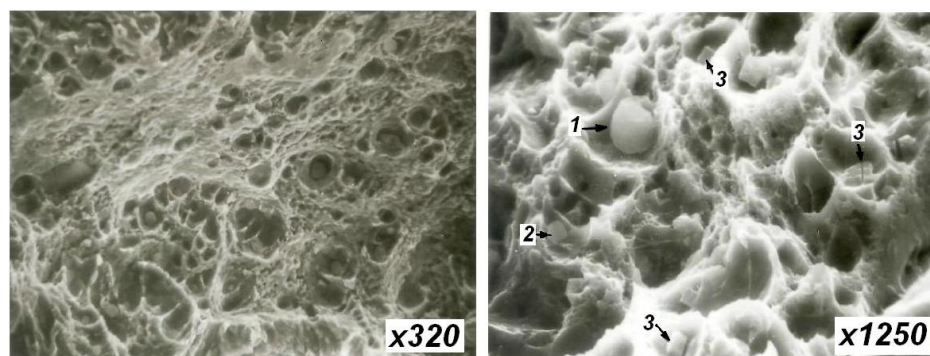


Рис. 11. Участок вязкого внутризеренного разрушения (при $t = -60^{\circ}\text{C}.$) с мелкими неметаллическими включениями.

- 1 – мелкие неметаллические включения глобулярной формы (до 10 мкм);
 2 – очень мелкие (до 2 мкм); 3 – включения нитридов.

Полученные результаты показывают, что использование критического коэффициента интенсивности напряжений в качестве параметра оптимизации позволяет получить высокие значения обычных механических характеристик (прочности, ударной вязкости). Оптимизация составов стали по прочности и ударной вязкости не дает существенного преимущества механических свойств по сравнению со сталью, имеющей лучшую вязкость разрушения.

Стали, найденных химических составов, могут быть рекомендованы для изготовления высокопрочных литых деталей. Результаты проведенных исследований были использованы в качестве исходных при разработке технологии изготовления опорных катков и зубьев ковшей карьерных экскаваторов.

Для разработки стали, обеспечивающей требуемые свойства опорных катков карьерных экскаваторов (см. гл.1) дополнительно были проведены лабораторные и промышленные исследования различных составов сталей и режимов термической обработки. К промышленному опробованию была отобрана сталь следующего химического состава: С- 0,27-0,33%; Si – 0,20-0,50%; Mn- 0,5-0,8%; Cr- 0,8-1,1%; Ni - 1,30-1,80%; Mo- 0,3- 0,5%; V- 0,05-0,15%; Ti – 0,01-0,04%; Al – 0,03-0,06%; Cu не более 0,4%; S и P не более 0,02% каждого. При выплавке стали предусматривается модифицирование силикокальцием (0,2%) и ферроцерием (0,1%).

Опытно- промышленная партия из 27 опорных катков (вес одного катка 480 кг), изготовленных в условиях ОАО «Обуховский завод», была установлена на импортные экскаваторы. Сравнительные испытания с катками изготовленными из японской стали СКQ-S в условиях разреза «Нерюнгринский» ПО Якутуголь показали, что предложенный состав стали более, чем в два раза, увеличивает работоспособность опорных катков, что позволило отказаться от импортных поставок запасных частей.

Глава 6. Опыт разработки хладо- и износостойких сталей для зубьев ковшей экскаваторов. Анализ заказов запасных частей к карьерным экскаваторам показывает, что основной поток отказов по износу падает на детали из литых сталей, которые подвергаются контакту с горными породами.

Неудовлетворительная стойкость литых деталей из стали 110Г13 при низких температурах приводит к простоям техники и большим экономическим по-

терям. Так масса зуба ковша экскаватора ЭКГ-10 составляет 0,3% от массы всей машины, а затраты на их приобретение – 25-30 % годовой стоимости запасных частей к этой машине. Потери усугубляются с повышением единичной мощности экскаваторов, так как увеличиваются нагрузки на детали и стоимость часа простоя. Поэтому износостойкость рабочего оборудования, является важнейшим показателем эксплуатационной эффективности горнодобывающей техники.

Были проанализированы и определены требования к сталям для зубьев ковшей экскаваторов, работающих в северных условиях. Стандартами эти требования не регламентируются, однако на основании имеющихся литературных и эксплуатационных данных можно сделать вывод, что значения предела прочности должно находится в пределах 950-1100 МПа, твердость стали должна быть не менее 30HRC, а ударная вязкость на образцах с острым надрезом при - 40 градусах не менее 25 Дж/см².

Поиск химических составов сталей, удовлетворяющих этим требованиям, проведен с учетом полученного опыта разработки высокопрочных хладостойких сталей, а также обзора литературных данных о влиянии структуры и химического состава на износостойкость стали.

Для составления матрицы и проведения математического планирования эксперимента по разработке рациональных химических составов сталей были установлены следующие границы варьирования опытных сталей, % : 0,30 – 50 C; 0,90 – 3,50 Cr ; 1,0 – 2,5 Ni ; 0,20 – 0,60 Mo.

Содержание остальных элементов было закреплено на постоянном уровне и составляло: 0,30-0,50% Si, 0,80-1,20% Mn; 0,10-0,15% V; 0,03-0,06% Al; ≤ 0,30% Cu; ≤ 0,02% S; ≤ 0,02% P. При построении математической модели был использован квази-D-оптимальный план второго порядка.

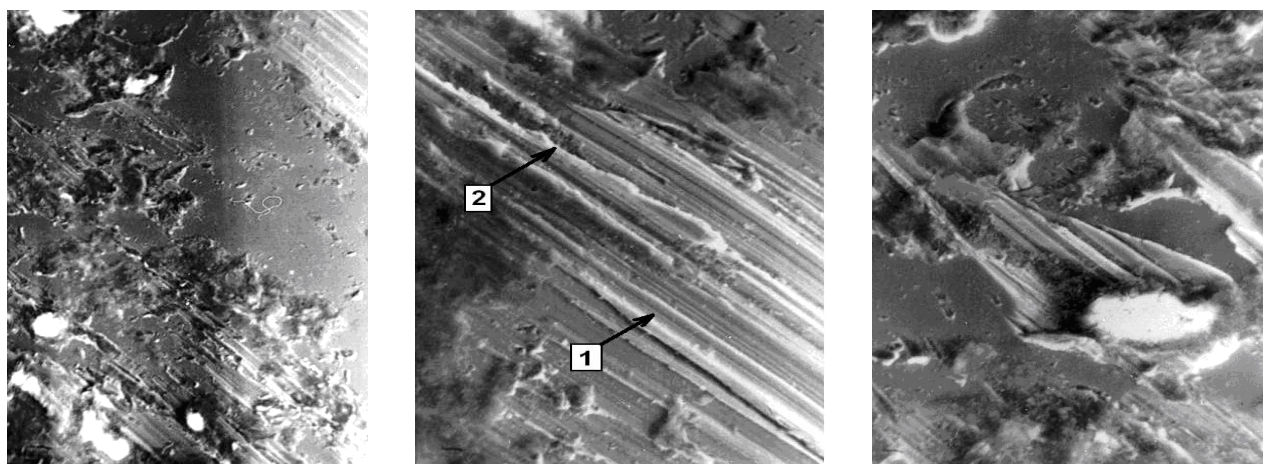
Параметром оптимизации являлась износостойкость образцов в среде и условиях, имитирующих эксплуатацию зубьев ковша экскаватора в реальных условиях. Экспериментальная часть работы проводилась кафедрой технологией металлов и металловедения СПбГУНиПТ совместно с Университетом г. Зиген (ФРГ), ОАО «Ижорские заводы» и ООО «ОМЗ-Спецсталь».

Всего было исследовано 20 различных составов опытных сталей, а также эталонные образцы из стали 110Г13Л.

Реализация матрицы планирования позволила определить зависимости износостойкости от химического состава сталей для различных абразивных материалов. Их анализ показал, что в значительной мере износостойкость зависит от массовой доли углерода, введение в сталь хрома, никеля и молибдена также сказывается благоприятно. При этом следует учесть, что углерод и хром оказывают отрицательное влияние на пластические характеристики, поэтому их содержание должно быть строго ограничено требованиями к сталям для зубьев ковшей. Никель и молибден напротив, оказывают положительное влияние на пластичность и хладостойкость, однако их количество в стали также должно корректироваться, но исходя из экономических соображений.

Введение кремния отрицательно сказывается на износостойкости, поэтому его содержание в стали должно ограничиваться только технологической необходимостью её выплавки.

Исследование механизма абразивного изнашивания опытных составов литых сталей осуществлялось с использованием фрактографии. Анализ образцов сталей с различной прочностью выявил все известные механизмы повреждения поверхности при абразивном износе: упругое и пластическое отеснение, микрорезание. Наиболее часто встречающимся механизмом являлось микрорезание, вызываемое внедрением частиц породы в поверхность металла и их дальнейшим перемещением. Однако, если частице не проникала на достаточную глубину, то основным видом повреждений становилось пластическое отеснение (царапание) – образование углублений на поверхности трения в направлении её скольжения. На рис.13 приведены типичные фрактограммы поверхности образца из опытной стали (типа 30ХГНМФЛ) после абразивных испытаний.



а) x 50

б) x 200

в) x 200

Рис.13 . Фрактограммы поверхности шлифа опытной стали

а – типичный участок поврежденной поверхности микрошлифа. Видны внедрившиеся частицы минерала и грубые риски;

б – на участках грубых рисков выявлены два механизма их образования:

1 - в результате микрорезания; 2 - в результате царапания с пластическим отеснением металла в виде гребешков на боковые стенки рисков;

в – участок поврежденной поверхности, где частица минерала начала царапать поверхность, затем произошло микрорезание и обломок частицы внедрился в металл с пластическим отеснением его в виде гребня.

На рис.14 показана полученная зависимость влияния твердости стали на её износостойкость.

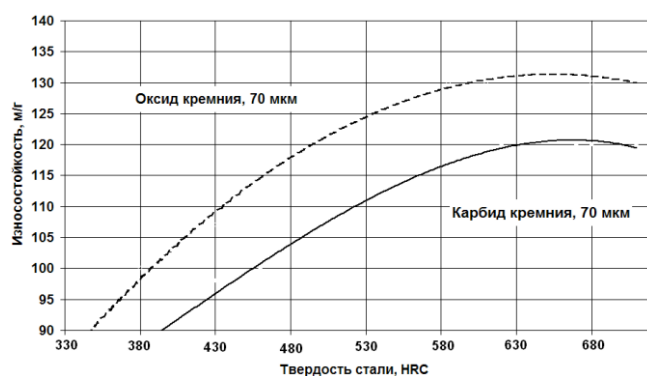


Рис.14. Влияние твердости стали на износостойкость.

Проведенные испытания и фрактографические исследования показали, что на начальном этапе увеличение твердости металла приводит к резкому росту износостойкости (Рис.14). Это связано с уменьшением глубины внедрения абразива в поверхность металла, что приводит к переходу от микрорезания к пластическому оттеснению. При дальнейшем увеличении твердости наблюдается замедление роста износостойкости и даже некоторый спад. Это связано с тем, что чрезмерное увеличение твердости приводит к охрупчиванию материала и выкрашиванию из поверхности отдельных микрообъемов металла, что отрицательно сказывается на износостойкости, особенно при ударно-абразивном износе.

С учётом установленных требований к сталям для зубьев ковшей экскаваторов была выполнена оценка по параметру «Износостойкость → max» и определено влияние режимов термической обработки на свойства опытных составов сталей. В результате для условий различных горных пород были установлены соответствующие группы материалов, состав и свойства которых приведены в табл.3, 4

Таблица 3. Химические составы рекомендуемых сталей

Породы	Легирующие элементы, масс %									
	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	V	Al	P	S
									не более	
Для малоабразивных пород	0,30-0,35	0,95-1,40	0,80-1,10	0,20-0,30	0,30-0,50	0,80-1,20	0,10-0,15	0,03-0,06	0,020	0,015
Для высокоабразивных пород	0,38-0,45	2,0-2,50	1,30-1,60	0,20-0,30	0,30-0,50	0,80-1,20	0,10-0,15	0,03-0,06	0,020	0,015

Таблица 4 Механические свойства и ударная вязкость сталей, не менее

Породы	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV ^{+20 °C} , Дж/см ²	KCV ^{-40 °C} , Дж/см ²	HRC	
Для малоабразивных пород	Закалка и отпуск 200°C							
	1600	1400	8	20	39	20	48	
	Закалка и отпуск 600°C							
	950	850	15	40	45	30	30	
Для высокоабразивных пород	Закалка и отпуск 200°C							
	1700	1500	5	10	33	15	53	
	Закалка и отпуск 600°C							
	1000	900	12	25	40	25	35	

Предложенные составы сталей внедрены на ООО «ОМЗ-Спецсталь». По утвержденным техническим условиям изготовлены опытно промышленные партии зубьев ковшей экскаваторов, которые проходят натурные испытания в различных условиях. Полученные предварительные результаты показывают, что разработанные литые стали обеспечивают повышение износостойкости по сравнению с применяемыми в настоящее время материалами на 20-30 %. Работы в этом направлении продолжаются.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выполнен комплекс исследований для разработки научных принципов легирования литых хладостойких сталей различного уровня прочности и износостойкости. Теоретически обоснованы и практически подтверждены условия выплавки, раскисления, модифицирования, термической обработки хладостойких сталей, а также методы их испытаний, гарантирующие повышение работоспособности и ресурса ответственных литых деталей в условиях низких климатических температур.

2. Исследовано влияние легирующего комплекса (C, Ni, Cu, Cr, Mn, N) при постоянном содержании V, Al, Mo, Si и Ca на механические свойства литейных конструкционных сталей и характер разрушения при многокомпонентном легировании. Использование многофакторного планируемого эксперимента позволило изучить широкий диапазон легирования и на базе полученных математических моделей научно обосновать и оптимизировать составы сталей, определить и уточнить технологические условия достижения высоких механических свойств и хладостойкости. Предложенные новые среднелегированные стали, обладают хорошей технологичностью, не требуют усложнения производственного процесса и рекомендованы для изготовления высокопрочных ответственных литых деталей.

3. Проведены термодинамические расчеты и экспериментальные исследования по определению оптимальных концентраций нитридообразующих элементов по температуре начала образования нитридов. На основе анализа фазового равновесия в системе γ -Fe – V(C, N) – AlN – Al₂O₃ показаны закономерности совместного влияния ванадия, алюминия и азота на условия наиболее полного эффекта дисперсионного твердения и связанного с этим измельчения зерна в малоперлитной ванадийсодержащей стали.

4. На основании теоретического анализа, и исследований проведенных в промышленных условиях, разработана технология выплавки стали в дуговых электропечах с основной футеровкой, обеспечивающая содержание серы и фосфора не более 0,020% каждого элемента. Уточнен уровень остаточного алюминия в жидкой стали, позволяющий максимально использовать рафинирующий и модифицирующий эффект от использования щелочноземельных и редкоземельных металлов. Изучены различные варианты обработки литой стали лигатурами содержащими ЩЗМ и РЗМ, определены их оптимальные количества, обеспечивающие наиболее высокие и стабильные значения KCV⁶⁰. Показано, что модифицирующее и рафинирующее действие лигатур, содержащих щелочноземельные и редкоземельные металлы, зависит не только от типа и количества модификатора, раскисленности стали, но и от содержания вредных примесей. При концентрации серы не более 0,02% практически полностью происходит глобуляризация сульфидных включений и равномерное распределение их в объеме металла, значительно уменьшается загрязненность границ зёрен.

Разработанная технология производства литой хладостойкой стали гарантирует требуемый уровень ударной вязкости и в качестве рекомендаций включена в Государственный Стандарт «Отливки из хладостойкой и износостойкой стали».

5. Применение термоулучшения и термоциклической обработки, позволило снизить, относительно нормализации, критическую температуру хрупкости малоуглеродистой ванадийсодержащей стали в 1,5 и 2 раза, соответственно. Закалка и последующий отпуск низкоуглеродистой ванадийсодержащей стали позволяют получить ощутимый рост комплекса свойств не только за счет упрочнения, но и появления широкой возможности варьирования прочностными, пластическими свойствами путем применения различных температур отпуска. С увеличением температуры отпуска также наблюдается заметное (относительно нормализации) повышение устойчивости к хрупкому разрушению.

6. Применение специальных режимов термической обработки, в частности, термоциклической обработки, позволяет значительно повысить трещиностойкость высокопрочных среднеуглеродистых сталей за счет эффективного измельчения зерна и создания оптимальной структуры.

7. На основе анализа напряженного состояния сварно-литой рамы большегрузных тракторов, определен уровень свойств литой стали, обеспечивающий равнопрочность рамы в наиболее напряженных сечениях. Исследованиями низколегированной стали с содержанием углерода от 0,08 до 0,20 % показано, что требуемая хладостойкость может быть достигнута за счет одновременного снижения количества перлита в структуре, измельчения зерна и изменения морфологии неметаллических включений. Необходимый уровень прочностных характеристик обеспечивается дополнительным легированием стали марганцем, хромом и ванадием при содержании углерода в пределах 0,10-0,16 %, в том числе сталь 12ХГФЛ (А.С. СССР № 998573). Натурные испытания более 500 тракторов с литыми деталями из стали 12ХГФЛ подтвердили свою надежность в суровых климатических районах нашей страны.

8. На основании теоретических расчетов эквивалентных напряжений обоснован уровень механических свойств и хладостойкости стали для опорных катков карьерных экскаваторов фирмы «Марион». Разработан химический состав высокопрочной, хладостойкой стали для замены литых опорных катков карьерных экскаваторов японской фирмы. Отработана технология их промышленного производства, обеспечивающая требуемый уровень механических свойств и хладостойкости. Сравнительные натурные испытания опытных катков с катками, изготовленными из японской стали СКQ-S, в условиях разреза «Нерюн-гринский» ПО Якутуголь показали, что разработанная сталь позволяет более, чем в два раза, увеличить их работоспособность, что позволяет отказаться от импортных поставок.

9. Разработаны методики исследования абразивной износостойкости, учитывающие различные температурно-силовые условия и установки для проведения ускоренных испытаний абразивной износостойкости материалов рабочего оборудования горнодобывающей техники при низких температурах, которые позволили изучить влияние химического состава, механических свойств и режимов термической обработки на износостойкость среднеуглеродистых легированных литых сталей. Рекомендованы две новые марки сталей для изготовления зубьев ковшей экскаваторов в зависимости от характеристик абразивности добываемых пород. Промышленные испытания зубьев ковшей, изготовленных

из разработанных сталей показали увеличение срока службы на 20-30% по сравнению со сталью 110Г13Л.

10. Для определения склонности сталей к хрупкому разрушению предложена новая критическая температура хрупкости - $T_{к.р.}$ (температура критической релаксации), которая определяется по положению максимума температурной зависимости скорости микропластической деформации, отличающаяся от других методов большей определенностью и четким физическим смыслом. Данная методика позволяет значительно снизить трудоемкость и металлоемкость испытаний.

11. Выявлено влияние отдельных конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов на хладостойкость и трещиностойкость литых сталей, позволяющее расширить представления о механизме влияния низких температур на процесс их разрушения и более обоснованно вносить коррективы в технологию изготовления и оценку надежности отливок.

12. На основании собственных исследований и результатов промышленного освоения производства хладостойких сталей, обобщения опыта других организаций и предприятий разработан и внедрен Государственный Стандарт «Отливки из хладостойкой и износостойкой стали», научно-технический уровень которого, соответствует современным требованиям к производству литых деталей для техники в северном исполнении.

Список основных публикаций по работе

1. Андреев А.К. Высокопрочные хладостойкие стали для отливок ответственного назначения //Иzv.вузов. Черная металлургия.- 2010.-№9. С. 49-50.
2. Васильев А.В., Ермаков Б.С., Каргинова В.В., Андреев А.К. Влияние легирующих элементов на трещиностойкость конструкционных сталей низкотемпературного назначения //Металлы.-2010.-№ 3.-С. 50-55.
3. Ермаков С.Б., Каргинова В.В., Солнцев Ю.П., Андреев А.К. Влияние термической обработки и микролегирования на хладноломкость сталей северного исполнения //Металлы.-2010.-№ 4.-С. 66-75.
4. Андреев А.К., Солнцев Ю.П. Определение критической температуры хрупкости по скорости микропластической деформации //Металлы.-2008.- № 2.-С. 84-88.
5. Андреев А.К., Солнцев Ю.П. Влияние структуры и неметаллических включений на хладостойкость и трещиностойкость литейных сталей // Изв. Вузов. Черная металлургия.- 2008.- № 9.- С. 46 - 49.
6. Андреев А.К., Солнцев Ю.П. Особенности разрушения литых хладостойких сталей // Деформация и разрушение.- 2008.- № 3. -С. 36-41.
7. Андреев А.К., Солнцев Ю.П. Технологические возможности повышения хладостойкости стальных отливок//Литейное производство.-2008.- № 3.- С.7- 11.
8. Солнцев Ю.П., Андреев А.К., Гречин Р.И. Пути повышения хладостойкости литых сталей //МиТОМ. - 1990.- № 5.- С.2-6.

9. Песчанская Н.Н., Шпейзман В.В., Андреев А.К., Коджаспиров Е.Е., Солнцев Ю.П. Оценка склонности сталей к хрупкому разрушению по спектру скоростей малых деформаций. //Проблемы прочности.- 1987. -№ 7.- С.115-119.
10. Викулин А.В., Георгиев М.Н., Духовный А.С., Андреев А.К. Диаграмма предельной трещиностойкости литых сталей// Заводская лаборатория.- 1986.- № 10.- С.68-69.
11. Солнцев Ю.П., Андреев А.К., Сердитов А.Е. Хладостойкие и износостойкие литейные стали. – СПб.: Химиздат.- 2007.- 336с.
12. Солнцев Ю.П., Андреев А.К., Гречин Р.И. Литые хладостойкие стали М.: Металлургия.- 1991.- 176 С.
13. Андреев А.К., Солнцев Ю.П. и др. ГОСТ 21357-87 «Отливки из хладостойкой и износостойкой стали. Общие технические условия»//Издательство стандартов.- 1988.- 9 С.
14. Андреев А.К. Разработка высокопрочных сталей для отливок, работающих в условиях низких климатических температур// Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций: Сб. тр. XIV международной конф.: СПбГУНиПТ, 2008. С. 181-136.
15. Андреев А.К. Влияние конструктивных факторов на хладостойкость литых сталей // Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов. СПб.: СПбГУНиПТ,- 2007.- С.137-142.
16. Андреев А.К., Влияние размера зерна и термической обработки на трещиностойкость и хладостойкость литейных сталей //Там же- С. 130-136
17. Андреев А.К., и др. Технологические возможности повышения хладостойкости литейных сталей.// Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации материалов: Сб. тр. XI международной конф. СПб,- 2006.- С.203-210.
18. Андреев А.К., Солнцев Ю.П., Викулин А.В. Разрушение стали для отливок при температурах климатического холода. // Там же- С.201-203.
19. Андреев А.К. Влияние неметаллических включений на хладостойкость литой стали//Актуальные проблемы механики, прочности и теплопроводности при низких температурах. СПб: СПбГАХПТ,- 1998.- С. 24-25.
20. Андреев А.К., Солнцев Ю.П. Легирование феррито-перлитных хладостойких литейных сталей// Там же- С.25-27.
21. Андреев А.К., и др. Анализ напряженно-деформированного состояния опорных катков одноковшовых карьерных экскаваторов// Прочность и разрушение сталей при низких температурах. М.: Металлургия.- 1990.- С.100-105.
22. Солнцев Ю.П., Андреев А.К., Гречин Р.И. Характеристика некоторых зарубежных стандартов на литые хладостойкие стали //Там же - С.6-14
23. Андреев А.К. и др.Расчет термодинамического равновесия в четырехкомпонентной металлургической системе // Прочность сталей, работающих в условиях низких температур: Сб. науч. тр. М.: Металлургия.-1988.- С.44-47.
24. Андреев А. К., Гречин Р.И., и др. Применение кальцийбариевой лигатуры для повышения хладостойкости низколегированной стали// В кн.: Неметаллические включения и газы в литейных сплавах– Запорожье:ЗМИ,- 1988.- С.18-19.
25. Андреев А.К., Гречин Р.И., Решетников В.Б., Иашвили Н.В. Использование комплексной ванадийсодержащей лигатуры при выплавке хладостойкой стали//

- Сб. науч. тр. V Всесоюзного совещания по химии, технологии и применению ванадиевых соединений – Чусовой (Пермская обл.) , -1987.-С.129.
26. Андреев А.К., Гречин Р.И., Решетников В.Б. Влияние титана и бора на хладостойкость низколегированной литой стали// В кн.: Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий- тр. науч. техн. конф. Запорожье: ЗМИ, -1989.- С.76-77.
27. Андреев А.К., Гречин Р.И., Иашвили Н.В.. Влияние модифицирования ЩЗМ на ударную вязкость стали// Прочность сталей, работающих в условиях низких температур: Сб. науч. тр. М.: Металлургия.-1988.- С.17-21.
28. Решетников В.Б., Гречин Р.И., Солнцев Ю.П., Андреев А.К. Термодинамический анализ процесса образования карбонитридов в литых хладостойких сталях // Прочность металлов, работающих в условиях низких температур: Сб. науч. тр. М.: Металлургия.-1987.- С.51-56
29. Иашвили Н. В., Андреев А.К., Гречин Р.И., Казаков А.А.. Влияние раскисления и модифицирования на хладостойкость низколегированной стали// Прочность металлов, работающих в условиях низких температур: Сб. науч. тр./ М.: Металлургия.- 1987.- С.57-60.
30. Казаков А.А. Гречин Р.И., Андреев А.К., Иашвили Н.В. Влияние температуры начала образования нитридов на ударную вязкость ванадийсодержащей стали.// Прочность конструкций, работающих в условиях низких температур: Сб. науч. тр. М.: Металлургия,- 1985.- С.89-93.
31. Андреев А.К., Гречин Р.И., Иашвили Н.В. Легирования стали ванадием путем восстановления его из окислов //Тр. У Всесоюзной научной конференции по проблемам электрометаллургии стали-Челябинск,- 1984, С.- 42-43.
32. Подуст А.Н., Андреев А.К. Солнцев Ю.П. Использование ванадиевого металлоотсева при выплавке хладостойкой стали.//Химия, технология и применение ванадиевых соединений: Сб. науч. тр./Свердловск,- 1982.-С.33-34.
33. Андреев А.К., Коджаспиров Г.Е. др. Повышение хладостойкости конструкций промышленных тракторов //Прочность конструкций, работающих в условиях низких температур: Сб. науч. тр. М.:Металлургия.-1985.- С.84- 86.
- 34. Сталь.А.С. № 998573 Б.И. 1983, №7. Горячев А.Д., Толпегин А.А., Солнцев Ю.П., Подуст А.Н., Андреев А.К. и др.**
- 35. Б.И. .Способ определения критической температуры хрупкости материала. А.С. №1132189 Б.И.1984, № 48. Шпейзман В.В., Степанов В.А., Песчанская Н.Н., Андреев А.К., Подуст А.Н., Солнцев Ю.П.**
- 36. Способ выплавки стали и смесь для ее модифицирования// А.С. № 1319563. Оpubл.22.02.1987.Б.И. № 23. Андреев А.К., Гречин Р.И., Новомейский Ю.Д., Тютев А.В. и др.**