

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЛИТЬЯ

На правах рукописи

КИРЧУ ИВАН ФЕДОРОВИЧ

УДК 669.14.018.2: 669.15'29.41-194

ТЕХНОЛОГИЯ ЭФФЕКТИВНОГО НИТРИДВАНАДИЕВОГО
УПРОЧНЕНИЯ НИЗКО- И СРЕДНЕЛЕГИРОВАННОЙ
КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

Специальность 05.16.02 - "Металлургия черных металлов"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев 1994

АВ 29.7017

Диссертация на правах рукописи.

Работа выполнена в Институте проблем литья АН Украины, на Азербайджанском трубном заводе, Орско-Халиловском и Кузнецком металлургических комбинатах, Камском объединении по производству большегрузных автомобилей "КАМАЗ" и металлургическом комбинате "Азовсталь".

Научный руководитель: член-корреспондент АН Украины,
доктор технических наук, профессор
Ю.З.БАБАСКИН

Официальные оппоненты: член-корреспондент АН Украины,
доктор технических наук В.А.ПЕРЕЛОМА
кандидат технических наук Ю.М.ПОМАРИН

Ведущее предприятие: металлургический комбинат
"Азовсталь"

Защита состоится: "27" мая 1994 г. в _____
час. на заседании специализированного ученого Совета Д.016.20.01
Института проблем литья АН Украины по адресу: 252680, Киев-142,
ГСП, пр.Вернадского 34/1, актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
проблем литья АН Украины.

Автореферат разослан "27" апреля 1994 г.

И.о. ученого секретаря
специализированного
ученого Совета
доктор техн.наук

А.В.Чернов ОЛ

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00810391 (M)

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В связи с дефицитностью никеля и молибдена ответственные детали грузовых автомобилей, нефтегазового и горнодобывающего оборудования широко изготавливаются из низкокачественных углеродистых и низколегированных марганцем, кремнием, хромом сталей. Это является одной из основных причин отставания указанных видов отечественных машин и оборудования от мировых стандартов по показателям надежности, долговечности и удельной металлоемкости. Например, балка передней оси автомобилей КАМАЗ и КРАЗ изготавливается соответственно из сталей марок 45 и 40Х и имеет гарантированную долговечность по усталостной прочности в два раза меньше, чем зарубежные аналоги.

В связи с увеличением глубин бурения газовых и нефтяных скважин необходимы бурильные трубы категории прочности "Е" и "Л", мировой уровень которых по усталостной прочности обеспечивается применением сталей марок типа 30ХМА и 38ХНМ. В последнее десятилетие были проведены широкие исследования, направленные на разработку адекватных им по свойствам марок сталей, легированных марганцем, кремнием, хромом, ванадием и ниобием. Однако не был достигнут требуемый комплекс сочетания характеристик статической и усталостной прочности и хладостойкости бурильных труб.

Анализ литературных данных и производственного опыта применения различных способов повышения прочности и качества деформируемых конструкционных сталей различного назначения позволил прийти к заключению, что перспективным и наиболее экономичным способом повышения их физико-механических свойств может явиться карбонитридное упрочнение, потенциальные возможности которого не реализуются при сложившихся научных и технологических основах металлургической технологии процесса.

Цель работы - определить причины низкой эффективности металлургической технологии нитридванадиевого упрочнения низко- и среднелегированных конструкционных деформируемых сталей, содержащих углерод от 0,12% (мас.) до 0,50%, обосновать и разработать мероприятия по усовершенствованию технологии производства из них ответственных деталей грузовых автомобилей, высокопрочных бурильных труб нефтяного сортамента, работающих при циклическом (10^6 циклов) знакопеременном нагружении, и высокопрочного толстого листа и сортового проката для шахтного

оборудования. Для решения поставленной задачи потребовалось проведение исследований в следующих направлениях:

- обоснование рациональной технологии введения в металл азота и ванадия, режимов его конечного раскисления;
- изучение термодинамики растворения нитридной фазы в конструкционных сталях при аустенитизирующем нагреве под прокатку и термическую обработку;
- обоснование рациональных пределов содержания азота, ванадия и других нитридообразующих элементов в конструкционных сталях, а также температур их аустенизирующего нагрева при термической обработке;
- изучение влияния содержания азота, ванадия, их межфазного распределения и температуры аустенитизирующего нагрева на прокаливаемость, макро- и микроструктуру сталей и их склонность к старению;
- изучение влияния химического состава сталей, температуры конца прокатки, калибровки и температуры нормализации на остаточные напряжения в металлопродукции;
- изучение влияния химического и фазового состава, режимов термической обработки на физико-механические свойства низко- и среднеуглеродистых конструкционных сталей.

Научная новизна. Установлены причины низкой эффективности металлургической технологии нитридванадиевого упрочнения конструкционных деформируемых сталей - широкие пределы колебаний содержания азота, ванадия, алюминия и других более активных, чем ванадий нитридообразующих элементов, несбалансированность температур аустенитизации при нормализации, закалке с производением $[Me] \times [N]$.

Обоснована необходимость стабилизации содержания азота, ванадия в узких пределах, устранение из состава стали более активных к азоту, чем ванадий, легирующих элементов - титан, цирконий и др., снижение содержания алюминия до значений, достаточных только для конечного раскисления стали. При этом показано, что минимальная погрешность введения азота в сталь обеспечивается азотированными ферросплавами жидкофазного ($\pm 0,002\%$) и твердожидкого насыщения ($\pm 0,003\%$). Использование азотированных ферросплавов твердофазного насыщения обеспечивает погрешность введения азота $\pm 0,005-0,006\%$.

Фазовым анализом выделенных осадков установлены граничные пределы содержания алюминия в конструкционных сталях.

легированных азотом и ванадием, гарантированно обеспечивающие конечное раскисление и повышение эффективности дисперсионного нитридванадиевого упрочнения стали.

Установлено, что для повышения эффективности нитридванадиевого упрочнения стали температура аустенитизирующего нагрева под нормализацию, закалку должна определяться по произведению растворимости $[Me] \times [N]$, а не углеродному эквиваленту стали. При этом содержание азота и ванадия должно быть таким, чтобы равновесная температура растворения (образования) нитридванадиевой фазы превышала температуру аустенитизирующего нагрева под нормализацию, закалку на 30-50 °С, что обеспечивает стабилизацию зерна аустенита.

Практическая ценность. Полученные в диссертационной работе результаты исследований по оптимизации металлургической технологии нитридванадиевого упрочнения конструкционных деформируемых низколегированных сталей, включающие в себя оптимизацию содержания азота, ванадия, алюминия, способа конечного раскисления и модифицирования, температуры аустенитизации под нормализацию и закалку, обеспечивают значительное дополнительное повышение прочностных свойств без снижения пластических, а в некоторых случаях даже их повышение, вязкости разрушения, усталостной прочности, устойчивости к образованию холодных трещин и к старению. Разработаны новые перспективные стали для балки передней оси грузовых автомобилей - 45ХАФ, ТУ 14-103-60-89, высокопрочных бурильных труб категорий прочности "Е", "Л" и "М" - 32ХГ2САФ, ТУ 14-3-1187-83, а также оптимизирован химический состав и температурно-временные параметры термической обработки толстого листа из стали 14ХГ2САФД, ТУ 14-1-33-23-82, и 22Г2САФ для шахтных стоек арочной крепи.

Результаты опытно-промышленной проверки и внедрения разработанных сталей показали, что в балках передней оси автомобиля КАМАЗ, изготовленных из стали 45ХАФ, отмечается повышение предела пропорциональности стали на 65% и усталостной прочности в 3,5 раза по сравнению с серийными балками из стали 45ГОСТ 1050-74, высокопрочные бурильные трубы из стали 32ХГ2САФ при равнозначных значениях прочностных свойств по усталостной прочности в 2 раза превосходят трубы из стали 38ХНМ, оптимизация металлургической технологии нитридванадиевого упрочнения сталей 14ХГ2САФД и 22Г2САФ обеспечила дополнительное повышение

прочностных свойств на 20-25% и ударной вязкости при минус 40° С на 50-100% при одновременном снижении содержания в стали ванадия в 2-2,5 раза. Экономический эффект от внедрения стали 32ХГ2САФ в ценах 1986 г. составил 161645 руб., оптимизации химического состава стали 14ХГ2САФД в ценах 1990 г. - 232362 руб. Сталь 45ХАФ принята к использованию для разрабатываемых моделей автомобилей КАМАЗ повышенной грузоподъемности, а 22Г2САФ прошла стендовые испытания и внедряется в производство.

На защиту выносятся:

- результаты исследования влияния химического состава, способов конечного раскисления, модифицирования и температуры аустенитизации на межфазное распределение азота, ванадия, алюминия, титана, циркония и загрязненность стали неметаллическими включениями;

- закономерности влияния межфазного распределения азота и ванадия на размер зерна аустенита при оптимальном для нитридванадиевого упрочнения остаточном содержании алюминия;

- закономерности влияния содержаний азота в твердом растворе и нитридной фазы в аустените на прокаливаемость сталей, их склонность к старению;

- закономерности влияния содержания азота, ванадия, алюминия, титана и циркония, их межфазного распределения, раскисления кальцием, температур аустенитизации под прокатку, нормализацию и закалку на макро- и микроструктуру, флокеночувствительность, распределение нитридной фазы и ее влияние на локальную пластичность;

- результаты исследования влияния химического состава и температур аустенитизации под нормализацию и закалку на физико-механические и технологические свойства сталей.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на научно-технических конференциях и семинарах: 9-я Всесоюзная конференция по проблемам слитка "Процессы разливки, модифицирования и кристаллизации стали и сплавов" (г.Волгоград, 1990); республиканский семинар "Легирование, структура и свойства упрочненной стали" (г.Киев, 1993); республиканская конференция "Прогрессивные способы плавки" (г.Киев, 1992).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, получено 4 авторских свидетельства.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка использованных источников из 99 наименований, приложений и содержит 66 страниц машинописного текста, 34 рисунка и 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обоснование направлений исследований.

Известно, что повышение технического уровня продукции машиностроения лимитируется низким качеством широкоприменяемых углеродистых и низколегированных конструкционных сталей, которые не обеспечивают требуемое комплексное сочетание прочностных, пластических свойств и ударной вязкости, а также усталостных и статических характеристик прочности. Применение же качественных высокопрочных конструкционных сталей, как правило, легированных никелем и молибденом, для деталей ответственного назначения ограничивается их дефицитностью, а также тем, что данные стали не всегда комплексно сочетают требуемый уровень прочностных и пластических свойств и усталостной прочности.

В результате анализа литературных данных об эффективности влияния различных способов упрочнения, легирования и модифицирования конструкционных сталей, технологий их металлургического предела на химическую и структурную неоднородность металла, его физико-механические и технологические свойства пришли к заключению, что при металлургическом производстве неэффективно применяется карбонитридное упрочнение.

Для оптимизации технологии нитридванадиевого упрочнения обосновали необходимость изучения влияния содержания азота, ванадия, алюминия, титана и циркония, температур нормализации, закалки и высокого отпуска на фазовый состав нитридной фазы, межфазное распределение азота, ванадия, алюминия, титана и циркония, загрязненность стали неметаллическими включениями, термодинамику растворения и выделения нитридов ванадия и алюминия, прокаливаемость, параметры структуры и физико-механические свойства стали.

2. Методика проведения работ.

В качестве объекта исследования выбраны конструкционные стали, содержащие, мас. %: 0,17-0,50 углерода; 0,17-0,80 кремния; 0,50-1,60 марганца; 0,30-0,80 хрома; до 0,60 меди; 0,010-0,020 азота;

0,04-0,016 ванадия; 0,005-0,070 алюминия; до 0,050 титана; до 0,04 циркония. Силико-кальций вводили в количестве от 0,375 до 1,5 кг/т.

Кремний вводили ферросилицием ФСм45, ГОСТ 1415-78, марганец - ферромарганцем, ГОСТ 4755-79, хром - феррохромом ФХ025Б, ГОСТ 4757-79, ванадий - феррованадием ВД1, ТУ 14-5-98-78, азот - марганцем азотированным МрН6, ГОСТ 6008-82, феррохромом азотированным ФХН80СБ, ТУ 14-139-111-81, и феррованадием азотированным ФВД45Н10МпЗ, ТУ 14-115-9-87, кальций - силико-кальцием СК15, ГОСТ4762-71, титан - ферротитаном ФТи30, ГОСТ4761-80, цирконий - силико-цирконием СиЦр40, 4МТУ-5-26-70, алюминий - вторичным алюминием АО, ГОСТ11069-74.

Выплавку сталей производили в мартеновских печах емкостью 150 и 400 т, конверторе - 300 т и электродуговой печи - 100 т. Сталь разливали в изложницы 4,5-14 т и на МНРЗ в слябы сечением 300x1840 мм. Введение ферросплавов осуществляли по принятой на заводах технологии. Угар и равномерность распределения легирующих элементов определяли на пробах, отобранных в начале, середине и конце разливки. Прокатка слитков и слябов МНРЗ осуществлялась по действующей на заводах технологии. Макроструктуру и трещиностойчивость проката в горячекатанном состоянии определяли по ГОСТ 10243-75 и ОСТ 1421-77 соответственно.

Углерод, фосфор, серу определяли химическим анализом по ГОСТ12344-88, ГОСТ12347-77, ГОСТ12348-78, азот методом восстановительного плавления в потоке инертной среды на газоанализаторе ТН фирмы "Леко" (ФРГ), остальные элементы - спектральным анализом по ГОСТ 18895-81, ГОСТ12346-78, ГОСТ12354-81.

Загрязненность стали неметаллическими включениями определяли металлографически по ГОСТ1778-70 методами Ш4 и П1 и химическим анализом электролитически выделенных осадков. Качественный и количественный фазовый состав нитридной фазы определяли химическим методом осадков, выделенных бром-метанольным методом.

Микроструктуру сталей анализировали на оптическом микроскопе МИМ-8, а дисперсность и распределение карбонитридной фазы - на электронном микроскопе ЭВМ-100л. Размер зерна аустенита определяли по ГОСТ5639-82 в горячекатаном состоянии металла и после аустенитизации при 880°С, 930°С, 960°С, 1000°С, 1050°С, 1250°С.

Локальную пластичность и микропластичность - доля вязкой составляющей и размер фасеток отрыва соответственно в 100 полях

зрения излома ударных образцов, определяли на электронном микроскопе при увеличении от 1500 до 4000.

Прокаливаемость сталей определяли по ГОСТ4543-61, их склонность к деформационному старению - по ГОСТ7268-82, тепловому - по изменению ударной вязкости образцов после нагрева при 180°C в течение 4 часов, естественному - после выдерживания при комнатной температуре в течение 5 лет.

Отбор металла из проката, изготовление и испытание образцов для определения механических свойств сталей осуществляли по ГОСТам 7564-75, 1497-73, 9454-78 и заводским техническим условиям на соответствующие виды продукции.

Усталостную и статическую прочность конструкционных сталей определяли на промышленных образцах балки передней оси автомобиля КАМАЗ и бурильных трубах ТБПК 127x10 и ПК 114x8,5. Стендовые испытания балки передней оси автомобиля проводили на установке "PZA" в соответствии с методикой КАМАЗа при нагрузке на балку P_{max} 17 т и P_{min} 7 т и частоте 7 Гц, а статические на стенде МТ911.66, где определяли предел пропорциональности на обоих концах балки. Бурильные трубы испытывали на усталостную прочность на стенде СИТУ по методике ВНИИТнефть, где определяли наименьший предел выносливости при знакопеременном нагружении на базе 10^6 циклов.

3. Исследование и оптимизация металлургических параметров конечного раскисления и нитридованадиевого упрочнения стали.

ГОСТ19282-73 и заводские ТУ на конструкционные стали с карбонитридным упрочнением предусматривают содержание ванадия и азота в пределах 0,07-0,18% и 0,010-0,025% и гарантируют повышение прочностных свойств на 30-50 МПа. При этом практикуется одновременное комплексное введение наряду с ванадием значительного количества более активных нитридообразующих элементов, таких как алюминий, ниобий, титан и цирконий. Например, ТУ 14-1-3323-82 Орско-Халиловского металлургического комбината на сталь 14ХГ2САФД предусматривается содержание в мас. %: 0,01-0,020 азота, 0,08-0,16 ванадия, 0,03-0,07 алюминия, 0,015-0,050 титана и 0,02-0,04 циркония. При этом отмечается 25% брака толстого листа по значениям ударной вязкости и загибу на 180°. Статистический анализ 100 промышленных плавов показал отсутствие зависимости механических свойств и дефектности загиба от содержания азота и нитридообразующих элементов, поплавочное колебание которых значительно (рис. 1).

В результате пришли к заключению, что для понимания причин широких пределов колебания механических свойств стали 14ХГ2САФД и разработки на этой основе мероприятий по стабилизации качества толстого листа необходимо комплексное изучение влияний способов введения азота и режимов раскисления на угар элементов и загрязненность металла неметаллическими включениями и содержаниями ванадия, алюминия, титана, циркония и азота на температуры растворения, качественный и количественный состав нитридной фазы и ее распределение.

Содержание титана, алюминия, ванадия и азота в металле плавков текущего производства.

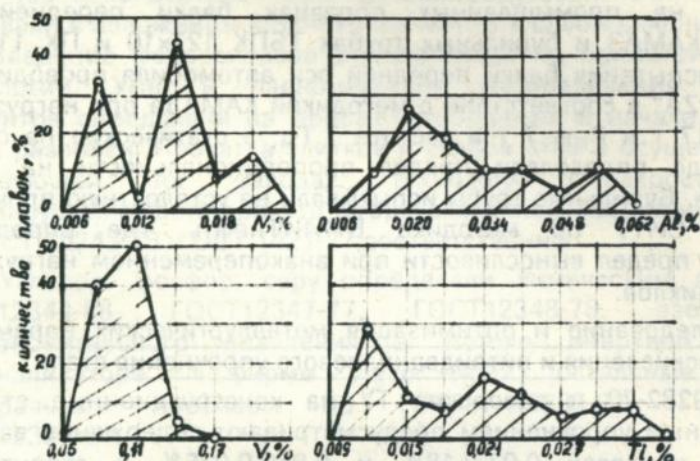


Рис. 1.

Установлено, что усвоение азота и угар ванадия зависят от вида применяемых азотированных ферросплавов, технология получения и химический состав которых определяют их различную окисленность и пересыщенность азотом в расплавленном состоянии. При этом точность достижения заданных содержаний азота при выплавке стали в 400 т мартеновской печи составляет, в мас. %: $\pm 0,002$; $\pm 0,003$; $\pm 0,006$, а ванадия $\pm 0,015$, $\pm 0,02$ и $\pm 0,022$ соответственно в случае применения азотированных феррохрома жидкофазного насыщения, феррованадия твердожидкого насыщения, марганца и феррохрома твердофазного насыщения. Остаточное содержание алюминия и титана

существенным образом зависит также от условий слива металла в ковш и его разливки.

Результаты изучения загрязненности стали неметаллическими включениями в зависимости от режимов раскисления и модифицирования показали, что она изменяется в пределах от 0.10 до 0.085% (объемных). Уменьшение загрязненности происходит при устранении модифицирования титаном и цирконием, снижения остаточного содержания алюминия от 0.03-0.07% до 0.005-0.015% и раскисления силикокальцием в количестве 0.8-1.5 кг/т. При этом достигается снижение загрязненности силикатами недеформирующимися и хрупкими с 5 до 3 балла и карбонитридами с 0.024 до 0.016% (объемных), а также обеспечивается требуемое конечное раскисление стали.

Термодинамическим и фазовым анализами установлено, что при рекомендуемых ТУ 14-1-3323-82 на сталь 14ХГ2САФД содержания титана и циркония он практически полностью связан в нитридах, а цирконий частично в оксисульфидах, нерастворимых при температурах прокатки и термической обработки. Алюминий же при температурах нормализации и закалки независимо от его остаточного содержания присутствует как в твердом растворе, так и в нитридной фазе. При этом по мере снижения его массовой доли отмечается последовательное снижение количества нитридов алюминия.

Расчеты показывают, что в пределах отмечаемых в производстве колебаний содержания алюминия, титана, циркония и азота в стали 14ХГ2САФД доля несвязанного в их нитриды азота может изменяться в широких пределах, вплоть до полного устранения дисперсионного нитридванадиевого упрочнения.

Пришли к заключению, что в этом состоит одна из основных причин низкой эффективности металлургической технологии нитридванадиевого упрочнения. Обосновали нерациональность введения совместно с ванадием более активных нитридообразующих элементов, необходимость и возможность снижения остаточного содержания алюминия для конечного раскисления до 0.015-0.005%. Подтвердили эффективность таких мероприятий при разработке технологий производства сталей марок 45ХАФ, 32ХГ2САФ и 22Г2САФ. В различных условиях их производства введение азота литым азотированным хромом, раскисление силико-кальцием в количестве 0.8-1.5 кг/т и алюминием - 0.3 кг/т обеспечивает гарантированное раскисление и остаточное содержание алюминия в пределах

0,005-0,015% и введение азота с точностью $\pm 0,002\%$ и ванадия $\pm 0,015\%$.

Второй причиной низкой эффективности металлургической технологии нитридванадиевого упрочнения конструкционных сталей является несогласованность их химических составов и температур аустенитизирующего нагрева при термообработке. Температура аустенитизации как правило назначается по углеродному эквиваленту. При этом не принимаются во внимание равновесная растворимость при этой температуре азота и ванадия в аустените и количество нерастворяющейся доли нитридной фазы, не участвующей в дисперсионном твердении, и коагулирующей при нагреве.

На рис. 2 приведены рассчитанные зависимости равновесных температур растворимости нитридов ванадия и алюминия от произведения $[Me] \times [N]$ в разрабатываемых сталях. Из полученных зависимостей следует, что в условиях реально достижимых температур нагрева на промышленном термическом оборудовании $980^{\circ}\text{C} - 1020^{\circ}\text{C}$ для эффективного нитридванадиевого упрочнения содержание остаточного алюминия должно быть минимизировано, а содержание азота и ванадия с учетом погрешности их введения находится в пределах, мас. %: стали 45ХАФ - 0,014-0,018 и 0,05-0,08; 32ХГ2САФ - 0,012-0,016 и 0,04-0,07; 14ХГ2САФД - 0,010-0,014 и 0,04-0,07 соответственно.

Вместе с тем в связи со снижением остаточного содержания алюминия для стабилизации зерна аустенита необходимо предусматривать сохранение определенной доли нерастворяющейся нитридванадиевой фазы.

Зависимость равновесной температуры образования (растворения) нитридной фазы ($^{\circ}\text{C}$) от произведения растворимости.

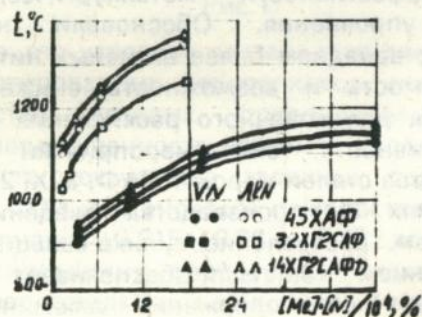


Рис. 2

4. Исследование влияния содержания азота и ванадия, параметров конечного раскисления и термической обработки на структуру металлопроката.

Учитывая, что азот повышает прокаливаемость стали, а на металлургических предприятиях не всегда имеются коiledы для замедленного охлаждения сортовых и листовых заготовок, изучали склонность заготовок к образованию холодных трещин при естественном их охлаждении и последующем хранении. Установлено, что необходимым условием устранения развития холодных трещин на естественно охлаждаемых трубных заготовках из стали с карбонитридным упрочнением являются лимитирование значения углеродного эквивалента менее 0,741 и содержания фосфора менее 0,03%.

Одним из основных назначений введения в стали с нитридванадиевым упрочнением более активных, чем ванадий, нитридообразующих элементов является диспергирование зерна аустенита. Результаты же наших металлографических исследований и фазового анализа показано, что в интервале аустенитизирующего нагрева 880-1000°C более эффективная стабилизация зерна аустенита достигается нитридами ванадия. Так в случае стали 14ХГ2САФД, содержащей в сумме 0,047-0,038% (мас.) нитридов титана, циркония, алюминия и ванадия, размер зерна аустенита соответствует 8 и 7 баллам, а в содержащей, в основном, нитриды ванадия в количестве 0,035-0,016% (мас.) - 10 и 9 баллам. Стабилизация зерна аустенита в сталях 45ХАФ и 32ХГ2САФ также достигается уже при содержании 0,015% (мас.) нитридванадиевой фазы. Более высокая стабилизирующая эффективность нитридванадиевой фазы объясняется меньшими ее размерами и межчастичными расстояниями, чем нитридов титана, циркония и алюминия.

В связи с тем, что размер зерна аустенита и содержание в нем нитридванадиевой фазы, с одной стороны, температура аустенитизации и содержание азота в твердом растворе, с другой, оказывают противоположное влияние на устойчивость аустенита к переохлаждению и прокаливаемость сталей необходима комплексная оптимизация этих параметров. Результаты показали, что она достигается при повышении температуры аустенитизации разрабатываемых сталей до 940-960°C и содержаниях азота и ванадия близких стехиометрическому соотношению, соответствующих равновесной температуре растворимости нитридов ванадия, которая на 30-50°C выше, чем температура нагрева под нормализацию и

закалку. В этом случае достигается комплексное диспергирование зерна аустенита, элементов феррито-перлитной, перлитной и мартенситной структур, уменьшение структурной неоднородности и значительное повышение доли азота и ванадия, участвующих в дисперсионном твердении.

В противном случае отмечается нестабильность процесса дисперсионного нитридванадиевого твердения и развитие структурной и нитридной неоднородности сталей (рис. 3).

Микрофрактография стали 32ХГ2САФ, нормализованной с температуры 880°С (а) и 960°С (б)



Рис. 3

5. Исследование физико-механических свойств стали.

Учитывая, что согласно результатам фазового анализа сталей в нормализованном и улучшенном состояниях полностью не завершается процесс связывания азота в нитридную фазу и до 30-50% его массовой доли остается в твердом растворе, исследовали их склонность к различным видам старения. Результаты показали, что это не приводит к снижению устойчивости сталей и старению, наоборот, она повышается. Это объясняется устранением зернограницной сегрегации азота и нитридной фазы и удельным увеличением в ферритной матрице межфазной поверхности и зон напряженного состояния около частиц нитридов ванадия, являющихся эффективными стоками азота.

Значимость влияния изучаемых факторов на механические свойства сталей в металлопрокате изучали в промышленных условиях при усовершенствовании технологии производства толстого листа из стали марки 14ХГ2САФД и разработке сталей типа 45ХАФ и 32ХГ2САФД для балки передней оси автомобиля КАМАЗ и

высокопрочных бурильных труб. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Как видно анализируемые факторы оказывают определяющее влияние на свойства сталей с нитридванадиевым упрочнением. Их оптимизация, включающая снижение остаточного содержания алюминия до 0,005-0,015 (мас. %), устранение модифицирования более активными, чем ванадий, нитридообразующими элементами, повышение температур нормализации и закалки до 940-960°C, а также лимитирование содержания азота и ванадия в пределах температур равновесного растворения нитридов на 30-50°C выше температуры аустенитизации при термообработке, обеспечивает дополнительное повышение предела текучести до 200 МПа и ударной вязкости на 50-150% при сохранении высокого уровня пластических свойств.

Электронномикроскопическим анализом реплик изломов ударных образцов показано, что повышение прочностных свойств и ударной вязкости является следствием увеличения степени участия ванадия и азота в дисперсионном твердении и снижения нитридной неоднородности структуры соответственно при оптимизации параметров технологии нитридванадиевого упрочнения. На рис. 4 видно, что по мере уменьшения суммарной площади крупных нитридов, фиксируемых при увеличении 1500 раз в поле зрения микроскопа, происходит закономерное повышение вязкой составляющей изломов.

Влияние суммарной площади нитридной фазы ($\sum S$) на долю вязкой составляющей.

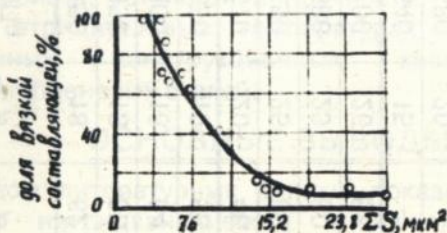


Рис. 4

Таблица 1.

Механические свойства сталей											
Сталь	Содержание элементов, мас. %				Температура, °С		Механические свойства				
	V	N	Al	Ti	закалка, нормализация	отпуск	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{т}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСИ, Мдж/м ²
45ХАФ	0.09	0.014	0.013	-	3.880	620	870	750	18	62	1.20
					3.960	620	930	850	18	55	1.00
	0.06	0.013	0.014	-	3.850	600	940	800	18	64	1.10
					3.930	600	1010	850	19	58	1.00
32ХГ2САФ	0.11	0.013	0.032	-	Н.950	-	846	570	20	45	0.40
	0.09	0.011	0.015	-	Н.850	-	800	550	25	60	1.25
					Н.900	-	840	580	23	60	1.20
					Н.950	-	870	700	26	58	1.10
* 14ХГ2САФД	0.09	0.016	0.031	0.03	3.950	700	720	640	15	-	0.30
	0.09	0.019	0.024	0.01	3.910	700	750	580	20	-	0.38
					3.950	700	890	750	12	-	0.44
	0.08	0.017	0.009	-	3.910	700	730	600	20	-	0.44
					3.950	700	850	780	18	-	0.66
	0.04	0.012	0.070	0.04	3.950	700	650	510	20	-	0.45
0.04	0.012	0.007	-	3.950	700	840	720	18	-	0.61	

* Ударная вязкость стали при минус 40°С на образцах, вырезанных поперек прокатки листа

6. Опытнo-промышленное опробование и внедрение разработанных марок сталей и технологий их производства.

В результате выполненных исследований разработаны и внедрены новые марки сталей с нитридванадиевым упрочнением, технологии их выплавки и термической обработки: на Ново-Кузнецком металлургическом комбинате - 45ХАФ вместо стали 45 для производства балки передней оси автомобиля КАМАЗ, на Азтрубзаводе - 32ХГ2САФ вместо стали 38ХНМ для высокопрочных бурильных труб категории прочности "Е" и "Л", на Орско-Халиловском металлургическом комбинате - 14ХГ2САФД для листа толщиной 12-40 мм. В табл. 2 приведен уровень гарантируемых свойств.

При этом в случае стали 14ХГ2САФД осуществлено снижение содержания в ней ванадия в 2 раза и достигнуто устранение несоответствия 25% толстого листа требованиям ТУ по значениям ударной вязкости и загибу на 180°.

На металлургическом комбинате "Азовсталь" опробована разработанная марка стали 22Г2САФ с пониженным в 2,5 раза содержанием ванадия вместо марки 20Г2АФп.с. для сортового проката шахтных профилей. Стендовые испытания показали, что сортовой профиль марки КГВ21 из стали 22Г2САФ по предельной несущей способности на 14% превышает последующий номер профиля КГВ26 из стали 20Г2ФАп.с., что обеспечивает возможность снижения металлоемкости одного погонного метра арочной крепи на 5 кг. Проводится работа по внедрению разработанной марки стали.

Таким образом, применение разработанных принципов оптимизации металлургической технологии нитридванадиевого упрочнения конструкционных сталей, легированных марганцем, кремнием и хромом, обеспечивает характеристики прочностных и пластических свойств, усталостной прочности, ударной вязкости при комнатных и отрицательных температурах на уровне и выше низколегированных конструкционных хромомолибденовых и хромоникельмолибденовых сталей.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализом литературных данных показано, что реализуемая эффективность нитридванадиевого упрочнения деформируемой конструкционной стали значительно ниже, чем литой. Достигается в основном повышение на 30-50 МПа прочностных свойств. При этом в улучшенном состоянии отмечается снижение прокаливаемости,

Таблица 2.

Гарантируемый уровень свойств сталей в металлопрокате

Марка стали	ГОСТ, ТУ	Механические свойства					T ₅₀ , °C	Усталостная прочность балок и труб, № циклов до разрушения, МПа на базе 10 ⁶ цик.	Загиб на 180°
		σ _в МПа	σ _т МПа	δ %	ψ %	КСИ, МДж/м ²			
45	ГОСТ 1050-71	850	550	20	51	0.68	-	0.32×10 ⁶	-
45ХАФ	ТУ 14-103-60-89	990	840	18	51	1.20	-	1.2×10 ⁶	-
38ХНМ	ГОСТ 4543-71	840	600	17	53	0.60	-60	65	-
32ХГ2САФ	ТУ 14-1-1293-84	960	700	20	51	1.00	-60	120	-
*14ХГ2САФД	ТУ 14-1-3323-82 ЦНИИЧМ	686	588	14	-	0.25	-	-	120
	ТУ 14-1-3323-90 ИПЛ АНУ	784	686	16	-	0.50	-	-	180

* Ударная вязкость стали при минус 40 °С на образцах, вырезанных поперек прокатки листа

усталостной прочности и вязкости разрушения. Пришли к заключению, что это связано с несовершенством металлургической технологии.

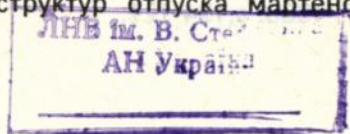
2. Результатами термодинамического анализа растворимости нитридов ванадия, алюминия, титана и циркония и фазового анализа выделенных осадков показали, что необходимыми условиями стабилизации и повышения эффективности металлургической технологии нитридванадиевого упрочнения является снижение содержания алюминия до 0,005-0,015, мас.%, устранение из химического состава более активных, чем ванадий, нитридообразующих элементов, повышение температуры нормализации и закалки до 940-960°C и лимитирование содержания азота и ванадия в количестве, при котором равновесная температура растворения их нитрида на 30-50°C выше температуры аустенитизации при термической обработке.

3. Установлено, что раскисление силико-кальцием в количестве 0,8-1,5 кг/т и алюминием - 0,3 кг/т обеспечивает надежное раскисление низко- и среднеуглеродистых низколегированных марганцем, кремнием и хромом сталей. При этом отмечается снижение их загрязненности неметаллическими включениями, уменьшение их размеров и улучшение формы.

4. Показано, что наиболее высокую точность введения азота в металл обеспечивает азотированный феррохром жидкофазного насыщения - $\pm 0,002\%$ (мас.). Феррованадий твердожидкого насыщения - $\pm 0,003\%$, феррохром и марганец твердофазного насыщения - $\pm 0,005\%$ и $\pm 0,006\%$ соответственно. При этом ферросплавы твердофазного насыщения наиболее окислены, что способствует повышенному угару ванадия.

5. Установлено, что в условиях снижения остаточного содержания алюминия до 0,005-0,015% (мас.) и повышения температур нормализации и закалки до 940-960°C присутствие в аустените 0,015-0,030% (мас.) дисперсной нитридванадиевой фазы обеспечивает стабилизацию более мелкого зерна аустенита, чем в сталях, содержащих 0,03-0,07% (мас.) алюминия, 0,01-0,05% титана и циркония.

6. Показано, что комплексная оптимизация изучаемых параметров металлургической технологии нитридванадиевого упрочнения конструкционных сталей обеспечивает повышение их прокаливаемости, диспергирование элементов феррито-перлитной, перлитной, мартенситной структур и структур отпуска мартенсита.



уменьшение структурной, в том числе нитридной, неоднородности сталей.

7. На примере разработанных сталей марок 45ХАФ, 32ХГ2САФ и 14ХГ2САФД показано, что оптимизация технологии нитридванадиевого упрочнения обеспечивает дополнительное повышение прочностных свойств до 200 МПа, ударной вязкости при комнатных и отрицательных температурах на 50-150%, усталостной прочности в 2-3 раза при сохранении высокого уровня пластических свойств.

8. Результатами внедрения разработанных марок сталей на Ново-Кузнецком металлургическом комбинате - 45ХАФ, Азтрубзаводе - 32ХГ2САФ, Орско-Халиловском металлургическом комбинате - 14ХГ2САФД и опробования на комбинате "Азовсталь" - 22Г2САФ показано, что оптимизированная технология нитридванадиевого упрочнения низко- и среднеуглеродистых конструкционных сталей различного назначения, легированных марганцем, кремнием и хромом, обеспечивает характеристики их прочностных и пластических свойств, ударной вязкости при комнатных и отрицательных температурах, усталостной прочности и вязкости разрушения, которые не уступают и даже превосходят свойства низколегированных хромомолибденовых и хромоникельмолибденовых сталей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ.

1. Нитридванадиевое упрочнение стали 22К. /Ю.З.Бабаскин, С.М.Кутищев, И.Ф.Кирчу и др.// Металлург - 1985, N 12, с. 19-20.

2. Повышение предела выносливости бурильных труб. /Ю.З.Бабаскин, С.М.Кутищев, И.Ф.Кирчу и др.// Металлург - 1986, N 3, с. 35-36.

3. Производство стали 32ХГ2САФ для бурильных труб. /Ю.З.Бабаскин, С.М.Кутищев, И.Ф.Кирчу и др.// Металлург - 1987, N 3, с. 21-22.

4. Освоение производства обсадных и бурильных труб нефтяного сортамента. /Ю.З.Бабаскин, С.М.Кутищев, И.Ф.Кирчу и др.// Металлург - 1987, N 7, с. 28-29.

5. Упрочнение стали 22К нитридной фазой. /С.М.Кутищев, Л.В.Дубенко, И.Ф.Кирчу// Проблемы стального слитка. Киев, ИПЛ АН УССР, 1988; с.124-127.

6. Особенности отливки стальных слитков с нитридным упрочнением металла. /Ю.З.Бабаскин, С.М.Кутищев, Л.В.Дубенко, И.Ф.Кирчу и др.// Совершенствование процессов непрерывной разливки стали. Киев, ИПЛ АН УССР, 1985, с.180-182.

7. Разработка и освоение производства сталей с нитридванадиевым микролегированием. /Ю.З.Бабаскин, С.М.Кутищев, И.Ф.Кирчу и др. //Повышение качества стальных слитков. Киев, ИПЛ АН УССР, 1988, с.53-55.

8. Особенности микролегирования конструкционных сталей азотом, ванадием, алюминием. /С.М.Кутищев, Л.В.Дубенко, И.Ф.Кирчу.// Интенсификация литейных технологий. Киев, ИПЛ АН Украины, 1989, с.20-21.

9. Повышение надежности и долговечности бурильных труб нефтяного сортамента. /Ю.З.Бабаскин, С.М.Кутищев, И.Ф.Кирчу и др. //Процессы разливки стали и качества слитка. Киев, ИПЛ АН УССР, 1989, с. 71-74.

10. Производство листовой стали с нитридванадиевым упрочнением. /Ю.З.Бабаскин, С.М.Кутищев, И.Ф.Кирчу и др.// Процессы разливки, модифицирования и кристаллизации стали и сплавов. Волгоград, 1990, часть 1, с.193-194.

11. Влияние параметров улучшения на обратимую отпускную хрупкость стали./ Е.Г.Афтандиянц, Ю.З.Бабаскин, И.Ф.Кирчу и др. //Процессы литья, Киев, ИПЛ АН УССР, 1992, с.96-99.

12. А.С. 1601181 СССР, МКИ С22С38/24, 38/38. Сталь /Ф.В.Крыль, А.В.Храпов, В.В.Павлов, Ю.З.Бабаскин, С.М.Кутищев, И.Ф.Кирчу и др., N 4644646. Заявлено 20.02.88; Оpubл. 23.10.90, Бюл. N 39.

13. А.С. 1724693 СССР, МКИ С21Д1/18, 9/46. Способ термической обработки стальных листов. /Ю.З.Бабаскин, С.М.Кутищев, И.Ф.Кирчу и др., N 4762737. Заявлено 12.11.89; Оpubл. 07.04.92, Бюл. N 13.

14. А.С. 1691421 СССР, МКИ С22С38/24. Сталь /Ю.З.Бабаскин, С.М.Кутищев, И.Ф.Кирчу и др., N 4699152. Заявлено 31.05.89; Оpubл. 15.11.91, Бюл. N 42.

15. А.С. 1507851 СССР, МКИ С22С38/50. Сталь /Ю.З.Бабаскин, С.М.Кутищев, Л.В.Дубенко, И.Ф. Кирчу и др., N 4288952. Заявлено 22.07.87; Опубл. 15.09.89, Бюл. N 34.

Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1.25. Тираж 100 экз. Заказ 8-02-94.

Типография фирмы "Эссе". Киев, пр-т Вернадского 34/1.

462466

AB 29.721

AB 29.721