

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Блинова Евгения Викторовича

«Развитие систем легирования высокоазотистых аустенитных сталей для тяжело нагруженных изделий криогенной техники», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01- «металловедение и термическая обработка металлов».

Диссертационная работа Евгения Викторовича Блинова посвящена развитию систем легирования азотсодержащих аустенитных Cr-Mn-Ni-сталей с целью их использования в качестве материала для тяжело нагруженных изделий криогенной техники. В литературе имеется достаточно большое количество работ по созданию высокоазотистых Cr-Mn-Ni аустенитных сталей. Автор диссертации Евгений Викторович Блинов нашел свою научную нишу в данном направлении, разрабатывая научные основы получения сталей с улучшенными низкотемпературными свойствами. Основными задачами большого комплексного исследования является установление закономерностей изменения структуры, физико-механических, технологических и коррозионных свойств Fe-Ni-N и Fe-Cr-Mn-Ni-N сплавов в зависимости от их легирования, термической и термо-механической обработок, в том числе на изделиях из новых высокоазотистых аустенитных сталей промышленной выплавки.

Актуальность работы не вызывает сомнения, так как выяснение закономерностей создания неферромагнитных азотистых сталей с повышенными характеристиками прочности и ударной вязкости при криогенных температурах имеет не только важное научное значение, но и чрезвычайно важно для промышленности, в частности для производства контейнеров, в которых транспортируется сжиженный газ. Совместное использование нескольких механизмов упрочнения (твердорастворного,

зернограничного, дислокационного и дисперсионного) предопределило успех настоящей работы.

Диссертация имеет **внутреннее структурное единство**, изложена на 329 страницах, состоит из введения, 6 глав, выводов и приложения, содержит 133 рисунка, 82 таблицы и список литературы из 270 наименований. При исследовании структуры и фазовых превращений использован **набор современных аналитических методик** (трансмиссионная электронная микроскопия, световая микроскопия, рентгенография, дилатометрия и др.), что обеспечило высокий методический уровень экспериментов. На основании выполненных научных исследований автором обоснованы составы новых азотсодержащих сталей и режимы упрочняющих обработок (получено 8 патентов РФ). Проведена широкая проверка физико-механических и химических свойств сталей (с анализом прочности, пластичности, ударной вязкости, износостойкости, усталости, коррозионной стойкости и др.), осуществлено внедрение сталей и технологий в производство отдельных деталей криогенной техники на предприятиях страны.

Обоснованность выводов и достоверность полученных результатов подтверждается их воспроизводимостью на большой группе сталей, а также комплексным использованием взаимодополняющих методов анализа. **Выводы соответствуют содержанию диссертации.** Новизна полученных результатов подтверждена патентами РФ. Результаты диссертации опубликованы в 32 печатных работах, в основном, в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК. Автор прошел апробацию на 11 международных, всероссийских и отраслевых конференциях и семинарах. Содержание диссертации **соответствует содержанию и качеству опубликованных работ.**

Ниже приводятся **основные новые научные результаты** работы:

1. С учетом различия между воздействием углерода и азота на структуру и свойства сталей определены **основные принципы** легирования азотсодержащих Cr-Mn-Ni сталей с высокими низкотемпературными характеристиками ударной вязкости, прочности и пластичности в интервале температур 20.-253°C для использования в тяжело нагруженных изделиях криогенной техники. Показана необходимость обеспечения полной растворимости азота (0.4-0.6 мас.%) в аустените, исключения формирования δ -феррита, стабилизации аустенита по отношению к $\gamma \rightarrow \epsilon$ и $\gamma \rightarrow \alpha$ мартенситным превращениям при охлаждении и пластической деформации. Введение в сталь азота и ванадия в количествах, при которых ванадий полностью связывает азот, должно предотвращать протекание прерывистого распада и исключать падение ударной вязкости. Выполнено комплексное легирование сталей Mo, V и Nb. с целью дисперсионного твердения, измельчения аустенитного зерна и карбонитридов VN(C). Определена необходимость формирования ячеистой дислокационной структуры без карбидов $Me_{23}C_6$ (при отношении $C/N \leq 0,12$ и концентрации никеля 5-8 %). Основное повышение прочностных характеристик сталей достигается в результате твердорастворного упрочнения азотом и (или) выделением наночастиц типа VN размером 5-8 нм. Оптимальные содержания азота (0,5-0,6%N) и ванадия (0,1-0,3%V) обеспечиваются для аустенитных Cr-Mn-Ni сталей с преобладающим твердорастворным упрочнением и (0,3-0,4%N) и (0,8 – 1,1%V) - для аустенитных Cr-Mn-Ni сталей с карбидным дисперсионным твердением. Построены фазовые диаграммы сплавов Fe-Cr-Mn-Ni-N и Fe-Ni-N. На основе отмеченных выше принципов легирования предложен ряд новых азотсодержащих сталей, из которых 8 сталей защищены патентами РФ
2. Рассмотрена возможность замены Fe-Ni инваров и стали 0Н9 на более прочные стали системы Fe-Ni-N с целью их использования в криогенной

технике. Так как растворимость азота в Fe-Ni сплавах мала (менее 0,04%), была исследована возможность получения слитков со сверхравновесным содержанием азота (до 0.27 %) в сплавах железа с (4-34 % Ni) в условиях выплавки под давлением азота до 40 атм. В зависимости от содержания азота и никеля в литых сплавах была построена фазовая диаграмма, определяющая наличие α , γ и $\alpha+\gamma$ фаз. Однофазное аустенитное состояние имеет место в сталях с 0.13 % N и 27.5 Ni. Предложена мартенситная сталь 04Н9Х2А с небольшим количеством межреечного остаточного аустенита, обладающая высокой прочностью ($\sigma_{0.2}=879$ МПа) и ударной вязкостью ($KCU = 1$ МДж/м²) при -196°С (после закалки от 850°С и старения при 550°С, 1ч). Прочность азотистой стали выше прочности используемой в криогенной технике безазотистой стали типа 0Н9.

3. Оценено влияние термических и термо-механических обработок на структурно-фазовые превращения и оптимизацию физико-механических и химических свойств предложенных азотсодержащих Mn-Ni и Cr-Mn-Ni сталей, в том числе при криогенных температурах. Выяснен механизм разрушения сталей при ударном нагружении. Определены высокие характеристики сопротивления коррозии, усталостной прочности и износостойкости. Показано, что максимальную долговечность и более высокий предел выносливости (400 МПа) имели образцы стали 05Х22АГ15Н8МФ, у которых в процессе прокатки при 1100°С формируется мелкозернистая аустенитная структура с большим количеством двойников и высокой плотностью дислокаций. Высокоазотистая аустенитная нержавеющая сталь 04Х20Н6Г11М2АФБ в горячекатаном (при 1100-900°С) и закаленном от 1100°С состоянии обладает достаточно высокой трещиностойкостью.
4. Работу выгодно отличает не только разработка составов новых сталей с анализом структурно-фазовых превращений, механических свойств и коррозионной стойкости, но и изучение технологических характеристик

(свариваемости и обработки резанием.. Последнее обстоятельство позволяет перейти непосредственно к изготовлению деталей криогенной техники из предложенных материалов. Наиболее благоприятно проведение сварки сталей типа 05X22AG16H8M и 05X22AG15H8M2Ф после закалки от 1100°C. При этом кратковременный нагрев при 800°C в течение 1 ч приводит к формированию аустенитной структуры без σ -фазы и δ -феррита с небольшим количеством нитридов типа Cr₂N преимущественно по зерненным границам в околосварной зоне сварного соединения, что позволяет сохранить хорошие механические свойства, том числе достаточно высокую ударную вязкость (KCU = 3,0 МДж/м²). Увеличение времени старения до 10 ч и более приводит к резкому снижению ударной вязкости из-за образования σ -фазы и нитридов хрома по механизму прерывистого распада. Показано, что по уровню прочности и ударной вязкости сварные соединения горячедеформированных образцов сталей 05X22AG16H8M и 05X22AG15H8M2Ф превосходят в 1,6-1,8 раза применяющиеся ранее стали 07X13Г20АН4 и 03X20Н16АГ6 Стойкость резцов значительно повышается в процессе точения этой стали при скорости резания 21-74 м/мин, глубине резания 0,25-0,75 мм. При таких режимах точения отсутствует налипание металла на инструмент. При скорости резания 169 и 186 м/мин обрабатываемость стали резко снижается из-за повышения температуры в зоне резания.

По диссертации можно сделать следующие **замечания**.

1. В работе отсутствуют сведения по коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН) сталей **при длительных выдержках** (сотни часов) в агрессивных средах. На рис.4.39 представлено сопротивление КРН стали X15AG14H8Ф (с 0,406 % N, 1,26 % V) только при выдержке до 12-мин. в 3% растворе NaCl после закалки от 1200°C и старения при 650°C, 16 ч, с выделением нитридов VN.. Известно, что в состаренном состоянии в Cr-Mn-

Ni –V-N аустенитных сталях наблюдается снижение сопротивления КРН по сравнению с КРН закаленных сталей, в которых азот находится в твердом растворе. По литературным данным (см. Филиппов Ю.И. и др. ФММ, 2014, Т.115, № 6. С. 624-637), выдержка 350 ч в 3.5% водном растворе NaCl резко снижает отношение разрушающего напряжения в агрессивной среде к разрушающему напряжению на воздухе $\sigma_{ср}/\sigma_{воз}$. Например, в состаренной при 700°C (10 ч) стали 09X20H6Г11M2АФБ с 0.45 % N и малым количеством ванадия (0.12 %) составляет 0.55, а в закаленном состоянии существенно больше 0.90. Эта разница будет еще значительнее при увеличении концентрации ванадия с образованием большего количества фазы внедрения (VN или VC). В частности, в состаренной при 650°C (10 ч) аустенитной стали 35X12Г24Ф2М разрушающее напряжение в 3.5% водном растворе NaCl катастрофически снижается в 4 раза за время выдержки всего 50 ч. (см. Завалишин и др. Проблемы прочности. 1991. №1 (259).С. 51-58)

2. Автор диссертации экспериментально не определял энергию дефекта упаковки (ЭДУ) в различных аустенитных сталях, а использовал представленные в литературе или рассчитанные по известным формулам значения ЭДУ, которые отличаются у разных авторов. Так например, расчет ЭДУ по трем приведенным на стр 45 формулам Schramn et al., Rhodes et al. и Pickering дает для сплава Fe-18Cr-10Ni следующие сильно различающиеся значения 127, 26 и 62 мДж/м, соответственно. Поэтому использовать абсолютные величины ЭДУ необходимо с большой осторожностью

3. При электронно-микроскопических исследованиях не везде дано увеличение (см. рис 3.15, 3.33), нет отдельных микродифракций с расшифровкой карбидов, нитридов, двойников, σ -фазы и др (см рис 3.2, 3.17, 3.34). Имеются снимки не очень высокого качества (например рис.11 автореферата).

Сделанные замечания являются, в основном, рекомендациями для дальнейших исследований и не умаляют достоинств диссертационной работы..

Представленную к защите диссертацию можно рассматривать как **значительный вклад в металловедение азотсодержащих сталей** с высокими низкотемпературными свойствами. Результаты, полученные Е.В.Блиновым, имеют не только **научную ценность**, но и важную **практическую значимость**, обладают достаточной общностью и могут быть использованы на предприятиях и в научных коллективах, занимающихся разработкой и изготовлением изделий криогенной техники (ЦНИИ КМ «Прометей», ФГУП «ПО «СЕВМАШ», Институте физики металлов УрО РАН, ИМЕТ им. Байкова и др.). Разработанные автором новые стали и технологии их обработки обеспечивают сочетание необходимых характеристик прочности, ударной вязкости и коррозионной стойкости при криогенных температурах. Они обладают удовлетворительными характеристиками свариваемости и обработки резанием. В ОАО «Нормаль» изготовлена и испытана партия болтов из предложенной аустенитной стали 05X22AG15H8M2Ф. В центральном научно-исследовательском институте технологии судостроения изготовлены для работы при низких температурах литые корпусные детали запорно-регулирующей арматуры из стали.05X22AG15H8M2Ф, превосходящие аналогичные детали из бронз и нержавеющей сталей

Положения, выносимые на защиту, соответствуют выводам диссертационной работы и отражают суть основных научных результатов, полученных в исследованиях Е.В.Блинова. Считаю, что все основные выводы и положения, выносимые на защиту, являются новыми и научно обоснованными.

В целом диссертационная работа представляет собой **завершенное** выполненное на **актуальную** тему систематическое исследование, содержащее **достоверные** результаты и сформулированные на их основе научные положения, которые можно квалифицировать как решение **крупной научной проблемы** по созданию новых хладостойких **азотсодержащих сталей** с высокими низкотемпературными свойствами., что имеет важное

народнохозяйственное значение, в частности, для создания арматуры и корпусов для транспортирования сжиженного газа. Полученные результаты соответствуют целям и задачам диссертации. Оформление диссертации, стиль и язык изложения соответствуют предъявляемым требованиям ВАК. Основные результаты работы опубликованы в журналах, включенных в перечень ВАК, обсуждены на многочисленных всероссийских и международных конференциях. Тема диссертационной работы соответствует заявленной специальности. Автореферат полностью соответствует основным целям и выводам диссертации и отражает ее основное содержание.. Работа отвечает всем требованиям ВАК России, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Евгений Викторович Блинов заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01- «металловедение и термическая обработка металлов».

Официальный оппонент

Доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
Института физики металлов
им. М.Н. Михеева Уро РАН,
член-корреспондент РАН



Сагарадзе
Виктор Владимирович

620990 Екатеринбург, ул. С.Ковалевской, 18, ИФМ УрО

РАН, тел. 8-343-374-42-14, E-mail: vsagaradze@imp.uran.ru

10.09.2018 г.

*Ученой степени
института, к.т.н.*



Иванова И. И.