

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Банных Игоря Олеговича «Металловедческие основы создания многофункциональных высокоазотистых сталей аустенитного класса», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01- «металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Диссертационная работа Банных Игоря Олеговича посвящена разработке материаловедческих основ создания новых высокоазотистых коррозионностойких аустенитных сталей высокой прочности с глубоким анализом процессов структурообразования, механических и эксплуатационных свойств. В последнее время появилось большое количество работ по азотсодержащим аустенитным сталям. Автор диссертации И.О.Баных нашел свое научную нишу среди этих исследований, разрабатывая условия рационального легирования и создания необходимой зеренной структуры, оптимизации термических и термо-механических обработок. Игорь Олегович Баных представляет один из двух ведущих в мире коллективов РФ (ИМЕТ им. А.А.Байкова и ЦНИИ КМ «Прометей»), которые создают высокоазотистые аустенитные стали с уникальными физико-механическими и коррозионными свойствами.

Актуальность работы не вызывает сомнения, так как разработка принципов создания многофункциональных деформационно-стабильных азотистых аустенитных сталей имеет не только большое научное значение, но чрезвычайно важна для их практического применения в качестве конструкционных материалов с уникальными физико-механическими свойствами. Стали обладают более высокими характеристиками прочности, усталости, вязкости разрушения и коррозионной стойкости при меньшем содержании никеля, чем известные «безазотистые» Cr-Ni аустенитные стали.

Диссертация имеет **внутреннее структурное единство**, изложена на 253 страницах, состоит из введения, 6 глав, выводов и приложения, содержит 126 рисунков, 24 таблицы и список литературы из 174 наименований. В работе использованы **современные аналитические методы** (рентгенография, трансмиссионная и сканирующая электронная микроскопия, световая микроскопия, дилатометрия и др.), что обеспечило высокий методический уровень экспериментов. Выплавлено большое количество аустенитных сталей

с различным количеством азота. Выполнен значительный объем испытаний механических свойств (прочности, пластичности, твердости, ударной вязкости, усталости). Определены коррозионные и коррозионно-механические свойства сталей в агрессивных средах. На основании выполненных исследований автором обоснованы новые научные подходы к получению азотсодержащих сталей и режимов упрочняющих обработок (получено 4 патента РФ). осуществлено опробование и внедрение сталей в производство.

Обоснованность выводов и достоверность полученных результатов подтверждается использованием комплекса современных высокоточных приборов и оборудования, воспроизводимостью результатов на большой группе исследованных сталей, непротиворечащим соответствием выводов с зарубежными и российскими научными публикациями, а также комплексным использованием современных методов компьютерной обработки. **Выводы соответствуют содержанию диссертации.** Новизна полученных результатов подтверждена патентами РФ. Результаты диссертации опубликованы в 1 монографии и 30 печатных работах, в основном, в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Автор прошел апробацию на 10 международных и российских конференциях. Содержание диссертации **соответствует содержанию и качеству опубликованных работ.**

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

1. Выявлены закономерности фазовых превращений и структурообразования, в том числе определены особенности формирования зерен по размерам, в азотсодержащих аустенитных Cr-Mn-Ni сталях в зависимости от легирования, термической и деформационной обработок. Оценено сдерживающее влияние на рост зерен частиц нитридов Cr, а также нитридов V, Nb и Mo в дополнительно легированных сталях. Показано, что энергии активации роста зерен при 900-1100 °С определяется преимущественно зернограничной диффузией, а при 1100-1200 - объемной. По характеру расщепления дислокаций экспериментально определена энергия дефекта упаковки (ЭДУ) в различно легированных азотистых сталях, которая растет от 14 до 26 мДж/м² при увеличении содержания никеля и марганца. Установлена взаимосвязь энергии активации роста зерен с величиной ЭДУ. При повышенных значениях ЭДУ средний размер рекристаллизованных зерен увеличивается.

2. Определены особенности формирования механических свойств (прочности, ударной вязкости, усталости и др.) в азотсодержащих аустенитных сталях при разном легировании, различных термических и термомеханических

обработках. В частности, определенные механические свойства сталей можно связать со стабильностью легированного азотистого аустенита. Мерой деформационной устойчивости аустенита против мартенситного превращения предлагается применять зависящую от концентрации легирующих элементов мартенситную точку Md_{30} , который соответствует температуре превращения 50% аустенита в мартенсит после 30% деформации растяжением. В высокоазотистых аустенитных сталях с повышенной стабильностью аустенита (по сравнению с традиционными Cr-Ni аустенитными сталями) значения параметра Md_{30} виртуальные, однако их можно эффективно использовать. Показано, что температура вязко-хрупкого перехода ($t_{ВХП}$) наиболее высокая в сталях с большими виртуальными значениями Md_{30} (так в стали 07X20AG9H8MФ при $Md_{30} = -700^\circ\text{C}$ значения $t_{ВХП}$ повышаются до 90°C).

3. Проанализированы характеристики общей коррозии и коррозионного растрескивания под напряжением в высокоазотистых аустенитных сталях разного легирования после различных термических и деформационных воздействий. Найдена взаимосвязь между параметром стабильности аустенита Md_{30} и общей коррозией K_m (г/м²ч). Минимальные значения K_m фиксируются в стали 04X22AG17H8M2Ф при $Md_{30} = -500^\circ\text{C}$.

4. Рассчитан объемный эффект мартенситного превращения при деформационно-индуцированном распаде метастабильного аустенита $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Cr}_2\text{N}$ в высокоазотистых сталях. Он может быть не только положительным, но и отрицательным в процессе образования большого количества нитрида хрома с меньшей плотностью, чем γ и α фаз. При этом возможно появление растягивающих напряжений в изделиях, что снижает их эксплуатационные характеристики. Показано, что отрицательный объемный эффект превращения возникает в сталях с содержанием азота более 0,6 % и марганца - более 30%.

5. Обобщены известные и выработаны новые научные подходы к созданию азотсодержащих аустенитных сталей с уникальным комплексом свойств при термических и термопластических обработках, построена фазовая диаграмма Cr-Mn-N сталей с переменным содержанием Mn. Выполнено обобщение основной роли легирующих элементов. Установлено, что содержание хрома должно быть в пределах 12-20 мас.%, чтобы иметь высокую растворимость азота в аустените, сдерживать образование σ -фазы и δ -феррита и сохранить коррозионную стойкость стали. Содержание марганца 8-20 мас.% необходимо для повышения растворимости азота и стабилизации аустенита (против мартенситного превращения). Содержание молибдена ~2% важно для повышенной коррозионной стойкости. С целью сохранения отрицательной

температуры вязко-хрупкого перехода необходимо ограничить содержание азота 0,9 мас.% и желательнo иметь 2-4% никеля. Ограничение роста зерна аустенита обеспечивается выделением нитридов при легировании сталей Mo, Nb и V.

Практическая значимость работы высокая. Разработанные автором материаловедческие основы создания новых высокоазотистых аустенитных сталей позволяют специалистам получать необходимые конструкционные материалы с нужными прочностными и коррозионными свойствами. Автором диссертации предложены стали 05X16Г7АМФ (патент РФ № 2425905) и 02X20АГ10Н4МФБ (патент РФ № 2421538) для немагнитных деталей судовых конструкций. По сочетанию прочностных, пластических и магнитных свойств эти стали превосходит известные материалы 10X14Г92СА и 05X24АГ7Н18М4. Создана, выплавлена и термически обработана аустенитная сталь 04X21Г11Н3АМФ (патент РФ № 2367710), превосходящая по свойствам применяющиеся немагнитные стали типа AISI 304 и 07X21Г7АН5. Производство сталей подтверждено актами опробования и внедрения.

По диссертации можно сделать следующие **замечания**.

1. Автор называет **атермическими** мартенситные превращения γ - ε - α и γ - α в азотистых Cr-Mn-Ni аустенитных сталях (см. стр 181 диссертации), хотя атермическим мартенситом с плоскостью габитуса $\{259\}_{\gamma}$ принято считать мартенсит в Fe-Ni аустенитных метастабильных сплавах с повышенными значениями ЭДУ. Обычно в Cr-Mn-Ni аустенитных сталях преобладает реечный мартенсит с плоскостью габитуса $\{557\}_{\gamma}$ и смешанной кинетикой превращения.
2. Из текста диссертации не совсем понятна физическая связь между коррозионной стойкостью, температурой хрупко-вязкого перехода и рассчитанной мартенситной точкой Md_{30} , которая зависит от состава стали и может принимать виртуальные значения (до -1000°C).
3. Чрезвычайно интересное расчетное предсказание отрицательного объемного эффекта $\Delta V/V$ при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении в высокоазотистых Cr-Mn-Ni аустенитных сталях желательнo подтвердить экспериментальными результатами (это пожелание для будущих исследований автора диссертации). Следует отметить, что появление зависящих от знака $\Delta V/V$ сжимающих или растягивающих напряжений при мартенситных превращениях обычно рассматривается при переходе сферического объема сплава в сферический объем иного размера. Однако реально в процессе

сдвигового мартенситного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ (или при образовании видманштеттового феррита) сферический объем превращается в эллипсоидный с осями больше и меньше исходного диаметра сферы. Какие при этом возникнут напряжения предсказать затруднительно.

4. Имеются отдельные неточности в тексте. Некоторые электронограммы невысокого качества, нет темнопольных изображений δ -феррита (рис. 2-30, 2-31), что позволило бы однозначно интерпретировать эту фазу. На рис. 3-30 отсутствует масштаб.

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

Представленную к защите диссертацию можно рассматривать как **значительный вклад в металловедение азотсодержащих сталей** с уникальным комплексом эксплуатационных характеристик. Результаты, полученные И.О.Баных, имеют **научную и практическую значимость**, обладают достаточной общностью и могут быть использованы на предприятиях и в научных коллективах, занимающихся разработкой и использованием азотсодержащих аустенитных сталей (НИЦ «Курчатовский институт»-ЦНИИ КМ «Прометей», ФГУП «ВИАМ», «ПО «СЕВМАШ», Институте физики металлов УрО РАН, ИМЕТ им. Байкова и др.). Предложенные вторым научные подходы к легированию и формированию структурно-фазовых состояний высокоазотистых аустенитных сталей при термических и деформационных воздействиях обеспечивают сочетание необходимых прочностных, усталостных и коррозионных свойств. Положения, выносимые на защиту, соответствуют выводам диссертационной работы и отражают суть основных научных результатов, полученных в исследованиях И.О.Баных. 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, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области металловедения по созданию новых **азотсодержащих сталей** с высокими механическими и коррозионными характеристиками. 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 Игорь Олегович Банных заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01- «металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент

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



Сагарадзе
Виктор Владимирович

620108 Екатеринбург, ул. С.Ковалевской, 18, ИФМ
УрО РАН, Рабочий телефон: +7-343-374-42-14,
Адрес эл.почты: vsagaradze@imp.uran.ru

