

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы Банных Игоря Олеговича “Металловедческие основы создания многофункциональных высокоазотистых сталей аустенитного класса”, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 – металлведение и термическая обработка металлов и сплавов.

Коррозионностойкие аустенитные стали на протяжении многих лет являются важным конструкционным материалом практически для всех отраслей промышленности - от пищевой и медицинской до авиакосмической и атомной энергетики. В то же время возможности повышения физико-механических и коррозионных свойств традиционных низкоуглеродистых хромоникелевых аустенитных сталей в настоящее время практически исчерпаны. По сравнению с ними высокоазотистые аустенитные стали (ВАС) обладают более высокими показателями статической и циклической прочности, вязкости разрушения, коррозионной стойкости и стабильности аустенита при существенно меньшем содержании никеля, что делает их перспективным конструкционным материалом, отвечающим современным требованиям промышленности. Несмотря на то что к настоящему времени разработано значительное количество ВАС различных составов, некоторые их свойства, связанные с принципиальной особенностью этих сталей - с использованием в качестве основного легирующего элемента азота, образующего с железом и другими легирующими элементами твердый раствор внедрения, ограничивают их реальное применение. Актуальность диссертационной работы Банных И. О. направлены на состоит в развитии современных представлений о закономерностях формирования структурно-фазовых состояний ВАС, их влияния на физико-механические и эксплуатационные свойства, установление границ рационального легирования, оптимизацию режимов термической и термомодеформационной обработки, позволяющих в максимальной степени реализовать уникальные характеристики этих сталей и в то же время избежать проявления присущих им ряда негативных явлений в условиях применения их в качестве конструкционных материалов.

В работе были поставлены и решены следующие основные научные

задачи:

- детально исследованы закономерности структурообразования ВАС на различных этапах технологического передела.
- проанализированы особенности формирования важных для практического применения механических свойств ВАС.
- изучены условия реализации высокой коррозионной стойкости в зависимости от химического состава и способов деформационной и термической обработок ВАС.
- проанализированы факторы, влияющие на деформационную стабильность аустенитной структуры и эксплуатационные характеристики ВАС.
- сформулированы основные принципы рационального легирования и термомодеформационной обработки ВАС для реализации комплекса высоких механических и коррозионных свойств.
- уточнены основные области целесообразного применения ВАС и проведено промышленное опробование получения сталей этого класса с заданным комплексом свойств при оптимальном легировании.

В ходе исследований были получены новые научные результаты:

1. Построена фазовая диаграмма хром-марганцевой высокоазотистой аустенитной стали с переменным содержанием марганца и зависящего от него равновесным содержанием азота. Установлены положения границ аустенитной области для диапазона температур 500-1600°C в зависимости от содержания марганца и азота. Показано, что с повышением концентрации марганца снижаются температуры солидус и ликвидус, при этом температурный интервал между ними изменяется немонотонно, достигая максимума (68°C) при 12% Mn и минимума (47°C) при 20% Mn. Обнаружена сильная зависимость от содержания марганца температуры существования охрупчивающей  $\alpha$ -фазы.
2. На примере стали 05X20Г10НЗАМФ показано, что основным механизмом разрушения в интервале вязко-хрупкого перехода стали после закалки от 1100°C и выдержки при 850°C является образование ГЦК-фасеток внутризеренного разрушения, сдвиговых и плоских ямок, языков сдвига и фасеток межзеренного разрушения. Предложена модель образования ГЦК-

фасеток скола в высокоазотистых аустенитных сталях, заключающаяся в облегчении скольжения дислокаций в предшествующем разрушению состоянии и последующего разрушения при напряжении ниже предела текучести материала.

3. Определена энергия дефектов упаковки для высокоазотистых аустенитных сталей различного химического состава. Для всех исследованных составов повышение содержания элементов внедрения, а также суммарного содержания марганца и никеля повышает энергию дефектов упаковки.

4. Определена энергия активации роста зерен аустенита высокоазотистых аустенитных сталей различного состава в процессе высокотемпературной термической обработки. Установлено, что энергия активации роста зерна аустенита при рекристаллизации в интервале температур 900-1100 °С определяется преимущественно зернограничной диффузией основных компонентов сплава, а в интервале температур 1100-1200 °С преобладают процессы объемной диффузии.

5. Применительно к высокоазотистым аустенитным сталям продемонстрирована эффективность прогнозирования температуры вязко-хрупкого перехода и коррозионной стойкости по параметру деформационной нестабильности аустенита. Показано, что в отличие от традиционных аустенитных сталей, для которых этот параметр соответствует температуре превращения 50% аустенита в мартенсит при 30% деформации растяжением, для высокоазотистых аустенитных сталей он является условной величиной вследствие повышения стабильности аустенита.

6. Впервые показано, что для высокоазотистых аустенитных сталей объемный эффект превращения при распаде метастабильного аустенита может быть отрицательным и приводить к формированию растягивающих напряжений, что отличает высокоазотистые аустенитные стали от традиционных аустенитных сталей, для которых этот объемный эффект всегда положительный. Показано, что хром и никель практически не влияют на объемный эффект превращения, который целиком и полностью определяется содержанием азота и марганца.

7. Установлено, что при высоком содержании марганца (около 17%) аустенитная фаза сохраняет стабильность при охлаждении до криогенных температур. При более низком содержании этого элемента охлаждение до криогенных температур вызывает протекание мартенситного превращения. Установлено, что старение высокоазотистых аустенитных сталей в интервале температур 500-800 °С приводит к гомогенному распаду пересыщенного у-твердого раствора с образованием изоморфных частиц нитрида
8. Показано, что в процессе горячей деформации и отжига высокоазотистой аустенитной стали, содержащей 0,11% бора, образуется карбонитридная фаза с ГПУ-решеткой, обладающая низкими прочностными и упругими свойствами, что существенно снижает ударную вязкость исследованной стали по сравнению с аналогичными высокоазотистыми аустенитными сталями, не содержащими бора.
9. Определены температурный интервал нагрева и длительность изотермической выдержки для процесса собирательной рекристаллизации сталей типа 0X20AG12N4 и высокоазотистых аустенитных сталей, дополнительно легированных молибденом, ванадием и ниобием, обеспечивающие требуемые прочность и твердость за счет формирования необходимого размера зерна гамма-фазы.
10. Установлено максимальное содержание марганца и азота в высокоазотистых аустенитных сталях, способствующие формированию сжимающих остаточных напряжений при распаде метастабильного аустенита в процессе старения составляющее 3,8; 14,2 и 24,8% Мп при содержании азота 1,1; 0,9 и 0,7% соответственно.
11. Разработана оригинальная рентгеновская методика определения остаточных напряжений и содержания азота в у-твердом растворе высокоазотистых аустенитных сталей и азотированных аустенитных сталей, основанная на разделении вкладов в величину периода решетки гамма-фазы упругих напряжений и содержания внедренного азота с использованием особенностей упругой анизотропии ГЦК-решетки аустенита.

На базе результатов научных исследований разработаны важные для практики приложения:

разработаны сталь 05X16Г7АМФ (патент РФ № 2425905) и сталь 02Х20АГ10Н4МФБ (патент РФ № 2421538) и режимы их термической и термопластической обработок, в соответствии с которыми проведена их выплавка и горячая деформация в НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей». Сталь 05X16Г7АМФ по уровню прочности и коррозионной стойкости превосходит применяющуюся аналогичную сталь 10X14Г92СА, а сталь 02Х20АГ10Н4МФБ по сочетанию прочностных, пластических и магнитных свойств значительно превосходит применяющуюся аналогичную немецкую сталь типа 05X24АГ7Н18М4, что позволило рекомендовать эти стали в качестве материала перспективных немагнитных деталей судовых конструкций. В соответствии с проведенными испытаниями получен Акт внедрения от 19.08.2019 г;

разработана сталь 04Х21Г11Н3АМФ (патент РФ № 2367710), предложены режимы ее термической и термопластической обработок, в соответствии с которыми проведена выплавка и горячая деформация во ФГУП «ВИАМ». Установлено, что по уровню прочности сталь 04Х21Г11Н3АМФ превосходит аналогичные полуфабрикаты из применяющихся в настоящее время отечественных и зарубежных аналогов немагнитных сталей АК1 304 и серийной немагнитной стали 07Х21Г7АН5. В соответствии с проведенными испытаниями получен Акт опытного опробования от 12.09.2019 г.;

разработана технология высокоградиентной направленной кристаллизации стали 05X22АГ15Н8М2Ф, позволившая получить слитки с повышенными прочностью, пластичностью и более однородным распределением микротвердости по сечению по сравнению с литыми заготовками, полученными традиционным способом.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту, подробно изложены в публикациях Банных И.О., перечисленных в автореферате, доложены на международных и российских конференциях и семинарах, по

результатам исследования получено 4 патента на изобретение и написана монография.

Учитывая актуальность выполненных исследований, имеющуюся научную новизну и практическую значимость результатов, считаю, что представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Банных Игорь Олегович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов».

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук,

доктор технических наук, профессор,  
член-корр. РАН

Михаил Иванович Алымов

Я, Алымов Михаил Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН); ул. Академика Осипьяна, д. 8, г. Черноголовка, Московская область, 142432; тел.: 8 496 524 63 76 E-mail: director@ism.ac.ru.

28.05.2021

Подпись директора ИСМАН д.т.н., чл.-корр. РАН подтверждаю.

Ученый секретарь ИСМАН, к.ф.-м.н.



О.К. Камынина