

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертационную работу Блинова Евгения Викторовича
«Развитие систем легирования высокоазотистых аустенитных сталей для
тяжелонагруженных изделий криогенной техники», представленной на
соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и
сплавов».

Рассматриваемая диссертация посвящена систематическому изучению структурных механизмов упрочнения, разработке принципов легирования высокоазотистых аустенитных сталей, анализу поведения этих сталей в разнообразных условиях нагружения (статического, динамического и циклического) при различных температурах от +20 до -253°С.

Предпринятое автором исследование ставит своей целью дальнейшее развитие научных основ управления структурой и свойствами высокоазотистых аустенитных сталей, поиску новых составов таких сталей, а также методов и режимов их упрочнения. Криогенная техника широко применяется в ракетостроении, энергетике, управлении термоядерными процессами, освоении космоса, физике высоких энергий, криобиологии, криомедицине и криоэнергетике. Дальнейшее ее развитие обусловлено созданием новых материалов, пригодных для работы при высоких нагрузках и криогенных температурах.

Несмотря на то, что в разработке и промышленном освоении аустенитных сталей для криогенной техники в отечественной и мировой практике достигнуты значительные успехи, дальнейшее совершенствование таких сталей продолжает оставаться важной материаловедческой проблемой. В связи с этим актуальность цели, задач и полученных результатов диссертационной работы Блинова Е. В. не вызывает сомнения.

Диссертация Блинова Е.В. состоит из введения, 6 глав и выводов. Она изложена на 329 страницах, содержит 133 рисунка, 82 таблицы и список

использованной литературы (270 наименований).

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы создания новых высокопрочных аустенитных сталей с повышенным содержанием азота, излагается цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность, сформулированы основные положения выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы известные в настоящее время данные о свойствах применяемых в криогенной технике аустенитных сталей. Приведены их химические составы и режимы упрочнения. Достаточно подробно отмечена роль легирующих элементов, определяющих комплекс физико-механических свойств и величину энергии дефектов упаковки (ЭДУ) аустенитной фазы, от которой зависит степень их упрочнения под влиянием пластической деформации. Кроме того, описаны литературные данные о характере зарождения и распространения трещины при статическом и циклическом нагружении.

Во второй главе приведены результаты впервые представленных систематических исследований Fe-Ni сплавов со сверхравновесным содержанием азота. Показано, что частичная или полная замена углерода на азот в этих сплавах может решить проблему значительного повышения их прочности для нагруженных изделий криогенной техники. На основании исследований структуры и свойств сплавов с переменным содержанием никеля от 4 до 34% и азота от 0,05 до 0,3% построена фазовая диаграмма Fe-Ni-N, на которой определены концентрационные области α , $\alpha+\gamma$ и γ . Изучены фазовые превращения, структура и механические свойства низкоуглеродистого аустенитного сплава 05Н27А с 0,15%N и аустенитно-мартенситного сплава 04Н9Х2А с 0,22%N. По уровню прочности сплавы 05Н27А и 04Н9Х2А со сверхравновесным содержанием азота существенно превосходят применяющиеся в криогенной технике сплавы 05Н35 и 09Н9, не содержащие азот. Показано, что упрочнение Cr-Mn-Ni аустенитных сталей с равновесным и высоким содержанием азота достигается при совместном

использовании нескольких механизмов упрочнения (твердорастворного, зернограничного и дисперсного) для создания таких сталей с предельной растворимостью азота.

На основе изучения фазового состава сталей с переменным содержанием хрома от 13 до 30%, марганца от 1 до 21% , никеля от 1 до 15% построены фазовые диаграммы отражающие фазовый состав стали и взаимосвязь между никелевым эквивалентом и максимальным содержанием азота для определения значения хромового эквивалента. С использованием этих диаграмм выбраны составы Cr-Mn-Ni сталей с содержанием азота от 0,4 до 0,62% . Установлено, что в стали типа 06X21AГ14Н7М2Ф с 0,52% никеля после горячей прокатки и закалки от 1100°С формируется мелкозернистая структура с большим количеством двойников без мартенсита, феррита и σ -фазы. Особенностью этих закаленных сталей является их повышенная пластичность и относительно высокая ударная вязкость.

Для создания экономнолегированных Cr-Mn-Ni сталей для низкотемпературной службы диссертантом предложено комплексное легирование таких сталей азотом, медью и молибденом. Показано, что медь по сравнению с никелем оказывает положительное влияние на прочность и пластичность при криогенных температурах. Для новой медь-содержащей стали 09X19Г10Н6МАД2 разработаны режимы термопластической обработки, обеспечивающие получение хорошего сочетания пластичности и вязкости в интервале температур от 20 до -196°С.

Очень интересные, на мой взгляд, результаты получены при исследовании влияния содержания азота от 0,12 до 1,12% в Cr-Mn сталях на механические свойства и температуру вязко-хрупкого разрушения, а также при изучении взаимосвязи ЭДУ и температуры хладноломкости. Установлено значительное повышение предела текучести при 20°С и ударной вязкости при -196°С у стабильно аустенитных Cr-Mn сталей, содержащих 0,4 – 0,6%N и 5 – 8% Ni. Сталь с таким содержанием азота и никеля не испытывает хрупкого разрушения при снижении температуры от

20 до -253°C .

В третьей главе приведены экспериментальные данные по влиянию режимов термической обработки и пластической деформации на структуру и механические свойства сталей типа 06X21AG14H7M с содержанием азота около 0,6%. Для уменьшения дендритной ликвации и значительного повышения механических свойств литой стали диссертантом предложена термическая обработка, состоящая из гомогенизирующего отжига при 1200°C – 3 часа и последующей закалки от 1100°C . Показана возможность использования высокоазотистой стали типа 05X22AG15H8MФ для литых деталей криогенной техники. Убедительно доказана эффективность использования для нагруженных изделий криогенной техники стареющих ванадий-содержащих аустенитных сталей, у которых при охлаждении и пластической деформации не образуются ферромагнитные и охрупчивающие фазы. После закалки и старения формируется структура с нанодисперсными частицами VC или VN, равномерно распределенными по объему аустенитной матрицы. Значительное повышение уровня прочности и ударной вязкости при 20 и -253°C на изученных сталях достигается при объемной доле этих частиц около 0,5%.

В четвертой главе представлены результаты изучения циклической прочности, вязкости разрушения, особенностей усталостного разрушения, а также износостойкости и коррозионной стойкости высокоазотистых аустенитных Cr-Mn-Ni сталей и стареющих аустенитных Mn-Ni и Cr-Mn-Ni сталей, упрочняемых карбидами VC и нитридами VN.

Изучена циклическая прочность на примере стали 05X22AG15H8MФ с 0,55%N после горячей прокатки при 1100°C , закалки от 1150°C и закалки от 1150°C с последующим нагревом при 800°C в течение 1 и 10 ч. Показано, что максимальную долговечность и более высокий предел выносливости (400 МПа) имеют образцы, у которых в процессе прокатки при 1100°C формируется мелкозернистая аустенитная структура с большим количеством двойников и высокой плотностью дислокаций.

Убедительно установлено, что значительное повышение циклической прочности стареющих аустенитных сталей в результате выделения дисперсных (5 – 7 нм) матричных частиц VN и VC достигается при малом межчастичном расстоянии (0.05 – 0,1 мкм), что препятствует развитию локальной пластической деформации, необходимой для зарождения и роста усталостной трещины. Упрочнение стали за счет дисперсных карбидных или нитридных частиц дает основной вклад в повышение циклической прочности при комнатной температуре. При криогенных температурах сохраняется вклад дисперсионного твердения.

Показано, что достижение максимальной величины вязкости разрушения изученных сталей соответствует максимальному значению предела усталости. Для изученных сталей соблюдается линейная зависимость между K_{1C} и σ_{-1} . Вязкость разрушения при низких температурах и $\sigma_{0,2}$ связана между собой зависимостью с максимумом.

Результаты изучения износостойкости стали 05X22AG15H8MФ с 0,55%N показали, что наибольшей износостойкостью эта сталь обладает после закалки от 1100°C с отпуском при 800°C в течение 1 часа. Скорость износа существенно зависит от деформационного упрочнения высокоазотистого аустенита, а также образования мартенсита деформации в тонких поверхностных слоях и от наличия твёрдых частиц нитридов типа Cr₂N.

Впервые изучено влияние величины и знака поверхностных напряжений на скорость коррозии. Изучена коррозионная стойкость в водных растворах серной и соляной кислот для выпуклых и вогнутых сторон изогнутых холоднокатаных пластин из стали 05X22AG15H8MФ. Установлено, что на растянутой стороне пластины в течение 40 минут растворение идет быстрее ($3 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$), чем на сжатой ($2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$).

В пятой главе приведены результаты изучения технологичности при сварке, обработке резанием и высокотемпературной пластической деформации высокоазотистых аустенитных сталей на примере стали

05X22AG16H8M с 0,55% N. Установлена оптимальная температура нагрева под закалку 1100°C основного металла стали 05X22AG16H8M и 05X22AG15H8M2Ф. После такого режима закалки материал имеют аустенитную мелкозернистую структуру с небольшим количеством нитридов Cr₂N и оптимальное сочетание механических свойств.

Исследование структуры металла сварных швов стали 05X22AG16H8M показало, что ее структура неоднородная. У линии сплавления шва формируется ячеистая структура, в центральной части шва – дендритная или ячеисто-дендритная. Азот равномерно распределен в шве и зоне термического влияния. В металле шва поры отсутствуют и по сравнению с основным металлом в нем зафиксировано пониженное содержание азота, хрома и марганца.

Изучена обрабатываемость резанием аустенитных сталей с содержанием азота более 0,3%. На примере стали 05X22AG15H8MФ при точении без охлаждающей жидкости исследована структура поверхностных слоев заготовок. Показано, что в его поверхностном слое глубиной около 5 мкм формируется текстурованная структура, которая представляет собой полосы скольжения, ориентированные относительно движения резца. Плотность полос скольжения и твердость участков в этом слое увеличиваются в направлении движения резца. Под этим слоем расположен второй слой толщиной 5-20 мкм с мелкозернистой аустенитной структурой с большим количеством деформационных двойников и твердостью в 1,5-2 раза меньше по сравнению с первым слоем. Обоснованы оптимальные режимы при точении изученных сталей.

Результаты исследования высокотемпературной пластичности стали 05X22AG15H8MФ показывают, что изученная высокоазотистая сталь имеет низкое сопротивление пластической деформации, повышенные показатели пластичности и ударной вязкости в интервале температур 1100-1180°C. Пониженная пластичность и ударная вязкость при температурах ниже 1100°C

связана с выделением нитридов Cr_2N , а при температуре выше 1180°C - с ростом зерна аустенита и возможностью появления δ -феррита и σ -фазы.

В главе 6 сформулированы и обоснованы основные принципы легирования аустенитных сталей для тяжело нагруженных изделий криогенной техники. Для получения высокой прочности при комнатной температуре и вязкости при криогенных температурах химический состав Cr-Mn-Ni сталей должен обеспечивать:

- высокую растворимость азота в жидком металле (0,4 – 0,6%) и кристаллизацию без образования δ -феррита;
- стабильность аустенита по отношению к $\gamma \rightarrow \epsilon$ и $\gamma \rightarrow \alpha$ превращениям при охлаждении и пластической деформации;
- формирование ячеистой дислокационной структуры с ЭДУ 26 – 32 МДж/м² для сталей с 5 - 8% Ni, без образования карбидов M_{23}C_6 , при $\text{C/N} \leq 0,12$ и прерывистого распада при легировании V для изменения механизма прерывистого распада на непрерывный;
- для аустенитных стареющих Cr-Mn-Ni-V сталей с углеродом или азотом с повышенным уровнем прочности при 20°C и ударной вязкости при -253°C необходимо формирование в их структуре наночастиц (5-8 нм) VC или VN в количестве 0,4 – 0,6 об.%;
- комплексное легирование стареющих Cr-Mn-Ni-V сталей молибденом, что повышает дисперсность и равномерность распределения частиц VN или VC, а также ниобием за счет измельчения зерна нитридами ниобия.
- для аустенитных Cr-Mn-Ni сталей с твердорастворным упрочнением оптимальным содержанием является 0,5-0,6% N и 0,1-0,3% V, а для сталей с дисперсионным твердением наночастицами VN 0,3-0,4% N и 0,8 – 1,1% V;
- повышение прочности у высоконикелевых сплавов с низким коэффициентом теплового расширения (инваров) возможно при легировании их азотом, используя метод выплавки под давлением.

Замечания по работе:

1. При систематическом исследовании структуры и механических свойств

сплавов новой системы легирования Fe-Ni-N, убедительно подтверждена упрочняющая роль азота при испытании образцов на растяжение. Однако не понятна природа влияния азота на циклическую прочность – очень важный компонент требуемых механических свойств.

2. С целью создания экономнолегированной аустенитной коррозионно-стойкой в биоактивных средах высокопрочной стали в работе использовано комплексное легирование Cr-Mn-Ni сталей азотом, молибденом и медью. Не вызывает сомнения влияние азота и молибдена на повышение прочности стали, но не выяснена упрочняющая роль меди.

3. Диссертант подробно исследовал влияние режимов термической обработки на структуру и стойкость резцов только при продольном точении высокоазотистых Cr-Mn-Ni сталей. Не понятно, сохранятся ли полученные зависимости стойкости металлорежущего инструмента и режимы резания (скорости, подачи и глубины резания) при других видах резания-сверления, фрезерования и пр. Не изучено влияние температуры в зоне резания на износостойкость резцов при точении высокоазотистых аустенитных Cr-Mn-Ni сталей.

Сделанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. В ней получены важные результаты, имеющие очень большое научное и практическое значение.

Достоверность основных положений и результатов диссертации обеспечивается проверкой представленных результатов модельными экспериментами на тестовых и эталонных структурах с известными свойствами. Все значимые результаты опубликованы в рецензируемых журналах и докладывались на международных конференциях.

Диссертационная работа Е.В. Блинова является законченным квалификационным научным исследованием, полученные результаты актуальны и обладают существенной научной новизной. Судя по публикациям и тексту диссертации, соискатель является талантливым и высококвалифицированным ученым, внесший своими научными

результатами большой вклад в развитие исследования и разработки новых материалов для современной техники.

По значимости полученных результатов и уровню проведенных исследований диссертация Е.В. Блинова соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 № 842 предъявляемым к диссертациям на соискание степени доктора технических наук и соответствует паспорту специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Считаю, что Блинов Евгений Викторович выполнил глубокое материаловедческое исследование структуры и комплекса свойств азотистых аустенитных сталей и провел строгое научное обоснование ряда новых обнаруженных им явлений, связанных с формированием механических свойств изученных сталей. Он, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент:
доктор физ.-мат. наук (01.04.07), профессор,
главный научный сотрудник НИТУ «МИСиС»

Глезер Александр Маркович

119991 г. Москва, Ленинский проспект, 4,
кафедра физического материаловедения
ФГАОУ ВО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
8(916) 122-19-74
a.glezer@mail.ru

3.09.2018

Подпись Александра Марковича Глезера удостоверяю:

Проректор



И.М. ИСАЕВ