

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

СЕВАЛЬНЁВОЙ ТАТЬЯНЫ ГЕННАДЬЕВНЫ

«Особенности механического поведения высокопрочных сталей аустенитно-мартенситного класса в условиях статического и циклического деформирования», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 2.6.1 (05.16.01) – металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность работы

Стали аустенитно-мартенситного класса нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, поскольку наряду с повышенной коррозионной стойкостью обладают высоким уровнем механических характеристик. Стали этого класса применяются в том числе для изготовления компонентов различных узлов агрегатов несущей системы российских вертолетов.

Повышение требований проектантов к техническим характеристикам перспективных образцов современной техники обуславливает и повышение требований к материалу. Современные конструкционные материалы должны обладать целым комплексом высоких эксплуатационных характеристик, обеспечивать надежность и длительную работоспособность узлов и агрегатов, применяемых в сложных технических устройствах.

В этой связи интерес представляют стали так называемого переходного аустенитно-мартенситного класса, обладающие TRIP-эффектом. Такие стали наряду с высокой прочностью и коррозионной стойкостью обладают повышенной пластичностью, обусловленной протеканием процессов мартенситного превращения. Благодаря такому сочетанию свойств они могут применяться для изготовления силовых конструкций, работающих в условиях статического и вибрационного нагружения, в том числе с применением сварки для всеклиматических условий, упругих и упруго-чувствительных элементов, в трибоконтактах с возможностью эксплуатации в жестких условиях сухого трения (например, при выходе из строя системы смазки или возникновении перегрузок), в условиях ударно-волнового воздействия и других экстремальных условиях.

Однако TRIP-эффектом обладают не все стали, которые относятся к переходному аустенитно-мартенситному классу. Кроме того, высокие

прочностные характеристики для сталей данного класса могут достигаться как путем упрочняющей термической обработки, так и при воздействии интенсивной пластической деформации. При этом механизм образования мартенсита, реализуемой в конкретной марке стали и зависящий от ее химического состава и количественного содержания легирующих элементов, количественное содержание и распределение мартенсита в объеме полуфабриката будет иметь важное значения для возможности применения конкретной марки стали в конкретном узле агрегата.

В этой связи **актуальность** диссертационной работы Севальнёвой Т.Г., направленная на исследование механизмов формирования структуры и свойств высокопрочных сталей ВНС9-Ш и ВНС72-Ш, которые широко применяются в авиастроении, в условиях механического, контактного и триботехнического нагружения и разработка возможных способов повышения эксплуатационных характеристик этих сталей не вызывает сомнений.

Структура диссертации соответствует требованиям ВАК. Диссертационная работа Севальнёвой Т.Г. состоит из введения, пяти глав, выводов и приложения, содержащего акт внедрения результатов диссертационной работы. Работа изложена на 142 страницах, содержит 101 рисунок и 4 таблицы. Список литературы состоит из 127 наименований.

Введение содержит обоснование актуальности выбранной темы диссертационной работы, цели и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов; сформулированы основные положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации, публикациях.

В первой главе приведен анализ российской и зарубежной научно-технической литературы по теме исследования, в котором отражены аспекты влияния как самой системы легирования аустенитно-мартенситных сталей, так и содержания аустенито- и ферритообразующих легирующих элементов на процессы струкутрообразования стали и формирование уровня эксплуатационных свойств. Обозначены особенности выплавки сталей переходного аустенитно-мартенситного класса и области применения этих сталей в соответствии с реализуемым в них комплексом свойств.

На основании проведенного анализа определены ключевые направления исследований по теме диссертационной работы.

Во второй главе приведены сведения об исследуемых сталях переходного аустенитно-мартенситного класса (ВНС9-Ш и ВНС72-Ш), которые имеют разный механизм объемного упрочнения, представлены методы и методики ее исследований и испытаний, используемое оборудование.

В третьей главе приведены результаты исследований структурообразования сталей ВНС9-Ш и ВНС72-Ш с различным механизмом объемного упрочнения. В результате проведенного диссертантом металлографического анализа структуры различных полуфабрикатов из исследуемых сталей, а также при помощи дифференциальной сканирующей калориметрии для стали с ВНС72-Ш установлена зависимость количества образующегося мартенсита от режимов упрочняющей термической обработки.

Для стали ВНС9-Ш, обладающей TRIP-эффектом установлено, что формирование структуры при холодной прокатке и волочении сильно зависит от схемы деформации. При холодной прокатке формируется относительно равномерная мартенситная структура по объему листа, в то время после холодного волочения формируется градиентная аустенитно-мартенситная структура по сечению проволоки. При этом в зависимости от степени деформации формируется разное соотношение мартенсита и аустенита как у поверхности, проволоки, так и в объеме полуфабриката, что связано с реализацией различных механизмов превращения, происходящих по сечению полуфабриката при пластической деформации и последующем охлаждении.

Четвертая глава посвящена исследованию механического поведения исследуемых аустенитно-мартенситных сталей в условиях статического и циклического нагружения. Различие структур полуфабрикатов проволоки и листа, а также отличие механизма объемного упрочнения стали марки ВНС9-Ш от стали ВНС72-Ш приводит к различному поведению сталей при статическом растяжении. Для аустенитно-мартенситной стали ВНС72-Ш, в которой TRIP-эффект отсутствует установлено, что скорость испытания при растяжении в интервале 0,1-30 мм/с практически не влияет на уровень прочностных характеристик, фазовых превращений в структуре стали не происходит. В то время как для стали ВНС9-Ш, обладающей TRIP-эффектом, влияние скорости деформации на изменение упрочнения более выражено, особенно при содержании в стали большого количества (около 80%)

аустенита. Проволока с содержанием мартенсита 57% менее склонна к проявлению TRIP-эффекта из-за высокой степени деформации и соответствующей плотности дефектов. При этом деформация сопровождается возникновением полос Людерса-Чернова, что говорит о реализации инициированного деформацией мартенситного превращения.

Усталостные исследования показали, что сталь ВНС72-Ш обладает пределом усталостной выносливости на 100 МПа ниже, чем у стали ВНС9-Ш. Несмотря на высокое объемное содержание мартенсита в структуре стали (90% мартенсита), решающим фактором в формировании уровня усталостных характеристик является реализация превращения метастабильного аустенита в мартенсит при деформации, возникающей при знакопеременных нагрузках, в результате чего сталь ВНС9-Ш со структурой мартенсита деформации обладает высоким уровнем прочности и пластичности.

В пятой главе рассмотрены особенности поведения исследуемых сталей при трибонагружении в паре трения со сталью мартенситного класса, а также в условиях ударных нагрузок и контактной усталости.

Сравнительный анализ фрикционного взаимодействия исследуемых сталей со сталью ШХ-15 показал, что предпочтительнее для работы в паре трения использовать сталь с метастабильным аустенитом, обладающую TRIP-эффектом.

Проведенные исследования на контактную усталость образцов из стали ВНС9-Ш с TRIP-эффектом показали, что увеличение содержания мартенситной фазы с 0 до 14 об.% и 23 об.% в структуре не приводит к значительному изменению в интенсивности изнашивания в условиях сухого трения по стали ШХ15, тогда как в образцах с большим содержанием мартенсита (32 об. % и 50 об. %) интенсивность изнашивания уменьшается в 4 раза по сравнению с 100% аустенитной структурой. Наиболее благоприятное сочетание твердости, интенсивности изнашивания, коэффициента трения, длительности режима приработки и интенсивности изнашивания контртела наблюдается при наличии в структуре порядка 32 об.% мартенситной фазы. Также для этой стали установлено, что за счет повышения содержания мартенситной фазы в поверхностных слоях образцов можно значительно улучшать ее характеристики при контактно-усталостном нагружении.

Достоверность научных положений, результатов и выводов диссертационной работы обоснована комплексным применением современных методов и оборудования для исследования структуры и свойств материалов, согласованностью полученных результатов с литературными данными, а также апробацией результатов работы с получением положительных результатов.

Научная новизна и ценность работы не вызывает сомнений и состоит в том, что:

1) Впервые выявлен механизм формирования градиентной структуры у проволок из стали ВНС9-Ш при обжати и установлено, что формирование градиентной структуры связано с разогревом поверхностного слоя при механическом воздействии в ходе волочения до температур отпуска, в которых протекает обратное превращение $\alpha \rightarrow \gamma$.

2) Обнаружено, что увеличение скорости деформации при статическом растяжении проволок из стали ВНС9-Ш ведет сначала к снижению, а затем к росту прочностных характеристик, причем их критическое значение зависит от содержания мартенситной фазы. Такой эффект можно объяснить разной интенсивностью образования мартенсита деформации и более значительным выделением тепла при увеличении скорости деформирования.

3) Установлено, что после обработки давлением проведение отпуска при температурах до 500 °С для образцов из стали ВНС9-Ш, независимо от содержания мартенситной фазы, приводит сначала к плавному росту усталостной долговечности (примерно в два раза), а при дальнейшем увеличении температуры отпуска к уменьшению ниже исходных значений.

4) Обнаружено влияние объемного содержания мартенсита на износостойкость стали ВНС9-Ш в условиях сухого трения скольжения. Установлено, что при содержании мартенсита в структуре 0, 14 и 23% интенсивность изнашивания практически не изменяется и зависит от деформационного упрочнения поверхности за счет реализации TRIP-эффекта. Повышение содержания мартенсита до 32 и 50% дополнительно приводит к снижению интенсивности изнашивания за счет более плотного объемного распределения мартенсита деформации.

5) Впервые выявлены особенности механизма формирования контактной выносливости стали ВНС9-Ш в закаленном состоянии с твердостью 220 HV в зависимости от напряжения в зоне контакта. При уровне напряжений 3000 - 4000 МПа происходит пластическая деформация

сжатия (вдавливания) поверхности стали с образованием на ней слоя со структурой мартенсита деформации, толщина которого больше в боковых областях, чем в центральной зоне приложения нагрузки. В области контактных напряжений ≤ 2500 МПа наблюдается образование равномерного упрочненного поверхностного слоя со структурой мартенсита деформации, что приводит к существенному повышению контактной выносливости. В результате чего в этой области контактных напряжений предел контактной выносливости стали ВНС9-Ш с твердостью 220 HV на 550 МПа выше, чем у стали ВНС72-Ш с твердостью 520 HV.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что:

1. Показана возможность увеличения степени обжатия стали ВНС9-Ш с 45 до 86% при холодном волочении для обеспечения увеличения предела прочности с 2050 до 2800 МПа, предела текучести с 1400 до 1800 МПа, предела выносливости с 600 до 1250 МПа.

2. Показана перспективность использования стали ВНС9-Ш в качестве высокоизносостойкого материала, превосходящего эталонную сталь Гадфильда (110Г13Л).

3. Для повышения контактной выносливости предложена обработка поверхности изделий из стали ВНС9-Ш путем обкатки роликом. Происходящее при этом поверхностное микропластическое деформирование приводит к образованию поверхностного слоя толщиной $\approx 10-20$ мкм, с градиентной структурой распределения мартенсита от 7-15 об.% на поверхности до 0 об.% в основном объеме металла. При контактно-усталостном нагружении при напряжениях ≤ 2500 МПа такая обработка, повышая количество мартенсита на поверхности до 7-15 об%, увеличивает контактную выносливость стали ВНС9-Ш в 14 - 60 раз.

Диссертационная работа Севальнёвой Т.Г. представляет собой законченную цельную научно-исследовательскую работу. Основное содержание работы опубликовано в 20 печатных работах, из них 8 статей в журналах, рекомендованных перечнем ВАК, в том числе 6 публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science и Scopus.

Материалы диссертации представлены на высоком научно-техническом уровне. В автореферате и публикациях отражены основные положения, новизна и выводы диссертационной работы.

В качестве замечаний можно отметить следующее:

1. В работе приведены термограммы образцов из сталей ВНС9-Ш и ВНС72-Ш, полученные методом дифференциальной сканирующей калориметрии, без дополнительной обработки по всем энергетическим эффектам, происходящим при нагреве.

2. Исследование механизма формирования градиентного распределения структуры проведено только для проволоки $\varnothing 0,36$ мм из стали ВНС9-Ш. Интересно было бы провести аналогичные исследования для проволок других диаметров, в том числе с применением рентгенофазового анализа.

3. При получении листового проката деформация неравномерно протекает по толщине листа, что у сталей с метастабильным аустенитом вызывает неравномерное распределение мартенсита. Поэтому исследования влияния объемного содержания мартенсита на интенсивность изнашивания ВНС9-Ш в условиях сухого трения скольжения желательно дополнить исследованием суммарного влияния содержания мартенсита как во внутренних объемах образцов, так и вблизи поверхности.

4. При разработке режимов термической обработки с целью повышения пластических характеристик для последующего волочения в тексте диссертации упомянуто, что оптимальный режим должен обеспечивать полное растворение избыточных фаз. Однако, при выполнении диссертационной работы не было проведено исследований по составу, размеру и распределению частиц по объему полуфабриката. То же касается и исследований на усталостную долговечность. При анализе полученных данных упоминается о ее росте, обусловленном дисперсионным твердением, но за счет каких частиц не сказано.

5. Формулировка пунктов 3 и 4 положений, выносимых на защиту, могла бы быть более конкретной и отражать суть научных результатов диссертационной работы. Также можно отметить наличие в тексте диссертации грамматических ошибок и некорректных формулировок результатов проведенного анализа.

Указанные недостатки не снижают значимости работы.

Диссертация Севальнёвой Т.Г. является научно-квалифицированной работой, в которой на основании выполненных автором комплексных сравнительных исследований сталей аустенитно-мартенситного класса с различным механизмом упрочнения показана возможность увеличения

эксплуатационных характеристик исследуемых сталей за счет использования преимуществ их механизмов упрочнения. Разработаны рекомендации для оптимизации технологических процессов с целью обеспечения качества продукции из аустенитно-мартенситных сталей, а также высокого комплекса механических свойств.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 № 842 (в редакции от 26.09.2022, Постановление Правительства России от 26 сентября 2022 № 1690), а ее автор, Севальнёва Татьяна Геннадьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент



08.11.2022

Фомина Ольга Владимировна,

начальник научно-производственного комплекса «Организация и управление НИОКР, информатика и вычислительная техника, управление качеством и защита авторских прав» Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
доктор технических наук, специальность 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»,

Адрес: 191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49,
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
Телефон: +7 (921) 935-30-91
Email: oknir@crism.ru

Подпись Фоминой О.В. заверяю:

Начальник службы управления персоналом
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»



Е.А.Иванова