

Отзыв

официального оппонента д.т.н. Кудри Александра Викторовича
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 диссертационной работы Т.Г. Севальнёвой определяется большой востребованностью сталей переходного аустенитно-мартенситного класса в ряде отраслей промышленности, особенно авиакосмической и автомобильной. Такие стали наряду с высокой прочностью и коррозионной стойкостью обладают повышенной пластичностью, обусловленной протеканием процессов мартенситного превращения, сдвигообразования и двойникования, а у некоторых из них при пластическом деформировании проявляется трип-эффект. Из них изготавливаются ответственные узлы конструкций, упругих и упруго-чувствительных элементов, в трибоконтактах с возможностью эксплуатации в жестких условиях сухого трения, ударно-волнового воздействия и в качестве армирующих наполнителей для композиционных материалов. Работа Т.Г. Севальнёвой посвящена исследованию особенностей структурообразования и механического поведения высокопрочных сталей аустенитно-мартенситного класса ВНС9-Ш и ВНС72-Ш в условиях механического, контактного и триботехнического нагружения и разработка возможных способов повышения эксплуатационных характеристик этих сталей. Высокие прочностные характеристики для сталей данного класса могут достигаться как путем упрочняющей термической обработки, так и при воздействии интенсивной пластической деформации. Выбор благоприятного сочетания механизмов структурообразования сталей данного класса позволит улучшить эксплуатационные свойства и повысить ресурс изделий.

Структура работы

Работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка цитируемой литературы из 127 наименований. Объем диссертации составляет 142 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, представлены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе представлен аналитический обзор литературных данных (как отечественных, так и зарубежных) современных представлений, касающихся

разработки и применения аустенитно-мартенситных сталей для различных отраслей машиностроения. Особое внимание уделено влиянию системы легирования С-Cr-Ni-Mo этих сталей на формирование структурных составляющих в процессе термической обработки и влияние их на свойства. Особое внимание уделено отечественным высокопрочным сталям аустенитно-мартенситного класса ВНС43-Ш (18Х14Н4АМЗ-Ш) и ВНС65-Ш (18Х13Н4К4С2АМЗ-Ш), ВНС72-Ш (15Х15Н4ГАМ-Ш). Высокая степень легированности аустенитообразующими элементами способствует переходу сталей аустенитно-мартенситного класса в аустенитный класс. Рассмотрена также сталь аустенитно-мартенситного класса с трип-эффектом ВНС9-Ш, которая нашла широкое применение в виде ленты и проволоки в авиационной промышленности (высоконагруженные детали: пластины торсионов вертолётов, пластинчатые муфты привода основного винта вертолётов, проволочный торсион несущего винта вертолета и т.д). Показано, что исследования закономерностей поведения таких сталей и поиск оптимальных механизмов структурообразования для повышения сопротивления различным механическим воздействиям является одной из актуальных задач материаловедения.

Во второй главе описаны материалы – объекты исследования (аустенитно-мартенситные стали ВНС9-Ш и ВНС72-Ш) и методы, использованные для решения поставленных задач. Также описаны применяемые технологические процессы, оборудования, программные комплексы и методики.

В третьей главе приведены результаты исследований микроструктуры аустенитно-мартенситных сталей в состоянии поставки, а также после различных видов обработки. После закалки и последующего отпуска в структуре стали ВНС72-Ш содержалось от 50 до 65% мартенсита. После закалки с 1030 °С, обработки холодом при -75 °С и низкого отпуска в структуре стали содержалось от 75 до 90 % мартенсита. В стали ВНС9-Ш при холодной пластической деформации (волочении) метастабильный аустенит претерпевает превращение в мартенсит. для оценки степени упрочнения в зависимости от степени обжатия проводили измерения микротвердости на всех этапах волочения.

Формирование аустенита в поверхностном слое может происходить как во время закалки, так и во время отпуска при высоких температурах. Выявлено, что при отпуске стали ВНС9-Ш до температуры 400 °С увеличивается твердость, что связано с процессами дисперсионного твердения с выделением карбидов хрома $Cr_{23}C_6$. Начиная с температуры 500 °С происходит падение микротвердости проволоки, что объясняется процессом $\alpha \rightarrow \gamma$ перехода. С учетом того, что $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение обычно сопровождается выделением тепла, а масштаб превращений в метастабильном аустените достаточно велик из-за интенсивной пластической деформации

поверхностных слоев (оценено по результатам моделирования), можно предположить, что общий уровень температурного диапазона поверхностных слоев проволоки из стали ВНС9-Ш может достигать 500-700 °С. Этого достаточно для $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения и формирования аустенита в поверхностных слоях.

В четвертой главе изучены механические свойства аустенитно-мартенситных сталей ВНС9-Ш и ВНС72-Ш при статическом растяжении и в условиях циклического нагружения при повторных растягивающих нагрузках. Выявлено, что различие структур полуфабрикатов проволоки и листа, а также отличие механизма объемного упрочнения стали марки ВНС9-Ш от стали ВНС72-Ш приводит к различному поведению образцов при механическом нагружении. Упрочнение стали ВНС9-Ш происходит за счет холодной пластической деформации путем формирования мартенсита деформации, стали ВНС72-Ш - закалки, обработки холодом и низкого отпуска. Установлено, что при растяжении плоских образцов из стали ВНС9-Ш после холодной пластической деформации формируется пилообразный участок деформационного упрочнения, в то время как для образцов из стали ВНС72-Ш после термической обработки данный эффект отсутствует. Деформационное упрочнение в процессе растяжения в образцах из стали ВНС9-Ш практически отсутствует. С использованием метода корреляции цифровых изображений (КЦИ) на плоских образцах из сталей ВНС9-Ш и ВНС72-Ш установлено, что для стали ВНС9-Ш деформации локализуются в небольших областях с дальнейшим образованием полос Людерса-Чернова, а для стали ВНС72-Ш локализация деформаций происходит по классическому механизму в центре рабочей части образца.

Установлено, что для проволоки из стали ВНС9-Ш с объемным содержанием мартенсита 20% с увеличением скорости деформации с 0,1 мм/мин до 10 мм/мин пределы прочности и текучести снижаются с 1800 и 1400 МПа до 1700 и 1300 МПа соответственно, а при увеличении до 20 мм/мин – увеличиваются до 1980 и 1470 МПа, что свидетельствует о высокой чувствительности к протеканию деформации в процессе растяжения. Для проволоки с содержанием мартенсита 57% увеличение скорости до 1 мм/мин приводит к незначительному снижению пределов прочности и текучести с 2800 и 2080 МПа до 2750 и 2050 МПа. При дальнейшем росте скорости деформации происходит увеличение до 2870 и 2100 МПа, что свидетельствует о низкой чувствительности к скорости деформации и связано с наведенной высокой плотностью дефектов после волочения.

Для стали ВНС72-Ш изменение скорости деформации практически не приводит к изменению предела прочности и предела текучести из-за высокой стабильности остаточного аустенита, формируемого в структуре стали. Предел усталостной выносливости для

проволоки из стали ВНС9-Ш с объемным содержанием мартенсита 20 % мартенсита составил 600 МПа, а при 57% (в проволоке с \varnothing 0,36 мм) вдвое, выше - до 1250 МПа. При этом формирование аустенитной структуры в поверхностном слое этой проволоки уменьшает риск зарождения усталостной трещины. Обнаружено также, что листы из стали ВНС72-Ш, обладая высокими значениями предела прочности и предела текучести ($\sigma_b = 1700-1800$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1400-1600$ МПа), имеют предел усталости на 100 МПа ниже, чем у стали ВНС9-Ш, несмотря на высокое объемное содержание мартенсита (90% мартенсита). Это может быть связано с превращением метастабильного аустенита в мартенсит при деформации, возникающей при знакопеременных нагрузках в стали ВНС9-Ш. Выявлено также, что дисперсионное твердение после отпуска в интервале температур 400-500 °С в стали ВНС9-Ш, приводит к увеличению количества циклов до разрушения. Этот эффект в большей степени выражен для проволоки диаметром 0,36 мм в связи с высокой степенью обжатия, в результате чего реализуется также механизм деформационного твердения. Для проволоки с содержанием мартенсита 20% после отпуска 500 °С количество циклов до разрушения по сравнению с образцами без отпуска увеличилось в 2 раза, а для проволоки с содержанием мартенсита 57% - в 2,5 раза.

В пятой главе представлены данные о механическом поведении сталей ВНС9-Ш и ВНС72-Ш в условиях триботехнического нагружения и контактной усталости. Так, повышение степени пластической деформации при получении листов толщиной 1 мм из стали ВНС9-Ш, приводящее к увеличению объемного содержания мартенсита деформации в структуре до 32...50%, позволяет снизить интенсивность изнашивания в 4 раза. Установлено, что чем выше содержание мартенсита деформации в образце, тем выше интенсивность изнашивания контртела. Для аналогичных листов из стали ВНС72-Ш в состоянии поставки (после отжига) и после термической обработки показано, что применение термической обработки без обработки холодом позволило увеличить твердость с 360 до 440 НV и снизить интенсивность изнашивания образцов более чем в 2 раза по сравнению с образцами в состоянии поставки. Дополнительное применение обработки холодом позволило увеличить твердость до 520 НV и снизить интенсивность изнашивания в 2,5 раза по сравнению с состоянием поставки и на 15 % по сравнению с термической обработкой без обработки холодом. Показано, что для образцов стали ВНС72-Ш при трибоконтакте шариком из стали ШХ-15 интенсивность изнашивания составляет $2,2 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м, в то время как для образцов из стали ВНС9-Ш только $0,55 \cdot 10^{-4}$ мм³/Н·м, что в 4 раза ниже. Такая разница в интенсивностях изнашивания у стали ВНС9-Ш связана с эффектом самоупрочнения при трибонагружении – формирование

дополнительной мартенситной структуры в поверхностном слое. Проведены исследования сталей ВНС9-Ш и ВНС72-Ш в условиях контактно-усталостного нагружения, имитирующих работу подшипника качения.

Научная новизна диссертационной работы заключается в выявлении механизма формирования градиентной структуры у проволок из стали ВНС9-Ш при обжати, когда содержание мартенситной фазы во внутренних объемах существенно больше, чем в поверхностном слое (толщиной ≤ 50 мкм), в связи с его разогревом в ходе волочения до температур отпуска, в которых протекает обратное превращение $\alpha \rightarrow \gamma$. Обнаружено, что отпуск при ≈ 500 °С образцов из стали ВНС9-Ш после обработки давлением независимо от содержания мартенситной фазы повышает усталостную долговечность в ≈ 2 раза. Увеличение содержания мартенсита в структуре стали ВНС9-Ш до 32...50 % в условиях сухого трения скольжения снижает интенсивность изнашивания за счет более плотного объемного распределения мартенсита деформации. Впервые показано, что в стали ВНС9-Ш в закаленном состоянии (220 HV) при уровне напряжений 3000 - 4000 МПа в зоне контакта происходит пластическая деформация сжатия (вдавливания) поверхности стали с образованием слоя со структурой мартенсита деформации, толщина которого больше в боковых областях, чем в центральной зоне приложения нагрузки; при уровне ≤ 2500 МПа образование равномерного упроченного поверхностного слоя со структурой мартенсита деформации повышает предел контактной выносливости стали ВНС9-Ш (220 HV) на 550 МПа выше, чем у стали ВНС72-Ш (520 HV).

Практическая значимость работы заключается в разработке способа увеличения предела прочности стали ВНС9-Ш с 2050 до 2800 МПа, предела текучести с 1400 до 1800 МПа и предела выносливости с 600 до 1250 МПа путем увеличения содержания мартенситной фазы с 20 до 57 об. % за счет роста степени обжатия при холодном волочении с 45 до 86%. Показано, что для ряда назначения сталь ВНС9-Ш по износостойкости может превосходить сталь Гадфильда (110Г13Л). Установлено, что образование поверхностного слоя толщиной $\approx 10-20$ мкм с 7-15 об.% мартенсита на поверхности вследствие её микропластического деформирования при контактно-усталостном нагружении (при напряжениях ≤ 2500 МПа) увеличивает контактную выносливость стали ВНС9-Ш в 14 - 60 раз. Предложена термическая обработка ленты из стали ВНС72-Ш (закалка с 1030 °С, обработка холодом при -75 °С и отпуск 200 °С), которая приводит к формированию в структуре 75 об.% мартенсита, что повышает твердость $HV_{0,1}$ в 1,5 раза и снижает интенсивность изнашивания коэффициента сухого трения скольжения на установившемся участке соответственно в 2,5 и 1,5 раза. Полученные результаты были использованы ООО

«НПК «Спецсталь» для обеспечения качества продукции из аустенитных и аустенитно-мартенситных сталей.

Достоверность полученных результатов обусловлена комплексным применением современных методов и оборудования для исследования структуры и свойств материалов, проведением испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ и международных стандартов, систематическим характером проведенных исследований в рамках академических научных школ, согласованностью полученных результатов с литературными данными, а также апробацией результатов работы.

Основные результаты опубликованы в 20 работах, 8 в журналах, из перечня ВАК, 6 статей в переводных журналах, индексируемых в WoS и Scopus. Результаты апробированы на 8 всероссийских и международных научных конференциях.

Автореферат отражает содержание диссертационной работы

Однако работа не свободна от некоторых недостатков.

1. Низкая чувствительность образцов проволоки \varnothing 0,36 мм из стали ВНС9-Ш к протеканию трип-эффекта объясняется высокой плотностью дефектов в структуре, однако данные по плотности дефектов не приведены.
2. Указано, что повышение количества циклов до разрушения проволоки из стали ВНС9-Ш \varnothing 0,36 мм при усталостном нагружении происходит за счет упрочнения путем выделения мелкодисперсных карбидов хрома $Cr_{23}C_6$, однако данные по исследованию наличия частиц в структуре стали не приведены.
3. Повышение износостойкости в условиях сухого трения скольжения стали ВНС9-Ш объясняются деформационным упрочнением во время испытаний и распределением структурных составляющих. Целесообразно было бы провести оценку вклада деформационного упрочнения, связанного с трип-эффектом, путем проведения дополнительных экспериментов.
4. Обычно при оценке структурных факторов контактной выносливости рассматривается вклад неметаллических включений. Однако в настоящей работе эти вопросы не получили должного обсуждения.
5. Для ряда исследуемых микроструктур характерна неоднородность их строения, например, рис. 3 автореферата, было бы интересно оценить её количественно с целью выявления её влияния на свойства.
6. В практической значимости указано, что 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, однако не указано каким методом оценивалось микропластическое деформирование поверхности образцов.

Сделанные замечания нисколько не снижают научной значимости и практической ценности работы.

Считаю, что диссертационная работа Т.Г. Севальнёвой является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные решения, необходимые для разработки высокопрочных сталей аустенитно-мартенситного класса ВНС9-Ш и ВНС72-Ш с повышенным комплексом эксплуатационных характеристик, что существенно для развития ряда инновационных отраслей промышленности. Работа выполнена на высоком экспериментальном уровне, полученные результаты являются новыми и имеют научную и практическую значимость. Достоверность результатов не вызывает сомнений и подтверждается их согласованностью с литературными данными. Это позволяет утверждать, что обозначенные в работе цели и задачи исследования достигнуты, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны.

Диссертационная работа Т.Г. Севальнёвой полностью соответствует паспорту научной специальности 2.6.1 (05.16.01) – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов и всем требованиям п. 9 Положения ВАК о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, **Севальнёва Татьяна Геннадьевна**, заслуживает присуждения искомой степени по специальности 2.6.1 (05.16.01) – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Согласен на включение и дальнейшую обработку моих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного совета 24.1.078.01 (Д 002.060.01).

Официальный оппонент:

доктор технических наук,
профессор кафедры металловедения
и физики прочности

НИТУ «МИСиС», профессор _____ Кудря Александр Викторович

14.11.2022

Кудря Александр Викторович, «НИТУ «МИСиС», 119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 4., стр. 1, тел..(495)- 638-4686, e-mail: AVKudrya@misis.ru,

ПОДПИСЬ _____ ПРОВЕРЯЮ
Проректор по безопасности
и общим вопросам
НИТУ «МИСиС» _____ Д.М. Исаев

