

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, доцента Литовченко Игоря Юрьевича на диссертацию Скорыниной Полины Андреевны «Упрочнение и повышение износостойкости аустенитных хромоникелевых сталей наноструктурирующими фрикционными и комбинированными деформационно-термическими обработками», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение

Актуальность темы диссертации

Широкое распространение аустенитных хромоникелевых сталей в различных отраслях промышленности обусловлено, прежде всего, их высокими антикоррозионными свойствами и теплостойкостью. Однако стали данного класса характеризуются низкой твердостью и износостойкостью, а также низкими значениями предела текучести в закаленном состоянии, что значительно ограничивает области их применения. Перспективными методами упрочнения и повышения износостойкости стальных поверхностей являются обработки скользящими инденторами (фрикционная обработка и наноструктурирующее выглаживание). При этом важен научно-обоснованный подход к выбору технологических условий обработки, с учетом формируемого структурно-фазового состояния и характеристик, определяющих работоспособность поверхностных слоев изделий в условиях эксплуатации. В связи с вышесказанным, диссертационная работа Скорыниной П.А. является **актуальным** исследованием.

Достоверность и обоснованность положений и выводов диссертации не вызывает сомнений, поскольку они основаны на значительном объеме экспериментальных результатов, полученных с применением современных методов структурных исследований и механических испытаний, а также на взаимном дополнении результатов и согласованности с известными литературными данными.

Результаты диссертации опубликованы в 28 печатных работах, включая 14 статей в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 11 статей включены в базы данных цитирования Web of Science и Scopus, а также докладывались на российских и международных конференциях.

Характеристика структуры и содержания диссертации

Диссертация Скорыниной П.А. изложена на 197 страницах, состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, который включает 219 наименований, и 2-х приложений. Работа содержит 65 рисунков и 13 таблиц.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационного исследования, сформулированы цель, задачи исследования и положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе приведен обзор литературы по исследуемой теме.

Подробно представлены различные виды поверхностных деформационных обработок. Отдельное внимание уделяется обработкам скользящими инденторами. Рассмотрено влияние деформационного воздействия на фазовый состав, структуру, твердость и эксплуатационные свойства аустенитных хромоникелевых сталей. В конце главы приведена постановка задач исследования.

Во второй главе представлена информация о химическом составе исследуемых сталей, приведены технологические параметры деформационных и комбинированных обработок, рассмотрены методы исследования тонкой структуры, фазового состава, микромеханических характеристик и шероховатости формируемых поверхностей, подробно описаны методики поверхностного пластического деформирования, испытаний на износ и общую коррозию.

Третья глава посвящена влиянию фрикционной обработки на структурно-фазовое состояние и микромеханические характеристики аустенитных хромоникелевых сталей. Для стали 12X18H10T представлены результаты комплекса исследований, на основании которых проведен выбор технологических параметров фрикционной обработки по критериям одновременного эффективного деформационного упрочнения и достижения низкой шероховатости поверхности. Автор отмечает преимущества использования индентора из синтетического алмаза.

При исследовании влияния кратности фрикционного воздействия установлен близкий уровень микротвердости поверхности метастабильной стали 12X18H10T (710 HV 0,025 при $n=11$) и стабильной стали 03X16H15M3T1 (720 HV 0,025 при $n=7$). Показано, что основной вклад в упрочнение стали 03X16H15M3T1 вносит реализация зернограничного и дислокационного механизмов упрочнения аустенита, а в стали 12X18H10T дополнительный вклад вносит деформационное мартенситное превращение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что полнота протекания деформационного $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращения в поверхностном слое стали 12X18H10T в значительной степени зависит от кратности и температуры фрикционного нагружения. Уровень упрочнения возрастает с увеличением кратности фрикционного воздействия, однако мало зависит от температуры фрикционной обработки.

Рассмотрены последовательные процессы формирования субмикро- и нанокристаллических структур при фрикционной обработке аустенитных сталей.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния термического воздействия (отжиг, 2 ч) в интервале температур 100-900 °C на структуру, фазовый состав и микромеханические характеристики стали 12X18H10T, предварительно подвергнутой упрочняющей фрикционной обработке. Показано, что нагрев до 300 °C не приводит к заметным изменениям микротвердости и фазового состава поверхностного слоя исследуемой стали. При нагреве образцов до 400-450 °C микротвердость возрастает от 690 до 870-900 HV 0,025, а количество мартенсита деформации находится в пределах 60-

65 об.%. Дальнейшее повышение температуры нагрева приводит к развитию обратного $\alpha' \rightarrow \gamma$ -превращения ($\alpha' = 0$ об.% при 650 °С) и снижению микротвердости до уровня закаленной стали – 240 HV 0,025 (при 900 °С).

После отжига при 400-450 °С в поверхностном слое исследуемой стали сохраняются высокодисперсные мартенситно-аустенитные структуры, с выделением наноразмерных карбидов хрома Cr₂₃C₆. После отжига при 650 °С формируется полностью аустенитная структура с зернами преимущественно субмикро- и нанокристаллических размеров твердостью 630 HV 0,025. В структуре также наблюдаются карбиды Cr₂₃C₆.

На основании представленных в главе исследований предложены комбинированные деформационно-термические обработки метастабильной аустенитной стали, включающие наноструктурирующую фрикционную обработку и отжиги при температурах 400-450 и 650 °С.

Пятая глава посвящена исследованию трибологических и коррозионных свойств хромоникелевых аустенитных сталей, подвергнутых фрикционной обработке.

Показано, что фрикционная обработка привела к росту износостойкости аустенитных сталей 12X18H10T (в 4-10 раз) и 03X16H15M3T1 (в 4-70 раз) при испытаниях со смазкой, а также обеспечила снижение интенсивности изнашивания и коэффициента трения стали 12X18H10T при сухом трении скольжения. Это обусловлено ограничением процессов пластического оттеснения и схватывания на наноструктурированной поверхности, что обосновано результатами микроиндентирования.

Экспериментально установлено, что упрочняющая фрикционная обработка не снижает сопротивление общей коррозии сталей 12X18H10T и 03X16H15M3T1 по сравнению с механическим шлифованием.

Шестая глава посвящена промышленной реализации упрочнения поверхности заготовки из метастабильной аустенитной стали наноструктурирующим выглаживанием. На токарно-фрезерном центре реализована финишная обработка индентором из синтетического алмаза в воздушной среде заготовки типа «диск» из стали 04X17H10M2T, которая обеспечила получение упрочненного до 825 HV 0,025 наноструктурированного поверхностного слоя и формирование качественной поверхности с низким значением параметра шероховатости (Ra=120 нм).

В заключении приведены основные выводы по диссертационной работе и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

Научная новизна работы заключается в установленной последовательности формирования субмикро- и нанокристаллической структуры аустенита и мартенсита деформации при фрикционной обработке аустенитных сталей. Показано, что после фрикционной обработки уровень твердости поверхности деформационно стабильной стали 03X16H15M3T1 соответствует твердости метастабильной стали 12X18H10T (710-720 HV 0,025), на поверхности которой образуется 70 об.% мартенсита деформации. При фрикционной обработке стали 12X18H10T в интервале

температур от $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ показано, что полнота протекания деформационного мартенситного превращения в поверхностном слое определяется температурой фрикционного нагружения, при этом уровень твердости мало от нее зависит. Показана взаимосвязь достигнутого в результате фрикционной обработки роста износостойкости поверхности исследуемых аустенитных хромоникелевых сталей с установленной по данным микроиндентирования повышенной способностью упрочненных слоев сопротивляться пластической деформации при контактом механическом воздействии. Экспериментально установлено, что сформированные при фрикционной обработке в поверхностном слое метастабильной аустенитной стали нанокристаллические мартенситно-аустенитные структуры при нагреве до $400\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$ дополнительно упрочняются за счет выделения дисперсных карбидов хрома, а при нагреве до $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ трансформируются в высокопрочные преимущественно субмикро- и нанокристаллические структуры аустенита, которые сохраняются вплоть до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, образуя вместе с рекристаллизованными участками аустенита «бимодальные» структуры.

Теоретическая и практическая значимость заключается в том, что в работе выработаны научные подходы к поиску путей улучшения прочностных и трибологических свойств изделий из аустенитных хромоникелевых сталей. Определены технологические режимы финишной фрикционной обработки, которые обеспечили рост износостойкости поверхности сталей 12X18H10T и 03X16H15M3T1 до 70 раз, и не привели к потере их антикоррозионных свойств по сравнению с другой постобработкой – механическим шлифованием.

Предложены наноструктурирующие комбинированные деформационно-термические обработки метастабильной аустенитной стали, которые предусматривают проведение отжига после фрикционной обработки. После отжига при $400\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$ формируется мартенситно-аустенитная структура твердостью 900 HV 0,025, а после отжига при $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ – аустенитная структура твердостью 630 HV 0,025.

Полученные в работе результаты были использованы при реализации промышленной технологии наноструктурирующего выглаживания на многофункциональном обрабатывающем центре на предприятии ООО «Предприятие «Сенсор» (г. Курган). Металлофизические и технологические аспекты обработки аустенитных сталей скользящим индентором были использованы для формирования упрочненного наноструктурированного слоя на поверхности детали из аустенитной стали 04X17H10M2T, что отражено в акте о практическом применении результатов диссертационной работы.

Вопросы и замечания по работе:

1. Почему для стали 12X18H10T в качестве термообработки после фрикционного воздействия выбраны отжиги в вакууме с последующим медленным охлаждением? Вероятно, именно медленное охлаждение является причиной выделения значительного количества карбидов M_{23}C_6 в сильнодеформированном поверхностном слое. Почему трибологические и коррозионные испытания не проводились на образцах после фрикционного

воздействия и отжигов? Карбиды в поверхностном слое должны оказывать значительное влияние на эти характеристики.

2. Почему исследования методом рентгеноструктурного анализа проводились в прямом, а не в скользящем пучке? Поверхностные обработки модифицируют структуру и изменяют фазовый состав тонкого поверхностного слоя. Для более точного определения соотношения фаз (α/γ) такие исследования должны проводиться в скользящем пучке.

3. Известно, что в метастабильной аустенитной стали 12X18H10T в условиях низкотемпературной деформации может формироваться ε -мартенсит как промежуточная фаза при γ - ε - α' превращении. На рисунке 3.20 видны дополнительные рефлексы помимо α' -мартенсита и характерные тяжи, которые могут быть вызваны тонкими пластинками ε -мартенсита. Также видны рефлексы, которые, вероятно, принадлежат карбидам. При этом обсуждается только наличие аустенита и мартенсита. Кроме того, в этой стали в условиях высокотемпературных отжигов могут формироваться карбиды TiC. Этот вопрос также не обсуждается.

4. При исследовании деформационно стабильной стали автор не наблюдает деформационных двойников. Однако есть множество работ, посвященных исследованию больших пластических деформаций этой, или аналогичных стабильных сталей, где показана значительная роль механического двойникования во фрагментации микроструктуры. При этом двойники формируются преимущественно в плоскостях параллельных плоскости прокатки, или плоскости наковальни (в случае кручения под давлением). Маловероятно, чтобы в случае поверхностной фрикционной деформации двойникование отсутствовало. Слоистые микроструктуры, сформированные с участием микродвойников не видны в сечении, параллельном обрабатываемой поверхности.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Скорыниной П.А. и не снижают ее научную и практическую значимость.

Общее заключение

Диссертация Скорыниной Полины Андреевны на тему «Упрочнение и повышение износостойкости аустенитных хромоникелевых сталей наноструктурирующими фрикционными и комбинированными деформационно-термическими обработками», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. В работе успешно решены важные научные и практические задачи, получены результаты, обладающие новизной. Текст диссертации характеризуется грамотно выстроенной последовательностью изложения результатов исследований.

Диссертация и автореферат соответствуют пунктам Паспорта специальности 2.6.17. Материаловедение: 4. «Разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования новых металлических,

неметаллических и композиционных материалов, обладающих уникальными функциональными, физикомеханическими, биомедицинскими, эксплуатационными и технологическими свойствами, оптимальной себестоимостью и экологической чистотой»; 6. «Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий». Автореферат полностью соответствует тексту диссертации и отражает ее содержание.

По результатам диссертационного исследования автором опубликовано достаточное количество научных работ. Считаю, что диссертация удовлетворяет требованиям п.9-14 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор, Скорынина Полина Андреевна, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики прочности
и материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Томск,
ведущий научный сотрудник лаборатории
материаловедения сплавов с памятью формы
Литовченко Игорь Юрьевич

Контактная информация:

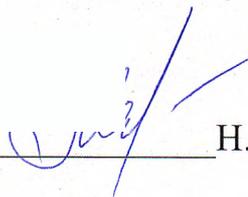
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики
прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии
наук
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4
E-mail: litovchenko@ispms.ru

«31» января 2025 г.

 И.Ю. Литовченко

Подпись Литовченко И.Ю. заверяю:
ученый секретарь ИФПМ СО РАН



 Н.Ю. Матолыгина