

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук,

Калинина Григория Юрьевича

на диссертацию Шараповой Валентины Анатольевны

на тему: «Научно обоснованные технологические решения упрочнения и повышения износостойкости машиностроительных материалов за счет ТРИП-эффекта в структуре метастабильного аустенита»

по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук

1. Актуальность избранной темы диссертации

Масштабно изучены закономерности формирования метастабильных структурных состояний новых и широко применяемых в промышленности машиностроительных материалов. Путь создания материалов с метастабильной структурой, среди основателей которого видную роль сыграли уральские исследователи В. Д. Садовский и И. Н. Богачёв, является одним из наиболее перспективных для существенного повышения важнейших физико-механических свойств сталей и чугунов за счет формирования в металлической основе структурных составляющих, способных к интенсивному деформационному упрочнению в результате фазовых и структурных превращений под действием контактного нагружения, и прежде всего абразивной износостойкости. Метастабильные стали и чугуны получают всё большее развитие, однако поведение метастабильных структур при различных условиях изнашивания и методы регулирования кинетики деформационных фазовых и структурных превращений и способы их термической обработки изучены недостаточно. Несомненную актуальность работе в научном плане придаёт изучение закономерностей формирования в поверхностных слоях нанокристаллической структуры мартенсита трения с размерами кристаллитов до 100 нм, возникающей при абразивном изнашивании. Проявление в структуре высокоуглеродистых сплавов железа ТРИП-эффекта играет важную роль в формировании их трибологических свойств поверхности. Поэтому актуальность темы диссертационной работы, направленной на изучение влияния исходной структуры и ТРИП-эффекта в процессе изнашивания углеродистых сталей и чугунов, в научном и прикладном отношении, не вызывает сомнения.

2. Структура и содержание диссертационной работы

Для диссертационной работы характерны самостоятельный подход к сбору и анализу эмпирических данных. Структура работы логична, соответствует целям и задачам исследования. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, библиографического списка и приложения. Работа изложена на 252 страницах, содержит 110 рисунков, 14 таблиц, 5 формул и библиографический список из 205 источников, имеется 1 приложение на 4 страницах.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определены цели исследования, научная новизна и практическая ценность работы. В первой главе приведены химический состав, режимы выплавки и термической обработки сплавов.

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА	
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»	
за №	
Дата регистрации	05.05.2025
Фамилия регистратора	

Во второй главе рассмотрены преимущества структуры метастабильного аустенита в мартенситностареющих ТРИП-сталях специального назначения, а также механизмы ДПМ и релаксации напряжений.

В третьей главе представлены полученные впервые результаты изучения влияния температуры закалки в широком интервале температур для формирования диссипативной структуры со способностью к реализации ТРИП-эффекта в сталях перлитного класса (70X2ГСМЛ и 150ХНМЛ), в сравнении с серийными сталями ледебуритного класса (95X18 и X12МФЛ).

В четвертой главе: было изучено влияние широкого диапазона температурных условий закалки, их влияние на количество остаточного аустенита, его устойчивость при рабочих температурах, степень метастабильности в условиях деформационных нагрузок, а также износостойкость углеродистых высокомарганцевой и высокохромистой сталей, и что представляет особый интерес – перспективной практически безуглеродистой сверхравновесно-азотистой стали аустенитного класса.

В пятой главе впервые изложены результаты решения задачи изучения фазовых превращений и изменения ударной вязкости, твердости и абразивной износостойкости графитизированной стали 135СГЛ, с целью разработки обоснованных режимов термической обработки, обеспечивающих максимальную абразивную износостойкость.

В шестой главе впервые изучены возможности повышения абразивной износостойкости экономно легированного чугуна типа нихард 300X2Н4 повышением температуры закалки для получения метастабильного остаточного аустенита на рабочей поверхности с образованием мартенсита деформации в процессе эксплуатации деталей в сравнении с чугунами 250X16М2 и 250X25МФТ.

В седьмой главе: для интерпретации экспериментальных данных по сопротивлению абразивному изнашиванию описано применение математической обработки статистическими методами. Полученные уравнения позволяют использовать микротвердость рабочей поверхности, как критерий повышения абразивной износостойкости, прогнозировать и задавать поведение сплава при абразивном изнашивании с учетом коэффициентов в уравнении зависимости $HV_{50изн}$ от химического состава, а также соотношения мартенсита и остаточного аустенита после высокотемпературной закалки.

В восьмой главе описаны возможное использование результатов и опыт их практического применения. Отработана технология объемной и поверхностной высокотемпературной закалки и обработки холодом для формирования самотрансформируемого в процессе изнашивания слоя рабочей поверхности.

В заключении исследования диссертант формулирует основные обобщающие выводы. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, логичны, последовательны и основательны, зиждутся на анализе и научно-теоретической интерпретации солидного, обширного эксперимента, проверенного промышленной практикой, что подтверждается актами промышленных предприятий г. Екатеринбурга и г. Казани.

3. Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

На основе использования результатов запатентована аустенитная ТРИП-сталь 03X14H11K5M2ЮТ гарантированной сверхвязкости, которая в закаленном от 1050 °С состоянии имеет высокую ударную вязкость, конструкционную прочность и низкую склонность к хрупкому разрушению вплоть до криогенных температур ($KCV^{20} = 3,69$ МДж/м², $KCV^{-196} = 1,93$ МДж/м²). Указанная сталь имеет рекордную пластичность: подвергается волочению с диаметра 14,3 до 2,77 мм, то есть за 15 переходов «в холодную» без промежуточных нагревов. С другой стороны, значительно упрочняется: после деформации и старения стальная проволока диаметром 0,3 мм имеет $\sigma_B = 2520$ МПа, $\sigma_{0,2} = 2120$ МПа при поперечном сужении $\psi = 40$ %.

Доказано, что аустенит в стали 03X14H11K5M2ЮТ является термически стабильным в широком интервале температур от жидкого гелия до 500 °С. Предложена обработка (по режиму закалка 1050 °С + деформация + старение 500 °С, 1 ч), при которой сталь в состоянии максимального упрочнения обладает высоким сопротивлением релаксации напряжений при длительных нагревах до температуры 400 °С, что подтверждено актом внедрения от ООО «Медтехника», г. Казань.

Впервые экспериментально установлена роль влияния легирования кобальтом (5,0 ~ 1,0 мас. %) на изменение последовательности, состава и температурных интервалов выделения высокотемпературной χ -фазы в закаленной стали 03X14H11K5M2ЮТ.

Впервые экспериментально с применением электронной микроскопии на закаленных сталях перлитного и ледебуритного классов показано, что благодаря высокотемпературной закалке рабочей поверхности уже после первого однократного фрикционного воздействия образуется деформационный нанокристаллический высокоуглеродистый мартенсит с размером кристаллов 10 – 100 нм. В структуре чередуются кристаллы мартенсита, стойкого против абразивного изнашивания, и аустенита, склонного к фрикционному упрочнению. Вторичная диссипативная структура поверхности обладает способностью к релаксации напряжений в процессе $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, сопровождающегося ТРИП-эффектом, впервые показанным в высокоуглеродистой стали.

Комплексными исследованиями с применением профилометрии на примере сталей 0X18A1.2, 100X18, 135СГЛ было выявлено, что после низкотемпературной закалки отделение частиц износа происходит со вдвое большего по глубине слоя поверхности, чем после высокотемпературной закалки. В результате абразивная износостойкость поверхности снижается, т.к. механизм царапания сменяется микрорезанием, что подтверждается увеличением параметров шероховатости.

Впервые экспериментально установлена и научно обоснована роль высокотемпературной закалки в масло экономно легированного чугуна типа нихард (300X2H4), а также износостойких хромистых чугунов (260X16M2 и 250X25МФТ). Износостойкие хромистые чугуны – 260X16M2 и 250X25МФТ – отличаются разным типом карбидного упрочнения – M_7C_3 и $M_{23}C_6$. Закалка в масло и при обдувке воздухом образцов чугуна 260X16M2 сечением до 30 мм, в интервале температур от 1125 – 1170 °С, а также высокий отпуск 550 °С дают пониженную исходную твердость до испытания, но формируют резервы в структуре для последующего образования самотрансформируемого слоя высокой микротвердости на рабочей поверхности в результате развития деформационного мартенситного превращения. По технологическим и экономическим соображениям чугун 260X16M2 рекомендован для изготовления лопаток дробебетных

аппаратов и износостойких вставок биметаллических втулок грязевых насосов. Обработанные по предложенной технологии детали показали хорошую эксплуатационную стойкость: на 25% выше стали X12МФЛ.

Описана количественная зависимость $f(\Delta\varepsilon) = 2,1e^{-0,05\alpha}$ между фазовым составом после высокотемпературной закалки и способностью к упрочнению поверхности сталей и хромистых чугунов со структурой метастабильного аустенита, заключающаяся в оценке скорости прироста относительной износостойкости при испытании поверхности на абразивное изнашивание.

4. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается достаточным количеством наблюдений, современными методами исследования, которые соответствуют цели работы и поставленным задачам. Сформулированные в тексте диссертации научные положения, выводы и практические рекомендации основаны на фактических данных, продемонстрированных в приведенных таблицах и рисунках. Статистический анализ и интерпретация полученных результатов проведены с использованием современных методов обработки информации и статистического анализа и не противоречат публикациям в авторитетных изданиях.

Основные результаты исследования доложены и обсуждены на 14 международных и всероссийских конференциях. По теме диссертации получено два патента РФ на изобретения и опубликовано 35 печатных работ, из них 11 – в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования основных результатов диссертаций.

Диссертационное исследование логично структурировано, имеет внутреннее единство и научную новизну. Полученные результаты корректно используются для обоснования выводов и рекомендаций. Выводы диссертационного исследования согласуются с основным содержанием работы и с поставленными задачами. Автором тщательно изучены и критически проанализированы существующие отечественные и зарубежные достижения в применении ТРИП-эффекта. Список использованной в работе литературы насчитывает 205 наименований, включая англоязычные источники. В работе достаточно корректно использованы как традиционные общенаучные методы научного познания: анализ, синтез, индукция, дедукция, так и специальные методы статистической обработки данных. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соответствием полученных результатов основным общепринятым положениям металловедения, проведением широкого эксперимента и фактической проверкой на производственных предприятиях Медтехника, Уралмаш НГО Холдинг и УЗТЕРМО.

5. Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Диссертационная работа Шараповой В.А. обладает новизной и представляет собой интересное, самостоятельное и достаточно ценное по своей научной и теоретической значимости исследование. В результате исследования впервые показано, что весь аустенит в новой МАС 03X14N11K5M2IOT является деформационно-метастабильным. Разработана технология производства проволоки для изделий тонких сечений холодным волочением ТРИП-стали без промежуточных отжигов. Впервые

экспериментально с применением электронной микроскопии на закаленных сталях перлитного и ледебуритного класса показана реализация ТРИП-эффекта после первого однократного фрикционного воздействия на рабочую поверхность высокоуглеродистого сплава со структурой метастабильного аустенита. Комплексными исследованиями было выявлено, что после высокотемпературной закалки поверхности на структуру метастабильного аустенита механизм микрорезания сменяется царапанием при абразивном изнашивании. Отработаны режимы термической обработки для формирования самотрансформирующегося в процессе изнашивания слоя рабочей поверхности для сталей аустенитного, перлитного, ледебуритного класса и высокохромистых чугунов. Даны рекомендации по закалке деталей из износостойких хромистых чугунов сечением до 30 мм для изготовления лопаток дробебетных аппаратов и износостойких вставок биметаллических втулок грязевых насосов.

6. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Возможность троекратного повышения износостойкости деталей за счет термической обработки, позволяющей реализовать ТРИП-эффект в процессе эксплуатации поверхности деталей в условиях абразивного изнашивания. Разработанные технологические решения являются весьма перспективными применительно к серийным широко используемым машиностроительным материалам (втулки и крышки буровых и водоотливных насосов). По завершении ТВЧ-закалки распределение напряжений в сечении втулки характеризуется сжимающими напряжениями на внутренней поверхности втулки и растягивающими напряжениями у внешней поверхности втулки. Образование сжимающих напряжений – дополнительный фактор в пользу повышения эксплуатационной стойкости за счет деформационного мартенситного превращения и ТРИП-эффекта на рабочей поверхности втулки, как метода повышения долговечности деталей и машин. Промышленные испытания опытной партии втулок буровых насосов из стали X12MФЛ в климатических условиях региона ЯНАО показали, что втулки, которые были термообработаны по разработанному режиму: высокотемпературная ТВЧ-закалка с обдувом сжатым воздухом и последующим низким отпусканием, показали высокую эксплуатационную стойкость – отработали более 960 часов и были ещё в работоспособном состоянии, таким образом в 1,8 раза превысив эксплуатационный срок серийной партии втулок из чугуна ИЧХ20М в тех же условиях.

7. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, мнение о научной работе соискателя в целом

7.1. Вопрос по главе 2: поскольку упругие элементы изготавливают путем навивки, резки, вырубки проволоки или ленты, обязательным этапом технологического процесса становится деформационная обработка материала для получения заготовок нужных размеров. При производстве проволоки тонких диаметров не возникает технологических проблем, поскольку волочение обеспечивает и деформационное упрочнение стали, и получение требуемого диаметра. Для изготовления проволочных заготовок средних и больших диаметров (4,0 – 6,0 мм) из метастабильных

аустенитных сталей необходим иной подход, заключающийся в упрочнении заготовки без существенного изменения размеров поперечного сечения. Можно ли использовать разработанную сталь с точки зрения указанного подхода?

7.2. Как отмечает автор, с увеличением температуры нагрева под закалку от 900 до 1170 °С количество остаточного аустенита в исследованных сталях растет практически от 0 до 95 %, что должно сопровождаться монотонным возрастанием сопротивления износу при выбранных условиях изнашивания. Однако на рис. 3.3 (стр. 99 диссертации) при увеличении нагрева от 1050 до 1170 °С относительная износостойкость практически не изменяется. С чем это связано?

7.3. С повышением температуры закалки у исследуемых сталей выше 1050 °С помимо увеличения количества остаточного аустенита происходит и увеличение исходного зерна самого аустенита (рис. 3.5, стр. 102; рис. 3.10, стр. 112), что должно сопровождаться снижением сопротивления пластической деформации. Поэтому, как показано в работах Ю. А. Геллера, не может быть одинаковой оценка влияния на износостойкость без учёта влияния величины напряжений, возникающих при эксплуатации.

7.4. Автор отмечает (стр. 119 диссертации, табл. 3.1), что с увеличением температуры нагрева под закалку в исследованном интервале температур происходит монотонное снижение температуры начала мартенситного превращения M_n для всех изученных сплавов, причём для сталей 95X18 и 0X18A1.2 практически до нуля. Как были использованы полученные результаты в контексте темы диссертации?

7.5. Вопрос по главе 3: «Увеличение температуры нагрева вызывает постепенное растворение вторичных карбидов M_7C_3 в стали X12МФЛ и $M_{23}C_6$ в стали 95X18 (стр. 120). Это приводит к увеличению γ -фазы в стали X12МФЛ от 0 до 60 % и в стали 95X18 от 0 до 95 % при температурах закалки 900 °С и 1170 °С соответственно (таблица 3.1)». Справедливо ли утверждать, что при нагреве до 1170 °С в аустените полностью растворяются специальные карбиды?

7.6. Вопрос по главе 4: «При значительном повышении температуры нагрева под закалку происходит обезуглероживание поверхности деталей». Не ограничит ли это возможности их широкого применения? Какова логическая связка между главами 3 и 4?

7.7. Зачем надо было организовывать такую сложную технологию обработки сталей ($T_{\text{зак.}} = 1170 \text{ °С} \rightarrow \text{масло} \rightarrow \text{обработка холодом при } -70 \text{ °С}$), когда требуемую структуру можно было получить только за счёт выбора температуры нагрева под закалку?

7.8. В чём цель проведения отпуска после закалки от 1000 и 1170 °С? Эту операцию следует рассматривать как отмену обработки холодом или автор преследовал какие-то другие цели, которые следует изложить при ответе на этот вопрос.

7.9. Замечание по главе 8: нет понимания целесообразности выделения этого материала в отдельную главу, подраздел 8.2 диссертации не раскрывает суть заявленных притязаний автора.

Отдавая себе отчет в том, что учёт всех особенностей формирования и поведения гетерофазной дисперсной структуры с метастабильным аустенитом, обеспечивающей высокий комплекс механических свойств, является весьма сложной задачей, считаем, что приведённые выше замечания по диссертации следует рассматривать

как направления совершенствования исследуемых классов сталей и методов их обработки и испытаний по пути более полного соответствия реальным ситуациям фазовых и структурных превращений и фрикционного упрочнения в присутствии метастабильного аустенита.

Изучение материалов диссертации, автореферата и опубликованных автором работ позволяет сделать вывод о том, что исследование проведено соискателем самостоятельно, на высоком научном и профессиональном уровне, с использованием современных методов научных исследований, обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты, выдвигаемые на публичную защиту.

Опубликованные работы в достаточной степени отражают содержание и основные результаты, полученные автором диссертационной работы. Автореферат полностью соответствует диссертации.

8. Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным положением о присуждении ученых степеней

В диссертации решена актуальная научно-техническая проблема формирования в материалах различных структурных классов гетерофазной структуры с диссипативными составляющими (от 20 до 100%) и ее применения для улучшения технологичности при производстве изделий тонких сечений и абразивной износостойкости в процессе эксплуатации изделий из широко применяемых машиностроительных материалов.

По актуальности, объему выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости результатов диссертация на тему «Научно обоснованные технологические решения упрочнения и повышения износостойкости машиностроительных материалов за счет ТРИП-эффекта в структуре метастабильного аустенита» соответствует паспорту научной специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов, а именно:

п. 3 «Теоретические и экспериментальные исследования влияния разнородных структур, в том числе кооперативного, на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов, их моделирование и прогнозирование»;

п. 6 «Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химико-термической, термомеханической и других видов обработок, связанных с термическим или термомеханическим воздействием, цифровизация и автоматизация процессов, а также разработка информационных технологий систем сквозного управления технологическим циклом, специализированного оборудования; изучение взаимодействия металлов и сплавов с внешними средами в условиях работы различных технических устройств, оценка и прогнозирование на этой основе работоспособности металлов и сплавов»;

п. 8 «Исследование работоспособности металлов и сплавов в различных условиях, выбор и рекомендация наиболее экономичных и надежных металлических материалов для конкретных технических назначений с целью сокращения металлоемкости, увеличения ресурса работы, повышения уровня заданных физических и химических характеристик деталей машин, механизмов, приборов и конструкций».

Таким образом, диссертация Шараповой Валентины Анатольевны на тему: «Научно обоснованные технологические решения упрочнения и повышения износостойкости машиностроительных материалов за счет ТРИП-эффекта в структуре метастабильного аустенита», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, заключающиеся в разработке научных основ применения ТРИП-эффекта для упрочнения (до пятикратного для изделий тонких сечений) и повышения (на 20 % и более) абразивной износостойкости металлоемких деталей, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие машиностроительной и металлургической отраслей страны.

Диссертация соответствует критериям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Шарапова Валентина Анатольевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент:

Начальник лаборатории научно-производственного комплекса №3
федерального государственного унитарного предприятия "Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей" имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"
доктор техн. наук, доцент



Калинин Григорий Юрьевич
«29» апреля 2025 г.

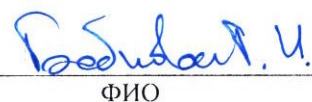
Специальность: 05.16.09. Металловедение (металлургия).

Согласен на обработку персональных данных и включение их в аттестационное дело В.А. Шараповой.

191015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49. Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей" имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра "Курчатовский институт". Тел.: /812/ 274-18-22.

E-mail: nrk3@crism.ru

Подпись Калинина Григория Юрьевича заверяю.


подпись
ФИО