

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
проблем сверхпластичности металлов
Российской академии наук, д.т.н.

Р.М. Имаев

2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о научно-практической ценности диссертации
Шараповой Валентины Анатольевны

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

на соискание ученой степени доктора технических наук

по специальности: 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

1. Актуальность избранной темы.

В соответствии с перечнем важнейших наукоемких технологий Российской Федерации (утвержден Указом Президента от 18 июня 2024 г. № 529), вопросам технологии создания новых материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками в настоящее время уделяется особое внимание. В связи с этим поставленная в диссертационном исследовании цель – в процессе эксплуатации обеспечить повышение на 20% ресурса износостойкости и эксплуатационной надёжности деталей и узлов машин из серийных (в том числе экономно легированных) высокоуглеродистых сплавов за счет микро-ТРИП-эффекта в структуре метастабильного аустенита поверхности после высокотемпературной закалки – не теряет своей значимости в вопросах создания и качественного улучшения свойств и служебных характеристик материалов.

В настоящее время высокопрочные коррозионностойкие стали для различных областей применения и условий эксплуатации, должны обладать повышенной надёжностью, теплостойкостью, конструкционной прочностью и отсутствием формоизменений в процессе эксплуатации. Использование коррозионностойких хромоникелевых сталей и чугунов, а также сталей перлитного и ледебуритного классов ограничивается низкими значениями релаксационной стойкости, а также низкой технологичностью. Аустенитная ТРИП-сталь 03X14N11K5M2ЮТ – материал, удовлетворяющий вышеперечисленным требованиям, в связи с особенностями ее легирования, обладающая высокой технологичностью, позволяющий проведение интенсивной холодной пластической деформации для формирования высокопрочного состояния. В связи с этим проблема, решаемая диссертантом по оценке возможности реализации ТРИП-эффекта в серийных широко применяемых высокоуглеродистых сталях и хромистых чугунах, как и во многокомпонентных высоколегированных сталях типа 03X14N11K5M2ЮТ, является весьма актуальной.

2. Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Во введении четко обоснована актуальность темы, поставлена цель и задачи диссертационной работы.

Поставленная цель и задачи исследования успешно реализованы автором в восьми главах диссертации. В каждой из них содержится материал, обладающий новизной по теме исследования. Современные публикации в высокорейтинговых изданиях показывают, что направления

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА
ОГБОУ ВО «ИПТ» ИМ. Г.И. КОСОВА

за № _____
Дата регистрации 28.04.2025
Фамилия регистратора _____

дальнейших исследований ТРИП-сталей лежат в области их адаптации к условиям реального металлургического производства и к специфическим условиям эксплуатации различных металлоизделий. Формирование многофазной структуры вызывает перераспределение напряжений между фазами при деформации, в работе преимущества ТРИП-сталей реализованы в поверхностном слое высокоуглеродистых сталей и хромистых чугунов для повышения их сопротивления абразивному изнашиванию.

3. Значимость для науки и производства (практики) полученных автором диссертации результатов.

Научная новизна и практическая значимость хорошо изложены в диссертации и автореферате и потому представляется излишним их повторение в отзыве. Хотелось бы лишь подчеркнуть, что представленные в диссертационной работе исследования метастабильных аустенитных сталей являются, по сути, визитной карточкой кафедры металловедения УрФУ в научном сообществе. Их результаты имеют бесспорную практическую ценность, заключающуюся в том, что определены режимы термопластической обработки, обеспечивающие высокие эксплуатационные свойства, подтверждена технологическая воспроизводимость свойств. Выявлено, что стали с пониженным содержанием кобальта обладают несколько меньшей технологичностью при волочении, но могут быть использованы для пружин и упругих элементов, не испытывающих тяжелого нагружения и воздействия высоких температур. Показано, что новые аустенитные стали обладают повышенными характеристиками хладостойкости и теплостойкости и могут обеспечить надежную работу пружин и упругих элементов вплоть до 400° С. На исследуемую сталь получены патенты на изобретение. Реализация ТРИП-эффекта, характерного для малоуглеродистых мартенситностареющих сталей, впервые описана в высокоуглеродистых сплавах. Комплексными методами исследования показано наличие ТРИП-эффекта в серийных углеродистых сталях и хромистых чугунах со структурой метастабильного аустенита в тонком слое рабочей поверхности после высокотемпературной закалки для сопротивления абразивному изнашиванию. Проведены успешные полупромышленные испытания, детали, термообработанные по предложенной технологии, показывают до трехкратного увеличение относительной износостойкости.

4. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации.

Обращает на себя внимание тот факт, что разработанная сталь подвергается волочению с диаметра 8 до 0,88 мм, то есть за 15 переходов «в холодную» без промежуточных нагревов. То есть сталь 03X14N11K5M2ЮТ имеет рекордную пластичность. Механизмы этой пластичности тщательно изучены в работе. С другой стороны, после окончательной механико-термической обработки стальная проволока диаметром 0,5 мм имеет $\sigma_b = 2520$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1700$ МПа при поперечном сужении $\psi = 43$ %. Это также рекордные соотношения прочности и пластичности! Причины получения данного комплекса свойств всесторонне изучены и проанализированы. Представлены и обоснованы примеры эффективного применения результатов исследованной стали для медицинского инструмента (подтверждено актом внедрения от ООО «Медтехника», г. Казань.). Широко применяемые серийные коррозионностойкие стали X12МФЛ, 95X18 были изучены с точки зрения применения к ним высокотемпературной закалки на структуру метастабильного аустенита в поверхности изделий для работы в условиях абразивного изнашивания. ТРИП-эффект и релаксация напряжений в тонком слое рабочей поверхности при протекании деформационного мартенситного превращения позволили опытной партии втулок буровых насосов из стали X12МФЛ отработать более 960 часов в климатических условиях ЯНАО, в 1,8 раза превысив эксплуатационный срок серийной партии втулок из чугуна ИЧХ20М в тех же условиях (акт ООО «Уралмаш НГО Холдинг» от 17 ноября 2016 г. № 37-518).

5. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений.

Достоверность результатов и сделанных выводов обеспечиваются:

- использованием комплекса современных методов исследования структуры (металлографии с компьютерным анализом изображения, электронной микроскопии, рентгенографии при комнатной и повышенных температурах, микрорентгеноспектрального, ДОРЭ-анализа);
- согласованностью результатов лабораторного и полупромышленных экспериментов;
- большим объемом экспериментальных данных с их статистико-вероятностной обработкой и воспроизводимостью результатов экспериментов.

6. Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом.

Диссертация построена по традиционному плану и содержит введение, восемь глав, заключение, библиографический список и приложение. Работа изложена на 252 страницах, содержит 110 рисунков, 14 таблиц, 5 формул и библиографический список из 205 источников.

В первой главе описан выбор материалов, условия их обработки и методика проведения исследований. Во второй главе рассмотрены фазовые превращения, структурные изменения и физико-механические свойства сталей двух групп легирования на базе аустенитной ТРИП-стали 03X14H11K5M2IOT: кобальтовая и с пониженным содержанием кобальта. С учетом исследованных интервалов выделения упрочняющих и нежелательных интерметаллидных фаз предложены режимы термической обработки, обеспечивающие формирование оптимальных структуры и комплекса свойств для проведения последующей холодной пластической деформации сталей различного легирования кобальтом. В данной главе комплексными исследованиями методами рентгеноструктурного фазового анализа, микрорентгеноспектрального анализа и просвечивающей электронной микроскопии, с привлечением измерения магнитных характеристик исследуемых материалов при глубоком охлаждении и последующем отогреве до комнатной температуры было выявлено, что аустенит исследуемых сталей обладает термической стабильностью в широком интервале температур от криогенных до 500° С. Представлены фазовые превращения и изменения физико-механических свойств сталей после холодной пластической деформации волочением с различными степенями обжатия. Впервые экспериментально установлена роль влияния легирования кобальтом (с 5,0 до ~ 1,0 мас. %) на изменение последовательности, состава и температурных интервалов выделения высокотемпературной χ -фазы. Рекомендованы режимы деформационно-термической сталей с различным содержанием кобальта на различных этапах производства проволоочной заготовки для упругих элементов ответственного назначения. В третьей главе представлены полученные впервые результаты изучения влияния температуры закалки в широком интервале температур для формирования диссипативной структуры в сталях перлитного класса (70X2ГСМЛ и 150ХНМЛ) в сравнении с серийными сталями ледебуритного класса (95X18 и X12МФЛ). Построены диаграммы превращений переохлажденного аустенита в сталях 70X2ГСМЛ и 150ХНМЛ и определены критические скорости закалки в интервале скоростей охлаждения 10 – 0,015 °С/с. Показано, что в этих сталях переохлажденный аустенит достаточно стабилен по отношению к распаду по первой и промежуточной ступеням превращения. Структура метастабильного аустенита с чередующимися кристаллами дисперсного микро- и нанокристаллического мартенсита и остаточного аустенита представляет собой синергетическую систему, обладающую ТРИП-эффектом вследствие «мартенситной сверхпластичности» и результирующей высокой способности к фрикционному упрочнению до 10,3 ГПа в стали 70X2ГСМЛ и до 11,2 ГПа в стали 150ХНМЛ с повышенной абразивной износостойкостью на 30% в стали 70X2ГСМЛ и на 40% в стали 150ХНМЛ по сравнению с износостойкостью после обычной закалки на мартенсит. Структура метастабильного аустенита с чередующимися кристаллами дисперсного микро- и нанокристаллического мартенсита и остаточного аустенита наблюдается и в сталях ледебуритного класса, обладает ТРИП-эффектом и, в результате высокой способности к фрикционному упрочнению, повышает абразивную износостойкость в 3 раза в стали 95X18 и в 2 раза в стали X12МФЛ по сравнению с закалкой от обычных температур. 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 перспективной безуглеродистой сверхравновесно-азотистой стали аустенитного класса. Исследованные стали, закаленные от температур 1000–1200 °С, имеют абразивную износостойкость, превышающую

износостойкость стали 110Г13Л на 20%. В процессе изнашивания происходит деформационный динамический отпуск образующегося мартенсита деформации, степень развития которого уменьшается в легированном хромом азотистом мартенсите, на что указывает замедление темпа снижения твердости этой стали и переводит сталь в разряд полутеплостойких. В пятой главе впервые изложены результаты решения задачи изучения фазовых превращений, твердости и абразивной износостойкости графитизированной стали 135СГЛ с целью разработки обоснованных режимов термической обработки, обеспечивающих максимальную абразивную износостойкость. С помощью закалки графитизированной стали от разных температур можно регулировать количество остаточного аустенита, его способность к превращению в мартенсит в процессе изнашивания и к фрикционному упрочнению рабочей поверхности образцов. По мере повышения температуры закалки до 1170 °С твердость снижается с 60 до 48 HRC, способность к фрикционному упрочнению на поверхности увеличивается на 5 % до 10,6 ГПа, на 400 МПа, столь небольшое фрикционное упрочнение поверхности, при росте износостойкости в 2 раза, можно связать с наличием графитных включений. Структурной особенностью строения тонких (до 20 мкм) поверхностных слоев стали 135СГЛ является преимущественно перпендикулярное по отношению к направлению трения расположение пластин мартенсита, что свидетельствует о возникновении в них текстуры. EBSD-анализом показано, что кристаллы ориентируются плоскостью (011) в кристалле мартенсита параллельно плоскости (111) в кристалле аустенита. Диссипация энергии в микро-ТРИП-эффект и релаксацию микронапряжений в момент сдвига при ДМП поглощает часть энергии внедрения абразивных частиц, повышая сопротивление изнашиванию. В шестой главе впервые изучены возможности повышения абразивной износостойкости экономно легированного чугуна типа нихард повышением температуры закалки для получения метастабильного остаточного аустенита на рабочей поверхности с образованием мартенсита деформации в процессе эксплуатации деталей в сравнении с чугунами 250Х16М2 и 250Х25МФТ со специальными карбидами M_7C_3 и $M_{23}C_6$. Формирующаяся в процессе изнашивания микроструктура и микротвёрдость рабочей поверхности обеспечивает максимально высокую износостойкость высокохромистых чугунов. Чугуны 260Х16М2 и 250Х25МФТ достигают максимальной износостойкости ($\epsilon = 2,8$ и $3,5$, соответственно) и микротвёрдости рабочей поверхности ($HV_{50изн} \geq 11$ ГПа) в результате высокотемпературной закалки от 1170 °С. Это увеличение износостойкости обусловлено высокой способностью к упрочнению рабочей поверхности – микротвёрдостью ($HV_{50изн}$), возрастающей от 8,9 до 10,1 ГПа после высокотемпературной закалки в результате превращения большей части остаточного аустенита в мартенсит деформации в процессе изнашивания. В седьмой главе для интерпретации результатов экспериментов по сопротивлению абразивному изнашиванию показано применение статистической обработки. Предложен критерий оценки резервов повышения износостойкости $\Delta\epsilon = \epsilon_{1170} - \epsilon_{900}$ прирост износостойкости при испытаниях на абразивный износ образцов после высоко- (1170 °С) и низкотемпературной (900 °С) закалки, характеризующий способность материала к упрочнению поверхности за счет полноты протекания ДМП в диссипативной структуре метастабильного аустенита. Проведена профилометрия поверхности, образец стали 135СГЛ после высокотемпературной закалки имеет более гладкую поверхность ($Ra: 1,21$), чем после низкотемпературной ($Ra: 1,64$), отличается более высокой равномерностью приработки. С точки зрения легирования, критерием оценки способности к упрочнению предложена $HV_{50изн}$ – микротвёрдость поверхности после изнашивания, на уровень которой наиболее влияет содержание Si в %. В восьмой главе описаны возможное использование результатов диссертационного исследования и опыт их практического применения. Отработан режим объемной и поверхностной высокотемпературной закалки и обработки холодом для формирования самотрансформируемого в процессе изнашивания слоя рабочей поверхности. Результаты работы использованы специалистами предприятий ООО «Медтехника», ООО «Узтермо» и ООО «Уралмаш НГО Холдинг».

7. Замечания по работе

Несмотря на общее очень благоприятное впечатление о работе, в ней есть некоторые недочеты и неясности.

Замечания по сути работы:

- Требуется пояснения, что понимается под успешными полупромышленными испытаниями предлагаемой стали с точки зрения достигнутого результата.

- Целесообразным было бы разделить первую главу на более узкие по содержанию части, что только бы улучшило восприятие всей работы в целом.

- В диссертации не описано, что представляет собой χ -фаза, какова ее кристаллическая решетка, условия появления и свойства, как она может влиять на свойства сталей. Какое влияние на технологические или эксплуатационные свойства исследуемых сталей оказывает установленное в работе снижение температурного интервала выделения χ -фазы при уменьшении концентрации в них кобальта.

- Для исследования релаксационной стойкости следовало бы использовать более современное оборудование и методики.

- Как объясняется выбор высокотемпературной закалки с точки зрения роста зерна?

- В докладе не раскрыт механизм формирования метастабильного аустенита в высокоуглеродистой безникелевой коррозионностойкой стали.

- Не представлены механические свойства метастабильного аустенита.

- В выводе 2 диссертации показано, что структура метастабильного аустенита с чередующимися кристаллами дисперсного микро- и нанокристаллического трибологического мартенсита и остаточного аустенита представляет собой синергетическую систему, обладающую ТРИП-эффектом вследствие «мартенситной сверхпластичности». Однако, не раскрыты особенности проявления «мартенситной сверхпластичности», и неясно, что понимается под мартенситной сверхпластичностью?

- В седьмой главе для интерпретации результатов экспериментов по сопротивлению абразивному изнашиванию показано применение статистической обработки, получено уравнение множественной регрессии: $HV_{50изн}=383-234\cdot\%C-50\cdot\%Mn-24\cdot\%Cr+3,5\cdot\%Ni-40\cdot\%Mo+91\cdot\%Si$. Исходя из этого уравнения автор утверждает, что столь значимое влияние кремния на фрикционное упрочнение поверхности, очевидно, объясняется тем, что при деформации, как и при охлаждении, кремний понижает энергию дефектов упаковки. В тоже время, в табл. 5 приведены данные для чугунов 250Х25МФТ и 260Х16М2, в химическом составе которых нет кремния. Значит, некорректно применять вышеприведенное уравнение для указанных сплавов. В других сталях Х12МФЛ и 150ХНМЛ содержание углерода в 6,0 раза больше кремния. Кроме того, далее в диссертации отмечено, что чем больше после закалки остаточного аустенита и выше содержание в нем углерода, тем больше увеличение износостойкости. Исходя из вышеизложенного, непонятно, чем объясняется значимое влияние кремния на износостойкость стали по сравнению с углеродом? По-видимому, в дальнейшем потребуется корректировка уравнения с целью более четкой оценки как отдельного, так и совместного влияния различных факторов совершенствования химического состава сплавов на их абразивную износостойкость с помощью комплексного показателя – микротвёрдости рабочей поверхности после изнашивания.

8. Соответствие автореферата основным положениям диссертации.

Представленная работа полностью удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к докторским исследованиям. Диссертация написана содержательно, в хорошем стиле, на высоком научном уровне, имеет объемную актуальную библиографию (205 источников). Всё это свидетельствует о глубокой вовлеченности диссертанта в исследуемое направление. Соискателем продемонстрирована широкая научная эрудиция, умение анализировать литературу и правильно давать ей оценку, делать самостоятельные выводы и обобщения. Диссертация представляет самостоятельный и вполне завершённый труд. Автореферат написан грамотно, лаконично и достаточно полно отражает содержание диссертации.

9. Подтверждения опубликованных основных результатов диссертации в научной печати.

Подтверждаем, что основные результаты исследования опубликованы в 35 научных работах автора, в том числе в 11 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также получены 2 патента и опубликовано 4 статьи в англоязычных изданиях, индексируемых WoS и Scopus.

10. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней.

Отмеченные в п. 7 недостатки не являются принципиальными и не влияют на общую положительную оценку диссертации. Диссертация Шараповой В.А. является самостоятельной работой, имеющей важное значение для развития высокотехнологичных материалов, написана на высоком научном уровне, изложена в хорошем стиле, представляет полезный новый вклад в области металловедения. Заявленная соискателем цель диссертационного исследования, направленная на научное обоснование новых технологических решений по реализации ТРИП-эффекта в метастабильном аустените сталей и хромистых чугунов для повышения износостойкости и долговечности агрегатов, эксплуатируемых в условиях совместного действия трения, абразивных частиц и циклических динамических нагрузок, достигнута.

Совокупность полученных научно-практических результатов, с учетом их апробаций, дает основание полагать, что результаты и выводы диссертации являются значимыми для развития металлургической и машиностроительной отраслей страны и могут применяться для организаций, выполняющих заказы по производству коррозионностойких изделий тонких сечений (медицинские иглы), термической обработке деталей насосов (цилиндровых втулок). Рекомендуются использовать результаты работы на отечественных предприятиях, производящих насосы для буровых установок и других конструкций с насосами высокого давления (АО «Уралбурмаш», ООО «Шадринский машиностроительный завод» и т.п.), а также на предприятиях, использующих дробемётные аппараты для очистки продукции после отливки и термической обработки, для повышения эксплуатационной стойкости рабочих лопаток.

Таким образом, диссертация Шараповой Валентины Анатольевны «Научно обоснованные технологические решения упрочнения и повышения износостойкости машиностроительных материалов за счет ТРИП-эффекта в структуре метастабильного аустенита» является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные решения применения ТРИП-эффекта в материалах со структурой метастабильного аустенита, соответствует требованиям «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.

Диссертация и отзыв на нее были заслушаны и обсуждены на заседании отдела «Сверхпластическая обработка перспективных материалов» ИПСМ РАН 14 марта 2025 г. (протокол № 1 от 14.03.2025). Текст отзыва заслушан и принят единогласно.

Валитов Венер Анварович,
доктор технических наук (специальность 05.16.09 -
Металловедение (Машиностроение), ведущий
научный сотрудник
Отдела сверхпластической обработки перспектив-
ных материалов, ИПСМ РАН, Республика Башкор-
тостан, г. Уфа, ул. Степана Халтурина, 39.
Тел.: +7 (347) 223-64-07. e-mail: valitov_va@imsp.ru

Согласен на обработку персональных
данных:

 В.А. Валитов
«14» марта 2025 г.

Подпись Валитова В.А. удостоверяю:

Начальник отдела кадров ИПСМ РАН  Т.П. Соседкина

«14» марта 2025 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, Россия, 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Степана Халтурина, 39, Тел. +7 (347) 223-64-07, email: imsp@imsp.ru