

ОТЗЫВ
официального оппонента ДАНИЛОВА ВЛАДИМИРА ИВАНОВИЧА
на диссертацию ШАРАПОВОЙ ВАЛЕНТИНЫ АНАТОЛЬЕВНЫ
«НАУЧНО ОБОСНОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УПРОЧНЕНИЯ И
ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЗА
СЧЕТ ТРИП-ЭФФЕКТА В СТРУКТУРЕ МЕТАСТАБИЛЬНОГО АУСТЕНИТА»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность избранной темы диссертации

Защита поверхности деталей машин от изнашивания при трении остаётся одной из главных проблем материаловедения. Большой объём работ, посвященных проблемам износостойкости сталей и других железоуглеродистых сплавов, позволяет констатировать, что традиционные технологические пути по достижению требуемых результатов практически исчерпаны. Необходимы новые материалы и новые режимы термической обработки известных износостойких материалов, которые отвечают современным технологическим вызовам. В этом отношении перспективными материалами представляются метастабильные аустенитные стали, а в качестве инновационных термомеханических обработок промышленных износостойких сталей и сплавов, обработки, использующие ТРИП-эффект. Однако без систематической информации о взаимосвязи структурных превращений с износостойкостью широко используемых сталей и чугунов решение поставленных задач невозможно. Работа Шараповой В.А., целью которой являлся поиск и 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, является научной основой решения важной народнохозяйственной проблемы и потому актуальна.

Структура и содержание диссертационной работы

Представленная к защите диссертационная работа Шараповой Валентины Анатольевны состоит из введения, восьми глав, заключения и выводов, списка цитированной литературы из 205 источников и приложения, содержащего копии трех актов внедрения. Объем работы составляет 248 страниц, включающих 110 иллюстраций и 14 таблиц.

Во введении обоснована актуальность исследования, изложена степень разработанности темы, сформулирована цель исследования, перечислены задачи, решение которых обеспечило достижение поставленной цели. В этом же разделе изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведено краткое перечисление методов исследования, дана оценка достоверности результатов и личного вклада автора, показана апробация работы на научных конференциях и симпозиумах и полнота публикации в научных изданиях. Главная часть введения – изложение четырех научных положений, защищаемых автором.

Далее Шарапова В.А. отступает от традиционного построения диссертационных работ. Она не приводит изложение общей оценки состояния научных исследований в России и в мире, чтобы обосновать необходимость выполнения рассматриваемой работы, ограничиваясь изложенным во введении. Осведомленность автора об основных путях развития металловедения в русле настоящей работы становится очевидной при квалифицированном обсуждении полученных результатов в соответствующих главах.

Первая глава посвящена описанию и обоснованию выбранных для исследований материалов и методик испытаний. Автор излагает причины использования в работе сталей и чугунов различных классов, которые объединены с одной стороны структурно-фазовым составом, в который входит деформационно-нестабильный аустенит, а с другой областью их использования в ка-

честве износостойких материалов. Указано, что все эти материалы были выплавлены из шихты контролируемого состава в опытных или лабораторных индукционных печах. Обработку давлением заготовок и слитков производили также на сертифицированном лабораторном оборудовании. Строго контролируемы были и режимы термической обработки. Далее в первой главе автор описывает оборудование и методики механических испытаний, прецизионного исследования структурно-фазового состояния, испытаний на абразивный износ.

Во второй главе представлены результаты исследования двух метастабильных аустенитных сталей, отличающихся друг от друга содержанием кобальта. Эксплуатационные и технологические характеристики этих сталей определяет объемный ТРИП-эффект. Показано, что для наиболее полного использования ресурса эксплуатационных свойств этих сталей необходима комплексная термомеханическая обработка, включающая в себя закалку, холодную обработку давлением и старение. Так на стали 03X14N11K5M2ЮТ обработанной по режиму: закалка от 1000 °С в воду, холодное волочение со степенью деформации $\epsilon \geq 3,1$ и старение в течение часа при температуре 500 °С были получены $\sigma_b = 2530$ МПа, $\sigma_{0,03} = 2250$ МПа, $E = 213$ ГПа, релаксационная стойкость до 400 °С. Этим автор доказывает первое положение, вынесенное на защиту.

В третьей главе диссертации автор демонстрирует возможности использования ТРИП-эффекта для повышения износостойкости сталей перлитного класса 70X2ГСМЛ, 150ХНМЛ и серийных ледебуритных сталей 95X18 и X12МФЛ, в которых после закалки всегда присутствует остаточный аустенит. В технологической практике эта фаза считается нежелательной. В то же время, как показывает автор, этот аустенит метастабильен и при высоких контактных нагрузках претерпевает превращение в мартенсит деформации. Количество и состав остаточного аустенита определяется температурой закалки. Закалка от температур 1125÷1170 °С в масло приводит к формированию структуры, состоящей из мартенсита охлаждения и наклепанного аустенита с повышенным содержанием легирующих элементов. На поверхности трения эта структура проявляет микро-ТРИП-эффект, в результате чего износостойкость повышается в два-три раза. Этими данными автор подтверждает третье положение, вынесенное на защиту.

В четвертой главе показано влияние микро-ТРИП-эффекта на износостойкость метастабильных хромистых и марганцовистых аустенитных сталей. Показано, что эти стали при меньшей твердости демонстрируют более высокую стойкость к абразивному износу, чем стали со стабильным аустенитом, причиной чего является деформационное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение, которое развивается в микробъемах – в треках движения абразивных частиц.

Пятая глава посвящена обоснованию и разработке режимов термической обработки графитизированной стали 135СГЛ с целью получения наиболее высокого сопротивления изнашиванию. Показано, что вследствие образования остаточного метастабильного аустенита в количестве до 35 %, после закалки от 1170 °С износостойкость в два раза выше, чем износостойкость этой стали после традиционной закалки от 900 °С.

В шестой главе показаны возможности повышения абразивной износостойкости экономно легированного чугуна типа нихард изменением температуры закалки для получения метастабильного остаточного аустенита на рабочей поверхности, который в процессе эксплуатации проявляет ТРИП-эффект с образованием мартенсита.

Результаты, полученные в четвертой, пятой и шестой главах служат подтверждением второго положения вынесенного на защиту.

В седьмой главе: для интерпретации экспериментальных данных по сопротивлению абразивному изнашиванию описано применение математической обработки статистическими методами, определены зависимости способности к повышению износостойкости поверхности в процессе эксплуатации от химического состава сплава и фазового состава после высокотемпературной закалки. Представлена эмпирическая зависимость, устанавливающая связь между способностью материала к упрочнению поверхности за счет полноты протекания деформационного мартенситного превращения и количеством мартенсита после высокотемпературной закалки, чем подтверждается четвертое положение, вынесенное на защиту.

В восьмой главе обобщены результаты исследований по обоснованию режимов термической обработки для повышения абразивной износостойкости метастабильных сталей. В частности

по предложенным режимам изготовлена и прошла успешные полупромышленные испытания на предприятии ООО «УЗТЕРМО», г. Екатеринбург опытная партия износостойких вставок из ледебуритной стали Х12МФЛ и проведены промышленные испытания партии втулок буровых насосов из этой стали в климатических условиях региона ЯНАО, которые в 1,8 раза превысили эксплуатационный срок серийных втулок из чугуна ИЧХ20М.

В заключении сформулированы выводы по результатам работы, указаны перспективы их использования для решения производственных задач. Среди многих важных результатов, полученных автором, следует выделить:

- выявление роли аустенита, как фактора повышения механических и эксплуатационных свойств за счет пластичности фазового превращения, который в метастабильных аустенитных сталях развивается как объемный ТРИП-эффекта, а в высокоуглеродистых сталях, как микро-ТРИП-эффект при одинаковых путях структурных превращений в обоих случаях;
- предложенный режим термической обработки, применение которого с незначительными вариациями позволяет в сталях аустенитного, перлитного и ледебуритного классов, а также в графитизированной стали и хромистых чугунах получить диссипативную микроструктуру состоящей из мартенсита и значительного количества остаточного аустенита, превращающегося в мартенсит в процессе эксплуатации, чем обеспечивается повышение износостойкости в три раза по сравнению со сталью Гадфильда;
- критерий оценки резервов повышения абразивной износостойкости, который представляет собой разницу между износостойкостью материала после высоко- (1170 °С) и низкотемпературной (900 °С) закалки, характеризующий способность материала к упрочнению поверхности за счет полноты протекания деформационного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в диссипативной структуре метастабильного аустенита;
- выбор в качестве информативного параметра микротвердости поверхности после испытаний износ и уравнение множественной регрессии этого параметра от химического состава стали.

Научная новизна, достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Диссертантом сформулированы семь пунктов научной новизны.

Первый пункт о разработке и патентовании новой метастабильной аустенитной стали 03X14N11K5M2IOT с рекордной пластичностью в закаленном состоянии и экстремальными прочностными характеристиками, безусловно, обладает новизной, но скорее свидетельствует о практической значимости работы.

Во втором пункте на основании проведенных исследований предложен режим термомеханической обработки указанной стали, который позволяет не только получить высокопрочное состояние, но и обеспечить высокое сопротивление релаксации напряжений при длительных нагревах до температуры 400 °С. Здесь также присутствует новизна, но пункт опять отражает в большей степени практический аспект.

Третий пункт устанавливает роль легирования кобальтом для подавления выделения нежелательной высокотемпературной интерметаллидной χ -фазы и, безусловно, представляет новый научный результат.

В четвертом пункте отражены причины высокого сопротивления абразивному изнашиванию сталей перлитного и ледебуритного классов после высокотемпературной закалки за счет формирования вторичной диссипативной структуры поверхности трения из нанокристаллических аустенита и мартенсита, обладающей способностью к релаксации напряжений вследствие микро-ТРИП-эффекта. И процесс формирования диссипативной структуры, и результаты ее возникновения описаны и объяснены впервые.

Пятый пункт научной новизны, по существу, поясняет четвертый. Он показывает, что низкотемпературная закалка не обеспечивает необходимого состава и количества метастабильного аустенита, чтобы образовывалась диссипативная структура поверхности трения, а потому материал обладает пониженной абразивной износостойкостью. Это также новый научный результат.

В шестом пункте впервые экспериментально установлено и научно обосновано, что высокотемпературная закалка в масло как экономно легированного чугуна типа нихард (300X2H4), так и износостойких хромистых чугунов (260X16M2 и 250X25MФТ) от температур от 1125 – 1170 °С с последующим высоким отпуском 550 °С, хотя и дают пониженную твердость, но формируют резервы в структуре для последующего образования самотрансформируемого слоя высокой микротвердости на рабочей поверхности трения.

В качестве седьмого пункта научной новизны автор представила полученную ей количественную зависимость, позволяющую рассчитывать способностью к упрочнению поверхности сталей и хромистых чугунов по содержанию α -фазы после закалки.

Анализ обоснованности и достоверности полученных экспериментальных результатов позволяет утверждать, что они обеспечены использованием совокупности современных взаимодополняющих методов и оборудования для металлофизического исследования: просвечивающей и растровой электронной микроскопии с элементным анализом, оптической микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа с применением современного апробированного программного обеспечения расшифровки данных. Обсуждение результатов базируется на современных положениях теории фазовых и структурных превращений и не противоречит имеющимся в литературе представлениям о формировании структуры сплавов с метастабильным аустенитом.

Следует отметить, что достоверность полученных в работе результатов по изучению влияния термической обработки на фазовый состав, тонкую структуру, абразивную износостойкость и фрикционное упрочнение сталей и чугунов с метастабильным аустенитом обусловлена согласованностью с известными литературными данными, применением в совокупности широкого спектра современных методов исследования и применением апробированных программ расшифровки данных.

Автореферат диссертации с необходимой полнотой раскрывает ее содержание, положения и выводы прошли апробацию на международных и российских конференциях, публикации полностью соответствуют выбранной теме исследования, отражают направленность научных интересов автора и основное содержание работы, что соответствует требованиям ВАК.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Исследования В.А. Шараповой, проведенные в целях научного обоснования новых режимы термической и термомеханической обработки для мартенситностареющих аустенитных сталей, высокоуглеродистых перлитных, аустенитных, ледебуритных и графитизированных сталей, а также износостойких чугунов, в основе которых ТРИП- и ТВИП-эффекты, вносят существенный вклад в развитие металловедения, как научной дисциплины. С другой стороны, использование указанных режимов дало возможность решить ряд практических задач по изготовлению узлов трения буровых машин для работы в арктических условиях, что подтверждено прилагаемыми актами внедрения. Успешное внедрение результатов работы на указанных в актах производствах позволяет рекомендовать расширить сферу их практического использования.

Несмотря на общее положительное впечатление о работе возникает ряд замечаний и вопросов по содержанию диссертации.

Замечания и вопросы по общему содержанию диссертации

1. Выводы по работе в целом и по главам аморфные и избыточно излишними подробностями, которые уже были изложены в тексте. Это мешает оценить, достигнута ли заявленная цель, найдены ли технологические решения для повышения износостойкости сталей и сплавов путем использования ТРИП-эффекта. Так, например, в выводе 3 по

- главе 2 на стр. 91 автор только констатирует, что содержание Со контролирует ТРИП-эффект, но не говорит о причинах, хотя именно это соответствует цели диссертационного исследования и, судя по тексту, эти причины могли бы быть раскрыты.
2. В качестве элемента новизны на странице 10 (введение), а затем на странице 194 (глава 7) автор приводит уравнение отражающее экспоненциальную зависимость между скоростью прироста относительной износостойкости и содержанием α -фазы. Не ясно, как оно получено. Ссылка на график рис. 7.3, стр. 194 ничего не поясняет, потому что на нем нет экспериментальных точек.
 3. Почему автор рассчитывает истинную деформацию при волочении (стр. 61) как $e = 2\ln(d_0/d)$? Если условная деформация $\epsilon \approx d_0/d$, то должно быть $e = \ln(1+\epsilon) = \ln[1+(d_0/d)]$.
 4. На стр. 67 автор утверждает: «На сталях с пониженным содержанием кобальта при более низкой степени суммарной пластической деформации наступает потеря пластичности, что проявляется в отсутствии различия в значениях временного сопротивления разрыву (σ_b) и предела текучести ($\sigma_{0,2}$)» Но именно требование близости этих параметров предъявляется к ТРИП-сталям. Для пояснения своего утверждения следовало бы привести диаграммы ($\sigma - \epsilon$) для разных степеней обжатия, чтобы оценить вклады ТРИП-эффекта в общую пластичность у обеих сталей.
 5. На стр. 74 приводится утверждение: «Терморентгенографический анализ, несмотря на не высокую степень деформации осаждением, показал, что в структуре присутствует ГЦК фаза, а существование ОЦК-мартенсита деформации отмечается лишь до температуры 600 °С, как было показано ранее, фаза, выделяющаяся из ОЦК-твердого раствора является упрочняющей и расшифровывается как NiAl, растворяясь выше 500 °С интерметаллиды инициируют $\alpha \rightarrow \gamma$ превращение; выше 600 °С структуре – аустенит». Предложение, по-видимому, не согласовано. Но еще при этом возникает вопрос о природе и количестве ГЦК-фазы. Если это метастабильный аустенит, то его присутствие можно рассматривать как дополнительный резерв износостойкости.
 6. В выводе 3 на стр. 162 автор констатирует, что сталь 135СГЛ после закалки от 900 °С в процессе отпуска сохраняет на 1-2 единицы HRC более высокую твердость до температуры 600 °С, чем после высокотемпературной закалки с остаточным аустенитом и не проявляет способности к дисперсионному твердению при отпуске с нагревом до 700 °С. Нужно ли проводить отпуск, и как температура отпуска повлияет на сопротивление износу?
 7. Автор неверно цитирует работы Л.Б. Зуева и С.А. Баранниковой, в которых идет речь не о волнах, а об автоволнах (стр. 190). Автоволны – объекты во много разные, а иногда и противоположные волнам, могут возникать только в активных диссипативных средах, поэтому связаны с пластической деформацией. Пластическая деформация по своей природе и по определению может только возрастать или оставаться неизменной в любом элементе деформируемого объекта. Меняться, в том числе и на противоположную, может лишь скорость пластической деформации.
 8. Почему параграф 5.1. называется «Особенности применения углеродистых инструментальных сталей», когда речь в нем идет исключительно о чугунах? Непонятно, какую роль он играет в работе, если это общие рассуждения о графитизированных чугунах?

Замечания по стилю и оформлению диссертации

Структура диссертации представляется логичной. Стиль изложения материала ясный, количество ошибок и погрешностей стилистического и орфографического типа невелико, однако некоторые следует отметить.

1. Небрежно выполнены рисунки 2.7 и 2.8. Положение пиков критически важных фаз отмечено неточно.
2. На страницах 38 и 39 дважды приведен один и тот же абзац о снижении трещиностойкости с понижением температуры испытания до -196 °С.

3. Рисунки 2.36 – 2.38 неразборчивы, не было смысла их приводить. Если нет полюсных фигур, следовало бы ограничиться таблицами 2.4 – 2.6.
4. На стр. 104 не понятен смысл предложения «Суммарное количество мартенсита на поверхности изнашивания после закалки от 1170 °С, по данным рентгеноструктурного анализа, меняется на противоположное: если в исходном перед испытанием состоянии количество мартенсита составляло 20 %, то в результате изнашивания возросло до 95 %.»
5. На страницах 111 и 112 автор приводит тривиальное описание изменения структуры и субструктуры стали 12ХНМЛ при разных температурах аустенизации, которое уместно в учебнике, а не в диссертации.
6. В выводе 2 на стр. 186 автор заявляет «Увеличение износостойкости обусловлено высокой способностью к упрочнению рабочей поверхности – микротвердостью (HV_{50изн}), возрастающей от 8,9 до 10,1 ГПа после высокотемпературной закалки...». Как сопротивление изнашиванию может обусловлено микротвердостью?

Все отмеченные замечания не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

В диссертации решена актуальная научно-техническая проблема формирования в материалах различного класса гетерофазной структуры с диссипативными составляющими и ее применения для улучшения технологичности при производстве изделий и повышения абразивной износостойкости в процессе эксплуатации изделий.

По своей цели, задачам, содержанию, методам исследования, научной новизне и практической значимости диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка»:

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;
6. Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химикотермической, термомеханической и других видов обработок, связанных с термическим или термодформационным воздействием, цифровизация и автоматизация процессов, а также разработка информационных технологий систем сквозного управления технологическим циклом, специализированного оборудования;
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;
9. Разработка новых принципов конструирования и моделирования структур сплавов (включая создание технологий их получения), обладающих заданным комплексом свойств, в том числе для работы в экстремальных условиях.

Соответствие автореферата содержанию диссертации и полнота ее опубликованности

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию и опубликованным работам. Уровень апробации результатов работы (публикации в ведущих международных и российских журналах и выступления на конференциях) отвечает самым высоким требованиям

Заключение о соответствии работы требованиям пункта II.9 Положения о присуждении ученых степеней

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 и сплавов и критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Шарапова Валентина Анатольевна, достойна присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Даю согласие на включение и обработку своих персональных данных в документах диссертационного совета.

Официальный оппонент:

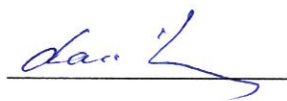
Доктор физико-математических наук (специальность 01.04.07 - физика твердого тела), профессор, главный научный сотрудник лаборатории физики прочности федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: ИФПМ СО РАН, 634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/4.

e-mail: dvi@ispms.ru

Тел.: +73822286862

Данилов Владимир Иванович



«18» апреля 2025 г.

Подпись Данилова В.И. заверяю.

Ученый секретарь ИФПМ СО РАН



Матолыгина Н.Ю.