

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



«Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина»

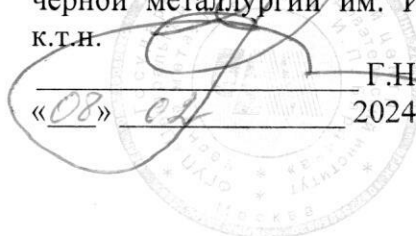
ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2
Тел.: +7 (495) 777-93-01; факс: +7 (495) 777-93-00
e-mail: chermet@chermet.net
www.chermet.net

УТВЕРЖДАЮ:

Первый Заместитель Генерального директора Государственного научного центра Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина»,
к.т.н.

«08» 02 2024г. Г.Н. Еремин



«08» 02 2024 год № 541-4/16
на № _____ от _____

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Рогачева Станислава Олеговича
«Структурные факторы и способы управления прочностью и пластичностью сплавов в широком диапазоне температур»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности: 2.6.1 - «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Структура и объём диссертационной работы

На отзыв представлена диссертация, состоящая из введения, пяти глав, частных и общих выводов, списка литературы из 335 наименований и четырех приложений с описанием практического внедрения полученных результатов. Работа изложена на 240 страницах, включая 75 рисунков и 15 таблиц. На отзыв также представлен автореферат на 40 страницах.

Актуальность темы диссертационного исследования

С развитием современной промышленности, с одной стороны, усложняются условия эксплуатации конструкционных и других металлических материалов, с другой стороны, возникает потребность в более легких и экономичных материалах. Эти обстоятельства требуют дальнейшего повышения прочности различных металлов и сплавов. Распространенным способом упрочнения металлов и сплавов является холодная пластическая деформация. При этом остается проблема сохранить пластичность металла после его упрочнения, без запаса которой невозможна эксплуатация (а часто и изготовление) металлических изделий. К настоящему моменту общего подхода к решению этой проблемы нет, а существующие взгляды на нее диаметрально противоположны. Поэтому задача повышения прочности при сохранении пластичности

различных металлических материалов является одной из наиболее актуальных в металловедении, и поиск наиболее общего ее решения необходим при создании современных многофункциональных металлических материалов.

В связи с вышесказанным направление диссертационного исследования Рогачева С.О, в котором решалась комплексная задача повышения прочности и сохранения пластичности различных металлов и сплавов, и анализировались новые возможности управления балансом прочности и пластичности за счет создания специальных структурно-фазовых состояний, обеспечивающих такой баланс в различных сплавах, актуально, а полученные результаты представляет особый научный и практический интерес. Важно отметить, что в работе задача повышения прочности и сохранения пластичности металлов и сплавов решалась не только для температур окружающей среды, но и в условиях повышенных температур, в том числе впервые была решена особо актуальная проблема сохранения высокотемпературной прочности.

Выбор материалов для исследования – сталей, медных, алюминиевых, циркониевых сплавов и композиционных материалов на их основе, с одной стороны, обусловлен необходимостью проецирования развиваемого в работе подхода на широкий спектр металлических материалов с разным структурно-фазовым состоянием, с другой стороны, связан с широким использованием таких материалов во многих отраслях промышленности и техники.

Оценка содержания диссертации

Во введении обоснована актуальность решаемой научной проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, отражена достоверность полученных результатов, упомянуты публикации по теме диссертационного исследования, личный вклад автора, благодарности, приведена информация об объеме и структуре диссертации.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по теме исследования, в котором анализируются известные механизмы повышения прочности металлических материалов, практические способы получения высокопрочного состояния с использованием пластической деформации, их ограничения с точки зрения проблемы снижения пластичности и сохранения термической устойчивости упрочненного состояния.

Рассмотрены структурные механизмы и факторы, обеспечивающие процессы релаксации напряжений (автор также использует более широкий термин «аккомодация») и повышения пластичности при деформации в разных сплавах, среди них: повышение однородности микро- и макроструктуры либо напротив создание градиентной или

бимодальной структуры; формирование ультрамелкозернистой структуры по механизму динамической рекристаллизации с накоплением дислокаций на границах кристаллитов; формирование двойниковых и нанодвойниковых границ; изменение текстуры и др. Детально рассмотрены особенности релаксации напряжений в сплавах с обычным размером зерна и в сплавах с ультрамелкозернистой структурой.

По результатам анализа автором была убедительно показана возможность одновременного повышения прочности и сохранения пластичности, и предложен соответствующий подход, основанный на идее создания структурно-фазового состояния сплава, способного к релаксации напряжений при деформации.

Намечены некоторые практические пути реализации предложенного подхода для достижения высокой прочности и пластичности в металле, требующие анализа влияния химического состава и схем деформационной обработки на механизмы и кинетику процессов упрочнения и релаксации напряжений для сталей и сплавов разных типов.

Во второй главе автором рассмотрена возможность использования ряда традиционных методов деформационной обработки, как способа влияния на структуру сплава и обеспечения повышения его прочности и сохранения пластичности. Экспериментально показано, что немонотонная деформация по схеме упругопластического знакопеременного изгиба при определенных условиях позволяет многократно повышать предел текучести металлического материала без потери относительного удлинения, и выявлены структурные факторы такого изменения свойств. При исследовании полос из меди и медного сплава (медно-цинковой латуни) автором было установлено, что знакопеременный изгиб повышает предел текучести в 1,5–4 раза без существенного снижения относительного удлинения за счет, либо создания градиентной (по прочности) структуры и ослабления текстуры (для меди), либо формирования двойников деформации (для латуни).

Единство механизмов структурной аккомодации показано при использовании недеформационных методов повышения прочности – высокотемпературного объемного азотирования полос из коррозионностойких сталей на основе систем легирования Fe-Cr и Fe-Cr-Ni-Ti, как альтернативы холодной прокатки.

В третьей главе предложены и реализованы на различных сплавах (алюминиевых, циркониевых) и композиционных материалах способы достижения сверхвысокого упрочнения и сохранения пластичности за счет выбора химического состава материала, режимов его деформационной или деформационно-термической обработки, с использованием методов больших пластических деформаций, и выявлены структурные

факторы такого изменения свойств. Полученные результаты позволили автору определить условия достижения баланса высокой прочности и пластичности в различных сплавах:

- в алюминиевых сплавах – это формирование в исходной структуре чистого или слаболегированного металла вторых фаз, склонных к измельчению или распаду при деформационной обработке (сдвигом под давлением);

- в циркониевых сплавах – это формирование за счет деформационной обработки (ротационной ковкой) зеренно-субзеренной ориентированной бимодальной субмикроструктурной структуры с высокой плотностью дислокаций ротационной ковкой.

Впервые в низколегированном алюминиевом сплаве системы легирования Al-Ca-Fe-Mn, после его обработки сдвигом под давлением, достигнута прочность 700–800 МПа при относительном удлинении 5–10 %.

Автором установлено определяющее влияние типа частиц алюминидов в эвтектических алюминиевых сплавах систем Al-Ca, Al-Ce, Al-La и Al-Ni и их кристаллографического соотношения с алюминиевой матрицей на структурообразование и механическое поведение таких сплавов, как в крупнозернистом состоянии, так и в ультрамелкозернистом.

Проведено комплексное исследование новых композиционных материалов «оболочка/стержень» на основе меди и алюминиевых сплавов, установлены закономерности их структурообразования и выявлены структурные факторы управления балансом прочности и пластичности. Показаны ограничения структурной аккомодации в таких материалах при деформации.

В четвертой главе автором решалась проблема сохранения структурной аккомодации высокопрочных ультрамелкозернистых материалов после нагрева. Экспериментально показано, что для обеспечения термической устойчивости упрочненного состояния ультрамелкозернистых сплавов и сохранения пластичности после нагрева необходимо создание структур, либо с повышенной объемной долей наноразмерных термически стабильных частиц в малодефектных динамически рекристаллизованных зернах, либо склонных к выделению таких частиц при нагреве. Продemonстрировано, что высокая термическая устойчивость иных структур, обеспечивающих высокую прочность и пластичность, достигается в сплавах, имеющих тугоплавкую металлическую основу, например, из циркония.

Автором предложен оригинальный и эффективный способ достижения высокопрочного и термически устойчивого состояния за счет создания композитов с многослойной вихревой структурой, на основе разнородных металлов со слабой взаимной

диффузией с использованием деформационной обработки сдвигом под давлением. По этой схеме автором были получены композиционные образцы на основе стали 08X17T и сплава V–Ti–Cr, состоящие из чередующихся очень тонких «вихреобразных» слоев обоих материалов и сохраняющие высокую прочность (до 1300 МПа) после отжига до 700 °С.

Пятая глава посвящена решению задачи сохранения высокотемпературной прочности в сталях и сплавах. Автором установлено, что термически устойчивые к отжигу структуры способны обеспечить и повышенную высокотемпературную прочность (до определенных температур). В частности экспериментально показано, что объемно-азотированная сталь 08X17T обладает при 700 °С прочностью в 2,5 раза выше, чем у стали без азота при сохранении высокой пластичности (относительное удлинение 55 %) за счет наличия в ее структуре дисперсных частиц термически стабильных нитридов хрома и легированного твердого раствора; а циркониевый сплав Э125, упрочненный ротационной ковкой, обладает при 300 °С прочностью в 1,1–1,5 раза по сравнению со сплавом в холоднодеформированном состоянии, при сохранении высокой пластичности (относительное удлинение 17 %), за счет замедления процессов диффузии в тугоплавкой циркониевой основе сплава.

Автором было экспериментально продемонстрировано, что полное сохранение горячей прочности в сплавах можно обеспечить путем создания в нем неравновесного состояния в условиях высоких температур или горячей деформации, обеспечивающего механизмы стабилизации дислокационных структур при высоких температурах. Этот эффект был реализован в штамповых сталях нового класса (стали с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации, РАПЭ). Впервые было выявлено и экспериментально продемонстрировано новое явление – склонность сталей к накоплению дислокаций при высоких температурах (до 750–800 °С). Выявлены структурные факторы и механизмы горячего упрочнения в сталях с РАПЭ и определена доля каждого из них в комплексном упрочнении: деформационное упрочнение, упрочнение при деформации в двухфазной ($\alpha+\gamma$)-области, дисперсионное упрочнение и упрочнение от полиморфного превращения – фазового наклепа. Определены режимы деформационно-термической обработки, позволяющие управлять состоянием горячего упрочнения в сталях с РАПЭ.

Научная новизна результатов исследования

1 Выявлены основные структурные механизмы и факторы обеспечения баланса высокой прочности и пластичности при холодной и горячей деформации и развит общий подход для достижения такого баланса в различных сплавах путем создания структур, обеспечивающих упрочнение и релаксацию напряжений при деформации.

2 Определены структурные факторы упрочнения и структурной аккомодации в тонких полосах меди и медно-цинковых сплавах при деформации знакопеременным изгибом: в полосе технически чистой меди толщиной 1–3 мм за счет создания градиентной (по прочности) структуры и рассеяния кристаллографической текстуры; для латуни Л63 за счет измельчения структуры при формировании многочисленных двойниковых границ.

3 Показано, что для алюминиевых сплавов многократное (в 4–6 раз) увеличение прочности с сохранением высокой пластичности (5–20 %) и повышенная термическая устойчивость достигаются при создании композитной эвтектической структуры с отсутствием растворимости в матрице эвтектикообразующего компонента и обработки методами больших пластических деформаций за счет формирования нано- и субмикроструктурной структуры с малой плотностью внутрикристаллических дефектов и измельчения (в системах Al–Ce, Al–La и Al–Ni) или распада (в системе Al–Ca–Fe–Mn) эвтектических частиц.

4 Установлены закономерности структурообразования и выявлены структурные факторы упрочнения промышленных циркониевых сплавов (Э110, Э635 и Э125) при больших пластических деформациях методами сдвига под давлением, равноканального углового прессования и ротационнойковки. В сплаве Э125 достигнута максимальная прочность 900 МПа и относительное удлинение 5 % за счет формирования структуры с 10–30 % ω -Zr-фазы при размере зерна 100–300 нм. Показано, что в этом же сплаве без ω -Zr-фазы прочность до 820 МПа и пластичность до 30 % обеспечиваются формированием бимодальной ультрамелкозернистой структуры.

5 Установлены закономерности структурообразования и выявлены структурные факторы управления балансом прочности и пластичности новых композиционных материалов «оболочка/стержень» на основе меди и алюминиевых сплавов Al–Cu–Mg и Al–La, полученных ротационнойковкой.

6 Выявлено и экспериментально продемонстрировано новое явление – склонность сталей ферритного класса к накоплению дислокаций при высоких температурах (до 750–800 °C).

Все перечисленные результаты получены впервые, и приоритет автора подтвержден целым рядом научных публикаций.

Практическая значимость и реализация результатов диссертации

1 Способ одновременной правки полуфабриката и его упрочнения за счет знакопеременной деформации изгибом освоен в производственных условиях ИМЕТ РАН

и рекомендован при производстве листовых металлических материалов на основе меди с использованием промышленных роликовых правильных агрегатов.

2 Разработана технология получения полуфабрикатов из биоинертного сплава Э125 методом ротационнойковки, обеспечивающая получение комплекса механических свойств, удовлетворяющего требованиям к конструкционному материалу для изготовления медицинских имплантатов, которая использована при производстве конструкционных элементов стоматологических имплантатов.

3 Предложены схемы и режимы деформационно-термической обработки штамповой стали с РАПЭ для управления степенью горячего упрочнения при рабочих температурах до 800 °С и повышения ресурса штампового инструмента.

4 Созданы новые композиционные материалы на основе меди и алюминиевых сплавов систем Al-Cu-Mg и Al-La и определены режимы их деформационной и термической обработки, обеспечивающие достижение заданного баланса прочности и пластичности. Получены высокопрочные и термоустойчивые композиционные проводники «медь/алюминиевый сплав Al-10 % La» (электропроводность свыше 70 % бескислородной отожженной меди) в виде проволоки диаметром 0,75–0,5 мм для применения в электротехнике.

5 Разработанные материалы, методы и технологические режимы защищены 3-я патентами РФ и 7-ю ноу-хау.

Задачи, поставленные в диссертационном исследовании, соответствует актуальным научно-техническим направлениям развития РФ и решались в рамках Государственного задания, проектов ГК Росатом и ФЦП.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведённых в диссертации

В работе получен ряд новых результатов, в том числе научные знания мирового уровня, представляющие интерес для профильных специалистов, научных организаций и производственных предприятий, специализирующихся в области проектирования и изготовления многофункциональных материалов.

Результаты диссертационной работы перспективны при разработке новых многофункциональных материалов с использованием методов пластической деформации и дизайна неравновесных структур. Это, с одной стороны, расширит спектр применения многих традиционных материалов, с другой стороны, будет способствовать внедрению новых материалов в промышленность.

Особенно значимым результатом является решенная задача сохранения высокотемпературной прочности сталей, что открывают широкие возможности

применения нового типа штамповых сталей (стали с РАПЭ), работающих при температурах до 800 °С, с последующим их внедрением на профильных предприятиях.

Результаты и выводы диссертации также рекомендуется внедрить в научно-образовательные программы, как базовых курсов по основам физики прочности, так и специальных курсов по разработке инновационных материалов.

Достоверность результатов работы подтверждается использованием для их получения многих современных методов исследований и испытаний, верификацией предложенного в работе подхода с использованием широкого спектра металлических материалов (с различным химическим составом, кристаллической решеткой, с разным структурно-фазовым состоянием) и получением внушительного объема новых данных по микроструктурам и механическому поведению, непротиворечивостью полученных результатов современным материаловедческим положениям. Материал диссертации в полной мере отражен в 60 статьях, опубликованных автором за последние 10 лет в ведущих научных изданиях, входящих в перечень ВАК и базы Scopus или WoS. Кроме этого достоверность результатов подтверждается справками об их практическом использовании на предприятиях, а также выданными патентами.

Соответствие автореферата содержанию диссертации

В автореферате изложены основные идеи и выводы диссертации, показан вклад автора в проведенное исследование, степень новизны и практическая значимость результатов исследований. Содержание автореферата отражает основные положения диссертации.

Замечания по диссертационной работе

1. Для ряда материалов автором был достигнут комплекс свойств, предполагающий применение изделий из этих материалов в конкретных условиях эксплуатации (циркониевый сплав для изготовления медицинских имплантатов, биметаллические провода для электротехники, сталь для горячего прессования и др.), однако перечень требований к свойствам этих изделий не приводится;

2. В ходе диссертационного исследования были разработаны «схемы и режимы деформационно-термической обработки стали с РАПЭ для горячего прессования», однако сами режимы и способы их реализации в промышленных условиях не прописаны;

3. Непонятно в какой степени учитывалась неоднородность, всегда присущая материалам после деформации, поскольку автор, к сожалению, не всегда приводит статистические данные об объеме материала взятого для исследований;

4. Автором были получены многослойные композиты с использованием техники сдвига под давлением, однако практическая возможность использования таких материалов не обговаривается;

5. Возможен ли эффект «сохранения высокотемпературной прочности» в иных сталях с фазовым превращением?

Указанные замечания не снижают ценность диссертационной работы Рогачева Станислава Олеговича, имеющей научную новизну и практическую значимость в актуальной области современного металловедения. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основе выполненных автором исследований дано наиболее общее решение научной задачи сохранения запаса пластичности при упрочнении металлов и сплавов.

Заключение

Диссертационная работа «Структурные факторы и способы управления прочностью и пластичностью сплавов в широком диапазоне температур» по актуальности, обоснованности и достоверности полученных результатов, научной и практической значимости полностью отвечает квалификационным требованиям п. 2 «Положения о порядке присуждения учёных степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук. По научно-технической направленности, содержанию, выводам и практической значимости работа соответствует паспорту специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Диссертационная работа выполнена соискателем на высоком научно-техническом уровне. Автор диссертации – Рогачев Станислав Олегович – заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Диссертация, автореферат Рогачева С.О. и отзыв обсужден и принят на заседании Научно-технического совета Научного центра качественных сталей ведущей организации ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», протокол № 1 от 29.01.2024 г.

Отзыв составили:

Председатель Объединенного Научно-технического совета НЦКС и НЦСТСК

Директор Научного центра качественных сталей
ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»,
д.т.н., проф.

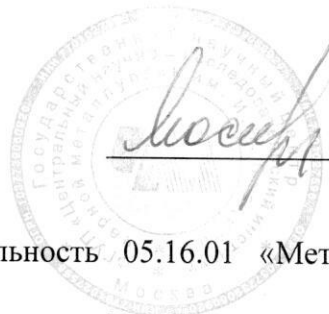
 Г.А. Филиппов

Секретарь Объединенного Научно-технического совета НЦКС и НЦСТСК, Начальник лаборатории сталей и сплавов для транспорта Научного центра качественных сталей ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», к.т.н.

 О.В. Ливанова

Подписи Филиппова Г.А. и Ливановой О.В. заверяю:

Ученый секретарь
ГНЦ «ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»,
к.т.н.



Т.П. Москвина

Филиппов Георгий Анатольевич, специальность 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Ливанова Ольга Викторовна специальность 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Данные об организации:

Государственный научный центр. «Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» (ГНЦ «ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина») 105005, г. Москва, ул. Радио, д.23/9, стр. 2., тел.: +7 (495)777-93-01, e-mail: chermet@chermet.net