



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ УрО РАН,
академик РАН
В.В. Устинов

« 10 » февраля 2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертацию Кусакина Павла Сергеевича «Влияние термомеханической обработки на структуру и механическое поведение высокомарганцевых сталей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Диссертационная работа Кусакина П.С. посвящена исследованию механизмов структурообразования и формирования механических свойств в аустенитных высокомарганцевых сталях Fe-18Mn-0.6C-1.5Al и Fe-23Mn-0.3C-1.5Al в условиях комбинированных механо-термических обработок.

Актуальность темы диссертации

В условиях непрерывного развития автомобилестроения все более высокие требования по комплексу прочности и пластичности предъявляются к автомобильным сталям, используемым для производства деталей кузова. Особенно перспективным классом сталей для автомобилестроения в последнее время становятся деформируемые высокомарганцевые стали с аустенитной матрицей, в которых при деформации развивается двойникование. В результате реализации TWIP эффекта (Twinning Induced Plasticity – пластичность, наведенная двойникованием) обеспечивается сверхвысокая (~100%) пластичность по сравнению с другими сталями, используемыми в автомобильной промышленности. Это позволяет получать детали сложной формы с меньшим количеством операций. Однако главным недостатком сталей класса TWIP является низкий предел текучести, который ограничивает широкое применение TWIP сталей. Одним из эффективных способов повышения предела текучести является комбинированная деформационно-термическая обработка. Поэтому тема диссертационной работы Кусакина П.С., посвященная углубленному изучению закономерностей структурных изменений в процессе деформационно-термической обработки и их влиянию на механические свойства TWIP сталей, а также разработке и оптимизации на этой научной основе технологических процессов производства TWIP сталей с улучшенным комплексом механических свойств, является **актуальной и практически значимой**.

По результатам анализа актуальных направлений исследований Кусакиным П.С. сформулирована **цель** диссертационной работы: установление влияния холодной пластической деформации и последующей термической обработки на

структуру и механическое поведение Fe-18Mn-0.6C-1.5Al и Fe-23Mn-0.3C-1.5Al сталей.

Для достижения указанной цели решались следующие частные **задачи**:

1. Установить влияние холодной прокатки с различными степенями обжатия и температуры последеформационных отжигов на структурные изменения.

2. Выявить влияние структуры на механические свойства, определить вклады структурного и дислокационного упрочнения сталей.

3. Установить природу высокой пластичности сталей на основе анализа стадийности их деформационного поведения при растяжении (продолжительность и интенсивность деформационного упрочнения на разных стадиях пластического течения) в зависимости от исходного структурного состояния, а также от химического состава.

Структура диссертации и ее основное содержание

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы из 138 источников.

Во введении обоснована актуальность решаемой научной и технической проблемы, сформулированы цель и основные положения, выносимые на защиту, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, отмечен личный вклад автора, указаны конференции и семинары, на которых докладывались материалы работы.

В первой главе дан краткий литературный обзор данных по TWIP эффекту, зависимостям энергии дефекта упаковки (ЭДУ) и механических свойств от химического состава в высокомарганцевых аустенитных сталях, влиянию ЭДУ на основной механизм деформации марганцовистых сталей, моделям образования деформационных двойников, а также по влиянию деформационной и термической обработки на структуру и свойства высокомарганцевых сталей.

Во второй главе описаны материалы (стали Fe-18Mn-0.6C-1.5Al и Fe-23Mn-0.3C-1.5Al), методы и режимы их деформационных и термических обработок, методики исследования структуры, фазового состава и механических свойств.

В третьей главе диссертации представлены исследования механизмов формирования микроструктур в аустенитных высокомарганцевых сталях Fe-18Mn-0.6C-1.5Al и Fe-23Mn-0.3C-1.5Al в процессе холодной прокатки и отжига. При прокатке отмечается вытягивание зерен, образование деформационных полос в результате планарного скольжения, образование деформационных двойников, рост плотности дислокаций. Отжиг холоднокатаных сталей при частичном сохранении двойников деформации приводит к процессам возврата при температуре 500°C и рекристаллизации при 600-700°C.

В четвертой главе диссертации рассмотрено влияние параметров микроструктуры, формируемой холодной прокаткой и последующими отжигами, на механические свойства сталей при растяжении. Показано, что предел текучести сталей в рекристаллизованном состоянии обратно пропорционален квадратному корню из среднего размера зерна согласно закону Холла-Петча, а для расчета

упрочнения сталей в деформированном состоянии было использовано модифицированное уравнение Холла-Петча, дополнительно учитывающее вклад от накопленных дислокаций.

В пятой главе диссертации рассмотрена природа деформационного упрочнения высокомарганцевых сталей Fe-18Mn-0.6C-1.5Al и Fe-23Mn-0.3C-1.5Al. На кривых деформационного упрочнения при растяжении сталей в исходном состоянии выделены 5 хорошо различимых стадий: на 1-ой стадии не происходит образования двойников деформации, а упрочнение достигается за счет скольжения частичных и полных дислокаций; на 2-ой стадии происходит образование отдельных деформационных двойников одной системы; на 3-ей – множественное двойникование; на 4-ой стадии достигается предел измельчения зерен за счет двойникования, а на 5-ой – происходит образование микрополос сдвига шириной в несколько мкм и разрушение.

Научная новизна диссертационной работы

В диссертационной работе получен ряд оригинальных научных результатов, важных для дальнейшего развития физического металловедения и термической обработки сплавов и, в частности, высокопрочных марганцовистых сталей с возможностью реализации эффекта пластичности, наведенной двойникованием. К наиболее важным новым научным результатам относятся:

1. Прямое экспериментальное доказательство развития в сталях Fe-18Mn-0.6C-1.5Al и Fe-23Mn-0.3C-1.5Al при холодной прокатке процессов фрагментации исходных зерен на нанобласти с большеугловыми границами за счет механического двойникования (при степенях деформации $\leq 0,5$) и образования полос сдвига (при больших степенях деформации). С увеличением степени обжатия при прокатке толщина вторичных двойников не меняется, плоскости двойникования располагаются параллельно плоскости прокатки, а границы отдельных двойников сохраняют свои кристаллографические характеристики.

2. Полученное на основе выявленных пяти стадий деформационного упрочнения и последовательности структурных изменений в высокомарганцевых сталях обоснование их повышенной пластичности за счет обеспечения высокого деформационного упрочнения вплоть до разрушения, которое коррелирует с переходом к стадии пластической неустойчивости согласно критерию Консидэре.

3. Установленные весомые вклады в деформационное упрочнение в процессе холодной прокатки высокомарганцевых сталей упрочнения от образования высокоугловых границ двойников (подобно вкладу дислокационного упрочнения), фрагментации структуры на нанобласти, окруженные высокоугловыми границами, и твердорастворного упрочнения сталей за счет роста содержания углерода.

4. Обнаружение и физическое описание начала статической рекристаллизации в холодно деформируемых TWIP сталях при относительно низкой температуре 550°C после 80% обжатия при прокатке.

Практическая значимость диссертационной работы

Установленные в диссертационной работе Кусакина П.С. закономерности структурообразования и формирования механических свойств высокомарганцевых сталей были использованы для разработки режимов деформационно-термических обработок, обеспечивающих оптимальное сочетание комплекса повышенных характеристик прочности и пластичности в TWIP сталях. Указанная обработка оформлена в виде двух заявок (№ 2016117287 от 04.05.2016 и № 2016103968 от 08.02.2016) на патенты РФ. Получено также НОУ-ХАУ (№192 от 12.11.2015) на «Способ термомеханической обработки высокомарганцевой стали для применения в сейсмостойких конструкциях».

Полученные в работе результаты могут быть использованы в институтах и исследовательских центрах: ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН, ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, ФГУП ЦНИИЧермет, а также на металлургических предприятиях – ЧМК «Северсталь», АО «Мечел», АО «Металлургический завод «Электросталь», ВМК «Красный октябрь», Златоустовский металлургический завод, ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат».

Достоверность полученных результатов

Достоверность и обоснованность положений и выводов диссертации основана на применении таких взаимодополняющих современных аналитических методов исследований структуры как просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия с методикой дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), рентгеноструктурный анализ и оптическая микроскопия с использованием цифрового микроскопа; проведением механических испытаний на растяжение и измерений микротвердости по соответствующим ГОСТам. Приведенные в диссертационной работе результаты исследований, полученные с использованием различных методик, достаточно хорошо согласуются между собой и не противоречат известным научным представлениям и результатам. Полученные экспериментальные данные обсуждены на основе общепринятых положений современного физического материаловедения.

Оформление диссертации, публикации и апробация

Диссертация логично построена, структура и содержание соответствуют цели и задачам исследования. Результаты работы опубликованы в 18 научных работах (включая 8 статей в журналах из Перечня ВАК, 2 заявки на изобретение и 1 НОУ-ХАУ) и прошли апробацию на 14 международных и российских конференциях. Автореферат диссертации и публикации правильно и полно отражают содержание работы.

Замечания по диссертационной работе

1. Представляется не вполне правильным использование термина «термомеханическая обработка» для схемы, включающей деформацию прокаткой

с последующим отжигом. Фактически это деформационно-термическая или механо-термическая обработка. Термомеханическая обработка в классическом понимании включает деформацию в процессе нагрева (НТМО и ВТМ). Отсутствие в списке литературы диссертации ссылок на работы основоположников термомеханической обработки В.Д. Садовского и М.Л. Бернштейна с соавторами подтверждает справедливость данного замечания.

2. В диссертации не рассмотрены развитие планарного скольжения, а также механизмы ближнего порядка и взаимного перераспределения атомов углерода и марганца в высокомарганцевых сталях с повышенным содержанием алюминия.

3. Не ясно, в чем заключается новизна утверждения «Двойники деформации сохраняются в структуре вплоть до начала рекристаллизации» в пункте 4 раздела «Научная новизна»?

4. В главах диссертации и автореферате не обсуждается материал, представленный в двух Заявках на патенты и НОУ-ХАУ, кроме упоминания об указанных результатах интеллектуальной собственности в разделе «Практическая значимость» и списке публикаций диссертанта. Отсутствуют какие-либо акты по использованию диссертационной работы.

5. К сожалению, в диссертации содержатся отдельные ошибки, неточности, пропуски, например, в подписи к рис. 3.10 ничего не сказано о структурах на рисунках «в» и «г».

Однако сделанные частные замечания к работе не снижают общего положительного впечатления от диссертации, а также ее научной и практической ценности.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа Кусакина П.С. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований и их интерпретации получены новые результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение важной, имеющей значение для развития металловедения и термической обработки сталей задачи оптимизации условий формирования методами комбинированной деформационно-термической обработки в высокомарганцевых TWIP сталях структурного состояния, обеспечивающего повышенные характеристики прочности и пластичности.

Работа выполнена на высоком научном уровне. Выводы и результаты обоснованы и достоверны. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Тематика выполненных исследований соответствует паспорту специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (п. 2 «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях», п. 3 «Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические,

технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов.», п. 6 «Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химикотермической, термомеханической и других видов обработок, связанных с термическим воздействием, а также специализированного оборудования»).

В целом, по актуальности и уровню решения поставленных задач, объему выполненных исследований, научной новизне, достоверности, практической значимости полученных результатов и выводов диссертационная работа Кусакина П.С. «Влияние термомеханической обработки на структуру и механическое поведение высокомарганцевых сталей» соответствует критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор – Кусакин Павел Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Отзыв составлен на основании ознакомления с текстом диссертации и автореферата, а также заслушанного доклада Кусакина П.С., представленного в ИФМ УрО РАН на объединенном семинаре лабораторий механических свойств, физического металловедения, цветных сплавов, прецизионных сплавов и интерметаллидов ИФМ УрО РАН 27 января 2017 г.

Заведующий отделом материаловедения и
лабораторией механических свойств
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт физики металлов
имени М.Н. Михеева Уральского отделения
Российской академии наук,
доктор технических наук



Макаров Алексей Викторович

620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18, ИФМ УрО РАН
Тел. (343) 378-36-40 e-mail: avm@imp.uran.ru

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Ученого совета ИФМ УрО РАН
(Протокол № 2 от 8 февраля 2017 г.).

Ученый секретарь ИФМ УрО РАН,
канд. физ.-мат. наук



Суркова Т.П.