

М 421336

**МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н. Э. БАУМАНА**

На правах рукописи

КУЗИН ОЛЕГ АНАТОЛЬЕВИЧ

УДК 621. 789

**МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ УЛУЧШАЕМЫХ
БОРСОДЕРЖАЩИХ СТАЛЕЙ
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ПРОКАЛИВАЕМОСТИ
И КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ**

**Специальность 05. 16. 01— металлведение
и термическая обработка металлов**

м.п.
А в т о р е ф е р а т
**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва—1984

Работа выполнена в Львовском ордена Ленина политехническом институте имени Ленинского Комсомола.

Научный руководитель:
заслуженный работник высшей школы УССР, кандидат технических наук, доцент Фетисова М. М.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Васильева А. Г.
кандидат технических наук, старший научный сотрудник Клыпин Б. А.

Ведущее предприятие — производственное объединение «Киевпромарматура».

Защита диссертации состоится « 17 » декабря 1984 года на заседании специализированного совета К 053. 15. 13 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва Б-5, 2-я Бауманская улица, дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени Н. Э. Баумана.

Ваш отзыв в 1-м экземпляре, заверенный печатью, просим направлять по указанному адресу.

Авторефер

да.

спе

НИКИТИН

М421336



1421336

Кузин О. А. Микролегирующие

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В решениях XXVI съезда КПСС указывается на необходимость повышения эксплуатационных характеристик сталей, создание новых конструкционных материалов, увеличение выпуска качественной металлопродукции, упрочняемой термической обработкой. При этом первоочередными становятся вопросы рационального использования стали и легирующих элементов.

Перспективным направлением, позволяющим экономить дорогостоящие металлы, получать при термической обработке одинаковые по сечению механические свойства, является микролегирование сталей бором и другими элементами с высокой химической активностью по отношению к железу и примесям стали. Однако в ряде случаев при термической обработке наблюдается снижение конструктивной прочности боросодержащих сталей. Поэтому их применение для изготовления деталей, подвергаемых закалке и высокому отпуску, требует дальнейшего изучения влияния микродобавок на свойства, структуру, фазовый состав и склонность к охрупчиванию сталей. В настоящее время считается общепризнанным, что свойства, определяющие работоспособность высокоотпущенных сталей, зависят от степени легирования α -твердого раствора, типа карбидной фазы, состояния и химического состава приграничных зон зерен. Ослабление прочности межзеренной связи приводит к резкому снижению сопротивления хрупкому разрушению сталей. Следовательно, установление закономерностей охрупчивания границ зерен, выяснение роли микродобавок в этих процессах является актуальным и необходимым для разработки научно-обоснованных рекомендаций по устранению зернограничного разрушения и повышению комплекса свойств улучшаемых сталей.

Цель работы и задачи исследований. Основная цель работы — изучение природы влияния малых добавок элементов на конструктивную прочность и развитие обратимой отпускной хрупкости простых углеродистых и легированных сталей, а также разработка комплексного микролегирования для повышения прокаливаемости, сопротивления хрупкому разрушению и усталости среднеуглеродистых боросодержащих сталей после закалки и высокого отпуска.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

— изучить влияние бора на прокаливаемость, конструктивную прочность и процессы охрупчивания простых углеродистых и леги-



M 42 1336

рованных сталей в улучшенном состоянии;

- определить роль условий выплавки в формировании структуры, свойств и распределении легирующих элементов при отпуске сталей, микролегированных бором;

- выявить закономерности изменения прокаливаемости, конструктивной прочности и склонности к обратимой отпускной хрупкости борсодержащих сталей при введении малых добавок редкоземельных металлов и молибдена;

- изучить влияние бора, редкоземельных металлов и молибдена на структурное состояние и химический состав приграничных зон зерен и роль последних в процессах деформации и разрушения сталей;

- установить связь между структурным состоянием и характером разрушения сталей с микродобавками;

- разработать рекомендации по повышению прокаливаемости и сопротивления хрупкому разрушению борсодержащих сталей после закалки и высокого отпуска.

Научная новизна. В результате проведенных исследований установлены закономерности изменения прокаливаемости, механических свойств, склонности к хрупкому разрушению и малоциклового усталости сталей при введении малых добавок бора, РЗМ, циркония и молибдена. При этом определена роль легирования хромом и марганцем в формировании свойств борсодержащих сталей.

Впервые с помощью методов локального физико-химического анализа и электронной микроскопии выявлены причины уменьшения сопротивления хрупкому разрушению сталей, микролегированных бором, после закалки и высокого отпуска, показана связь между структурными изменениями при отпуске и характером разрушения сталей. Экспериментально установлено, что повышение стабильности дислокационной структуры простых углеродистых сталей и развитие структурной и химической неоднородности в пределах зерна после закалки и отпуска легированных сталей при введении бора приводит к увеличению размеров фасеток скола и появлению межзеренного излома. Обнаружено явление неоднородного распределения легирующих элементов и карбидов при отпуске и охрупчивающей обработке борсодержащих сталей.

С помощью количественной оценки вклада различных микромеханизмов в процесс разрушения в условиях, наиболее способствующих зернограничному сколу, выявлено влияние микродобавок на долю межзеренного излома сталей. Впервые показано, что введение

бора способствует межзеренному разрушению улучшаемых сталей, а добавки РЗМ, циркония и молибдена уменьшают долю межзеренного излома борсодержащей стали. Это обусловлено повышением однородности распределения легирующих элементов и карбидов в структуре, изменением состояния межзеренных поверхностей и межфазных границ, снижением их охрупчивания при отпуске.

Практическая ценность и реализация в промышленности. Практическая ценность работы заключается в повышении эксплуатационной надежности и работоспособности деталей, изготовленных из сталей, микролегированных бором, после закалки и высокого отпуска, что является особенно важным для расширения области применения борсодержащих сталей в промышленности.

Разработана и апробирована в заводской практике технология микролегирования, обеспечивающая повышение однородности структуры и сопротивления хрупкому разрушению литых фланцев устьевой арматуры, а также прокаливаемости и технологической пластичности пружинной проволоки. При этом достигается снижение брака при изготовлении деталей, повышается эффективность проведения термической обработки в производственных условиях, коэффициент использования металла и качество металлоизделий.

Разработана новая сталь типа 40ХГМР с повышенной прокаливаемостью и сопротивлением хрупкому разрушению, содержащая молибден и цирконий, которые предотвращают образование специальных карбидов, обогащение границ зерен примесями, межзеренное разрушение высокоотпущенной борсодержащей стали. Разработано также микролегирование алюминием борсодержащей пружинной стали 70, повышающее ее технологическую пластичность и долговечность. Предложенные технические решения защищены авторскими свидетельствами.

Новые борсодержащие стали внедрены на Бориславском экспериментальном литейно-механическом заводе и Белорецком металлургическом комбинате им. М.И.Калинина с экономическими эффектами соответственно 32 802 и 107 080 рублей в год.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на всесоюзных научно-технических конференциях "Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий" (сентябрь 1980, г.Запорожье), "Термическая и термомеханическая обработка стали - важнейший резерв экономии металла" (сентябрь 1981, г.Днепропетровск), "Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки

для повышения надежности и долговечности изделий" (сентябрь 1983, г.Запорожье); на всесоюзных и республиканских научно-технических семинарах "Новое в металлведении и термообработке конструкционных сталей и специальных сплавов" (октябрь 1978, г.Челябинск), "Излом и хрупкость стали и сплавов" (февраль 1982, г.Киев), "Термическая обработка стали и сплавов (февраль 1983, г.Киев), "Новые технологические решения по повышению качества стали" (май 1983, г.Киев); на XXXIV-XI конференциях Львовского политехнического института.

Публикации. По материалам диссертации имеется 10 публикаций.

В работе защищаются:

1. Выявленные закономерности влияния микродобавок бора, РЗМ, циркония и молибдена на структуру, свойства и характер разрушения улучшаемых сталей, в частности:

- результаты определения прокаливаемости борсодержащих сталей в зависимости от условий выплавки, содержания углерода и легирующих элементов;
- данные электронно-микроскопических, микрорентгеноспектральных, рентгеноструктурных исследований микроструктуры, приграничных зон зерен и процессов карбидообразования при отпуске сталей;
- установленные особенности разрушения сталей, микролегированных бором, редкоземельными металлами, цирконием и молибденом после удущения, а также охрупчивающей обработки;
- вывод о том, что в условиях хрупкого разрушения доля межзеренного излома с повышением температуры возрастает;
- обнаруженное явление влияния химического и фазового состава приграничных зон зерен на интеркристаллитное разрушение микролегированных сталей.

2. Предложенные аспекты механизма влияния добавок бора, редкоземельных металлов, циркония и молибдена на склонность к хрупкому разрушению и работоспособность простых углеродистых и легированных сталей после закалки и высокого отпуска.

3. Рекомендации по повышению прокаливаемости и конструктивной прочности улучшаемых борсодержащих сталей:

- микролегирование, обеспечивающее уменьшение склонности к межзеренному разрушению сталей с бором в высокоотпущенном состоянии;
- установленные преимущества новых экономнолегированных борсодержащих сталей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка цитируемой литературы, включающего 174 библиографических источника, и приложений; содержит 120 страниц машинописного текста, 64 рисунка, 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен обзор современных исследований по вопросу микролегирования улучшаемых конструкционных сталей. Отмечено, что в настоящее время значительное внимание исследователей и производителей привлекает бор, при введении которого в наибольшей степени повышается прокаливаемость сталей. Однако широкое применение борсодержащих сталей ограничивается малой изученностью природы влияния микродобавок на сопротивление хрупкому разрушению, склонность к развитию обратной отпускной хрупкости, строение и состав приграничных зон зерен и их роли в межзеренном разрушении сталей. Анализ литературных данных показал, что повышение прокаливаемости и склонности к хрупкому разрушению микролегированных сталей после закалки и высокого отпуска зависит от условий их выплавки, химического состава, термической обработки, в связи с чем изучение механизма охрупчивания борсодержащих сталей с целью его устранения является основной задачей работы.

Во второй главе рассмотрены материалы и методика исследования. В работе изучены простые углеродистые и легированные хромо-марганцевые стали с добавками бора, редкоземельных металлов, циркония и молибдена, химический состав которых приведен в табл. I. Выплавку сталей в лабораторных условиях производили в индукционной печи емкостью 60 кг. В промышленных условиях стали выплавляли в 150-тонной мартеновской печи и 1,5-тонной дуговой печи, разливали соответственно в 2- и 0,25-тонные слитки. Объекты исследования (прутки, образцы, проволока) изготавливали по обычной технологической схеме.

Образцы подвергали закалке с нагревом в соляной ванне до нормальных температур и последующему отпуску при 600°C с охлаждением в воде. Для части образцов проводили вторичный (охрупчивающий) отпуск при $470\text{--}570^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч. с последующим медленным охлаждением.

Структуру сталей и строение их изломов изучали на оптическом и электронных микроскопах. Для определения влияния малых добавок на химический состав приграничных зон зерен проводили

Таблица I

Химический состав исследованных сталей

Марка стали	Содержание элементов, мас. %													Примечание
	C	Si	Mn	Cu	Ni	Mo	S	P	Al	Ti	P3M	B	Zr	
30ХР	0,32	0,35	0,62	1,05	0,10	-	0,022	0,020	0,05	0,02	-	0,004	-	Введено 0,15% мишметалла
	0,30	0,32	0,56	0,95	0,11	-	0,021	0,018	0,03	0,02	0,025	0,003	-	Введено 0,25% мишметалла
	0,31	0,31	0,56	0,90	0,10	-	0,020	0,018	0,02	0,02	0,046	0,003	-	мишметалла
40ХГ	0,42	0,32	0,81	0,96	0,12	-	0,012	0,010	0,03	0,02	-	-	-	
	0,41	0,42	0,73	1,01	0,10	-	0,014	0,010	0,03	0,03	-	0,002	-	
	0,40	0,38	0,77	0,95	0,11	-	0,012	0,010	0,06	-	-	0,003	-	Введено 0,15% мишметалла
40ХГР	0,41	0,41	0,82	1,00	0,11	-	0,012	0,010	0,03	0,02	0,023	0,002	-	Введено 0,15% призеодима
	0,40	0,35	0,76	0,96	0,11	-	0,010	0,010	0,04	0,02	0,020	0,002	-	
	0,41	0,42	0,80	0,90	0,10	-	0,012	0,010	0,02	0,01	-	0,002	0,03	
40ХГМР	0,39	0,35	0,76	0,90	0,10	0,19	0,012	0,010	0,06	0,01	-	0,003	-	Содержание нио- бин в стали 0,02%
	0,38	0,40	0,80	0,92	0,10	0,17	0,025	0,022	0,04	-	-	0,002	0,02	
40	0,38	0,35	0,38	0,02	0,11	-	0,010	0,008	0,03	-	-	-	-	
40Р	0,40	0,33	0,42	0,02	0,11	-	0,012	0,009	0,04	0,02	-	0,0025	-	
70	0,70	0,26	0,36	0,02	0,12	-	0,010	0,009	0,02	-	-	-	-	
	0,69	0,24	0,30	0,02	0,11	-	0,009	0,008	0,04	0,01	-	0,0015	-	Содержание азота в стали 0,004%
	0,69	0,22	0,45	0,20	0,10	-	0,022	0,013	0,04	-	-	0,0015	-	

химический и рентгеноструктурный анализ анодного осадка, локальный рентгеноспектральный анализ и эмиссионный спектральный анализ с помощью высокочастотных искровых разрядов. Применение методов количественной фрактографии и электронографических исследований частиц, экстрагированных с изломов с помощью одноступенчатых реплик, позволило выявить роль микродобавок в процессах деформации и разрушения сталей. В работе определяли также прокаливаемость, твердость после термической обработки, механические свойства, малоцикловую выносливость и склонность к хрупкому разрушению сталей.

В третьей главе представлены результаты исследований влияния микродобавок бора и вводимых совместно с ним элементов на прокаливаемость, механические свойства, сопротивление хрупкому разрушению и малоцикловую усталость улучшаемых сталей. Показано, что с увеличением содержания углерода от 0,4% до 0,7% коэффициент усиления прокаливаемости за счет введения бора снижается с 1,89 до 1,30. При введении хрома и марганца влияние бора на прокаливаемость сталей также уменьшается, а при наличии РЗМ и молибдена увеличивается. Анализ полученных данных подтвердил, что повышение прокаливаемости при введении бора наблюдается при наличии в стали алюминия и титана, которые предотвращают образование оксидов и нитридов бора. Но добавки титана снижают обрабатываемость и сопротивление хрупкому разрушению сталей, поэтому в работе с целью усиления влияния бора на прокаливаемость изучали стали без титана или с его очень малым количеством (до 0,02%). Наибольшее повышение прокаливаемости отмечено при комплексном микролегировании бором и цирконием, в присутствии которых критический диаметр возрастает в 2,1 раза.

Микролегирование бором не оказывает существенного влияния на прочностные и пластические характеристики сталей после закалки и высокого отпуска. В то же время, как у простых углеродистых сталей 40 и 70, так и у низколегированных типа 40ХГ сопротивление хрупкому разрушению при введении бора уменьшается, причем у простых углеродистых сталей в меньшей степени, чем у легированных. Например, смещение порога хладноломкости (T_{50}) в сторону высоких температур у стали 40 при введении бора в 2 раза меньше, чем у стали 40ХГ (табл.2). С увеличением содержания углерода отрицательное влияние бора на процессы охрупчивания усиливается.

В связи с тем, что уменьшение сопротивления хрупкому раз-

рушению при введении бора проявляется в большей степени в сталях, содержащих хром и марганец, в работе особое внимание уделялось изучению влияния микродобавок на процессы охрупчивания легированных сталей.

В процессе исследования установлено, что при введении РЗМ и циркония механические свойства борсодержащей стали меняются незначительно. Наибольшее влияние вводимые добавки оказывают на склонность сталей к хрупкому разрушению. При наличии в стали 40ХГР оптимального количества мншметалла повышается ударная вязкость при отрицательных температурах и порог хладноломкости сдвигается в сторону низких температур. Как, например, с введением празеодима порог хладноломкости смещается на $20-25^{\circ}\text{C}$. Наиболее эффективное положительное действие оказывает молибден, присутствие которого повышает ударную вязкость при отрицательных температурах и приводит к сдвигу порога хладноломкости борсодержащей стали в сторону низких температур на $40-45^{\circ}\text{C}$.

Добавки редкоземельных металлов и циркония увеличивают длину зоны стабильного роста трещины в образцах борсодержащей стали. Особо следует отметить влияние циркония и празеодима. Значения температуры полухрупкости, определяемой по проценту вязкой составляющей в изломах сталей с цирконием и празеодимом, отличаются незначительно. В то же время длина зоны стабильного роста трещины в стали с празеодимом на 80-100% больше, что свидетельствует о более высокой работоспособности стали. По влиянию на повышение сопротивления хрупкому разрушению борсодержащей стали в улучшенном состоянии вводимые добавки можно расположить в следующем порядке: молибден, празеодим, цирконий, мншметалл.

Наибольшую склонность к развитию обратимой отпускной хрупкости проявляют стали с добавками бора, причем охрупчивание усиливается при повышении содержания углерода, а также в присутствии хрома и марганца. Так, у стали 40ХГР после охрупчивающего отпуска порог хладноломкости смещается в сторону высоких температур на $30-35^{\circ}\text{C}$, что на $10-15^{\circ}\text{C}$ больше, чем для стали 40Р. Введение мншметалла, празеодима и циркония повышает ударную вязкость и смещает порог хладноломкости стали 40ХГР после охрупчивающего отпуска в сторону низких температур соответственно на $10-15^{\circ}\text{C}$, $23-28^{\circ}\text{C}$, $30-35^{\circ}\text{C}$. Но наиболее интенсивно снижает склонность к охрупчиванию добавка молибдена. Длина зоны стабильного роста трещины охрупченных сталей изменяется аналогично порогу

хладноломкости, определенному по проценту вязкой составляющей в изломе.

Четвертая глава посвящена исследованиям влияния микролегирования на строение изломов образцов сталей.

Изменение сопротивления хрупкому разрушению при введении малых добавок связано с их влиянием на способность элементов структуры к микролокальной деформации и характер разрушения сталей. Электронно-микроскопические исследования показали, что поверхность макрохрупкой зоны изломов ударных образцов исследуемых сталей состоит из участков транскристаллитного скола, микровязкого и межзеренного изломов. Обработка микрофрактограмм методами математической статистики позволила выявить, что у образцов сталей 40, 40ХГ и 70 разрушение имеет преимущественно транскристаллитный характер. Введение бора уменьшает долю микровязкого разрушения, способствует появлению интеркристаллитного излома, причем в наибольшей степени в стали 40ХГ (табл.2). Кроме того, микродобавки бора увеличивают размер фасеток скола в изломе исследуемых образцов, особенно у простых углеродистых сталей.

При введении редкоземельных металлов в изломе борсодержащих сталей появляются участки микровязкого разрушения с ямками, расположенными вдоль гребней отрыва. Площадь, занимаемая этими участками, в стали с добавками празеодима больше, чем в стали с мншметаллом. Введение циркония не оказывает существенного влияния на строение фасеток хрупкого скола, но увеличивает количество участков микровязкого разрушения. Легирование молибденом уменьшает долю макрохрупкой составляющей и межзеренного разрушения в изломе борсодержащей стали.

Исследования изломов ударных образцов с использованием одноступенчатых угольных реплик выявили, что карбиды в сталях без добавок, а также с добавками бора и редкоземельных металлов имеют размеры до 0,5 мкм и распределены неравномерно. При наличии в стали циркония и молибдена карбидные частицы в изломе распределены более равномерно и размеры их значительно меньше (до 0,1 мкм).

Путем статистической оценки участков изломов с различными микромеханизмами разрушения обнаружено уменьшение размеров фасеток транскристаллитного скола в изломах борсодержащих сталей при введении редкоземельных металлов, циркония и молибдена. Для стали 40ХГР характерно наличие фасеток размером 8-12 мкм, в

изломе стали с добавками редкоземельных металлов чаще обнаруживаются фасетки размером 4–8 мкм, а при добавлении циркония – 2–6 мкм. Наименьший размер фасеток у барсодержащей стали, легированной молибденом.

Таблица 2

Влияние микрولةгирования на критическую температуру хрупкости и соотношение между структурными составляющими макрорупного участка излома сталей в улучшенном состоянии и после охрупчивающей обработки

Марка стали	T ₅₀ , °C	T _{исп} , °C	Доля структурных составляющих макрорупного участка излома, %		
			микровязкий излом	транскристаллитный скол	межзеренный излом
40ХГ	-50	-40	9,2±1,6	80,8±1,5	10,0±1,2
	-38	-20	14,5±2,1	27,2±2,1	58,3±2,0
40ХГР	-30	-20	7,8±1,3	74,2±1,0	18,0±1,6
	-13	0	6,5±1,5	10,0±1,3	83,5±2,2
40ХГР с РЗМ (мишметаллом)	-42	-30	12,0±1,4	75,8±1,4	13,2±1,3
	-26	-5	14,0±1,7	16,6±1,6	69,6±1,8
40ХГР с празеодимом	-52	-40	14,5±1,2	75,3±1,6	10,2±1,4
	-39	-20	16,5±1,5	22,2±2,0	61,3±2,0
40ХГР с цирконием	-55	-40	15,2±1,5	77,2±1,5	7,6±1,3
	-42	-10	20,8±1,8	26,0±1,8	53,2±2,1
40ХГР с молибденом	-72	-60	11,6±1,4	83,2±1,8	5,2±1,6
	-60	-40	19,3±1,2	39,4±1,7	41,3±1,9

Примечание: В числителе приведены данные для сталей в вязком состоянии, в знаменателе – в охрупченном.

Развитие обратной отпускной хрупкости способствует уменьшению когезивной прочности в приграничных зонах зерен и появлению межзеренного излома в условиях крупного разрушения сталей. В связи с тем, что при испытаниях образцов не всегда реализуются структурно-механические условия, способствующие зернограничному разрушению, изучалось влияние температуры испытания на количественное соотношение между участками транскристаллитного, межзеренного и микровязкого разрушения стали 40ХГ в вязком и

охлажденном состоянии. При повышении температуры испытания доля межзеренного разрушения в хрупком изломе увеличивается. Степень охрупчивания не оказывает существенного влияния на долю микровязкого излома, но увеличивает процент межзеренного и снижает процент транскристаллитного разрушения.

Используя полученные зависимости доли межзеренного излома от температуры испытания сталей, влияние микродобавок на зернограничное разрушение определяли в условиях, наиболее способствующих зернограничному сколу. На основании результатов исследования образцов, имеющих менее 15% макрохрупкой составляющей в изломе, установлено наибольшее (до 84%) увеличение доли межзеренного разрушения после охрупчивающего отпуска в стали, микролегированной бором. При введении редкоземельных металлов, циркония и молибдена доля межзеренного излома уменьшается, но увеличивается количество транскристаллитного скола (табл.2). В простых углеродистых сталях площадь участков межзеренного излома после охрупчивающего отпуска составляет 6-10%.

Изучение межзеренных изломов выявило в стали с добавками бора наличие неоднородных по величине и форме карбидных частиц. При введении молибдена плотность карбидных частиц и их следов на межзеренных изломах борсодержащей стали уменьшается.

Приводятся данные, подтверждающие, что влияние малых добавок элементов на характер разрушения простых углеродистых и легированных сталей имеет различную природу. Уменьшение сопротивления хрупкому разрушению при микролегировании бором сопровождается в простых углеродистых сталях укрупнением фасеток скола, а в легированных - появлением межзеренного излома. Введение редкоземельных металлов, циркония и молибдена способствует уменьшению размеров фасеток скола и поверхности межзеренного разрушения в изломе высокоотпущенной борсодержащей стали.

В пятой главе рассмотрено изменение структуры, химического и фазового состава приграничных зон зерен при введении бора и других добавок и их влияние на межзеренное разрушение сталей. Показано, что наблюдаемые закономерности изменения механических свойств при статическом нагружении, малоциклового выносливости и сопротивления хрупкому разрушению обусловлены влиянием микродобавок на сорбитную структуру исследуемых сталей, в которой карбиды Me_3C ориентированы по кристаллографическим плоскостям ферритной матрицы. При введении бора повышается плотность глобулярных и пластинчатых карбидных частиц в приграничных зо-

нах зерен легированных сталей. В борсодержащей стали с добавками редкоземельных металлов карбидные выделения распределены в основном равномерно. В стали с цирконием практически не наблюдается преимущественного расположения карбидной фазы у границ зерен борсодержащей стали. Наибольшее влияние на процессы выделения и коагуляции карбидов, устойчивость стали против отпуска оказывает молибден. В структуре стали, легированной молибденом, возрастает дисперсность карбидов, равномерность в их распределении и степень кристаллографической ориентации по ферриту.

Вторичный отпуск и медленное охлаждение сталей способствует неравномерному выделению карбидных частиц, обособлению их по границам зерен. Добавки бора интенсифицируют эти процессы, а введение редкоземельных металлов, циркония и молибдена уменьшает степень развития неоднородности приграничной зоны зерна.

Изменение фазового и химического состава приграничных зон зерен сталей при введении малых добавок элементов подтверждается также результатами микрорентгеноспектрального анализа. Добавки бора приводят к неоднородному распределению легирующих элементов, повышению концентрации хрома вблизи границ зерен стали 40ХГ как в вязком, так и в охрупченном состоянии, что объясняется различной скоростью карбидообразования при отпуске в объеме и у границ зерен. Поэтому общая концентрация хрома, т.е. его содержание в феррите и карбидах, будет выше в приграничных зонах, чем во внутренних объемах зерна. Добавки редкоземельных металлов, циркония и молибдена способствуют более равномерному распределению хрома в пределах зерна.

Электроннографические исследования частиц, экстрагированных с хрупких изломов, выявили в стали 40ХГ в вязком состоянии карбиды типа Me_3C , а после охрупчивающего отпуска — Me_7C_3 . Микролегирование бором приводит к появлению в изломах сталей фаз с повышенным содержанием хрома. В стали 40ХГР после закалки и высокого отпуска присутствуют карбиды типа Me_7C_3 , после охрупчивания на поверхности межзеренных изломов выявлено наличие карбидов Me_7C_3 , $Me_{23}C_6$, а также боридов Cr_23B_3 , у которых степень физического несоответствия с ферритной матрицей больше, чем у цементита. В изломах сталей, легированных молибденом, встречаются карбиды типа Me_3C . Результаты эмиссионного спектрального анализа изломов позволили установить влияние карбидообразующих элементов на межзеренное разрушение сталей. Образование карбидов на границах зерен и последующее разрушение по межфаз-

ным поверхностям (карбид-матрица) снижает концентрацию углерода, хрома и марганца в изломе борсодержащей стали после охрупчивающей обработки. При введении редкоземельных металлов и молибдена роль поверхности раздела зернограницный карбид-матрица в межзеренном разрушении сталей с бором становится меньше.

Полученные результаты показали, что повышение степени обогащения приграничных зон легирующими элементами, появление вблизи границ зерен специальных карбидов способствует увеличению поверхности межзеренного разрушения в образцах исследуемых сталей.

Микролегирование борсодержащей стали позволяет регулировать фазовый состав, распределение и дисперсность структурных составляющих, состояние межзеренных поверхностей и межфазных границ и снижать степень охрупчивания стали при отпуске.

На основании результатов исследований сделан выбор оптимального химического состава с целью повышения эксплуатационной надежности простых углеродистых и легированных борсодержащих сталей после закалки и высокого отпуска. Выявлено, что введение бора замедляет перестройку дислокационной структуры, процессы полигонизации и рекристаллизации α -фазы при отпуске. Это приводит к снижению сопротивления хрупкому разрушению, увеличению размеров фасеток скола, особенно в стали 70, которая используется при производстве закаленно-отпущенной проволоки, предназначенной для изготовления пружин методом холодной навивки. Кроме того, введение совместно с бором титана уменьшает пластичность и усталостную прочность этой стали вследствие образования нитридов TiN .

Разработанная нами сталь (а.с. № 985128) с повышенной прокаливаемостью и технологической пластичностью обеспечивает равномерность механических свойств по длине проволоки (отсутствие участков непрокала), а также уменьшает брак при навивке пружин и разрушение их в условиях эксплуатации. Введение малых добавок элементов с учетом установленного отношения между количеством бора, алюминия и азота (отношение содержания бора к азоту не менее 0,25, а содержания бора к алюминию не менее 0,05) обеспечивало эффективное раскисление стали и оптимальное содержание бора в твердом растворе. В результате при заданном уровне прокаливаемости и прочности технологическая пластичность стали повышается и порог хладноломкости смещается в сторону низких температур. С помощью определения эффекта Баушингера показано,

что повышение пластичности и сопротивления хрупкому разрушению предложенной стали связано с увеличением числа легкоподвижных дислокаций вследствие уменьшения содержания атомов внедрения в решетке α - твердого раствора.

Добавки бора слабо влияют на дислокационную структуру при отпуске легированных сталей, но в результате развития химической и структурной неоднородности свойства локальных объемов внутри зерен и вблизи границ значительно различаются, что приводит к появлению межзеренного разрушения. Устранения межзеренного разрушения в легированных борсодержащих сталях добивались, регулируя процессы карбидообразования на границах зерен при отпуске, путем уменьшения содержания хрома, а также введения молибдена и циркония.

Порог хладноломкости высокоотпущенной борсодержащей стали с 0,6% хрома смещался в сторону низких температур на 25-30°C по сравнению с порогом у стали, содержащей 1,01% хрома. При этом в изломе повышается доля микровязкого разрушения, измельчаются фасетки скола, поверхность межзеренного разрушения после охрупчивающей обработки уменьшается на 30-35%.

Следует отметить, что хромомарганцевые стали типа 40ХГР имеют недостаточную прокаливаемость для получения однородной мартенситной структуры по сечению деталей толщиной до $70 \cdot 10^{-3}$ м. Кроме того, при медленном охлаждении после отпуска в этих сталях в значительной степени развиваются процессы охрупчивания, снижающие эксплуатационную надежность деталей, особенно при низких температурах. Поэтому с целью повышения прокаливаемости, ударной вязкости, уменьшения склонности к обратимой отпускной хрупкости была разработана борсодержащая сталь (а.с. №1073323) с добавками циркония и молибдена, которые обеспечивают присутствие бора в составе твердого раствора, предотвращают выделение специальных карбидов на границах и уменьшают склонность стали к межзеренному разрушению. Предложенная сталь отличается повышенной прокаливаемостью и ударной вязкостью (расстояние от закаленного торца до полумартенситной зоны возрастает до $28 \cdot 10^{-3}$ м, а величина KCV при температуре испытания -40°C на 0,3 МДж/м²).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

I. Установлено, что бор, повышая прокаливаемость, не оказывает существенного влияния на прочность исследуемых сталей пос-

де закалки и высокого отпуска, но уменьшает их сопротивление хрупкому разрушению. Введение бора увеличивает склонность к отпускной хрупкости, смещает порог хладноломкости в сторону высоких температур, уменьшает ударную вязкость, длину зоны стабильного роста трещины и циклическую прочность легированных сталей в большей степени, чем простых углеродистых.

2. Добавки редкоземельных металлов, циркония и молибдена положительно влияют на свойства борсодержащих сталей: уменьшают степень охрупчивания при отпуске, смещают порог хладноломкости в сторону низких температур, повышают ударную вязкость и циклическую прочность.

3. Впервые показано, что вводимые микродобавки значительно влияют на строение излома и механизм разрушения сталей. При наличии хрупкого излома процент межзеренного разрушения сталей зависит от температуры испытания – с повышением температуры он возрастает, особенно при наличии бора.

4. Выявлено, что основной причиной снижения прочности межзеренной связи исследуемых сталей является развитие при отпуске химической и структурной неоднородности в пределах зерна. Бор способствует более интенсивному перераспределению элементов и развитию химической неоднородности, особенно после охрупчивающей обработки. Добавки редкоземельных металлов и молибдена затрудняют процесс перераспределения элементов, повышают однородность структуры стали.

5. Установлено, что бор способствует неравномерному распределению карбидов по границам зерен и субзерен, переходу хрома в зернограницные карбиды и образованию специальных карбидов. В результате происходит обеднение приграницных зон углеродом и легирующими элементами, что облегчает миграцию примесных элементов к границам зерен и способствует ослаблению прочности межзеренной связи. Следовательно, микролегирование борсодержащей стали, особенно комплексное, позволяет регулировать состав, распределение и дисперсность карбидов, состояние межзеренных поверхностей и межфазных границ и тем самым снижать охрупчивание сталей при высоком отпуске.

6. На основании установленных в работе закономерностей предложены практические рекомендации по повышению прокаливаемости, сопротивления хрупкому разрушению и эксплуатационной надежности борсодержащих сталей после закалки и высокого отпуска.

Разработаны экономнолегированные стали с повышенной прока-

ливаемостью, пластичностью, сопротивлением хрупкому разрушению и внедрены в производство с экономическим эффектом 139 тыс.руб.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Фетисова М.М., Кузин О.А. Влияние добавок РЗМ на свойства стали 30ХР.- В кн.: Вестник Львовского политехн.ин-та. Доклады и научные сообщения, №137. Львов:Вища школа, 1979, с.34-36.
2. Фетисова М.М., Кузин О.А., Коврова Т.П. Влияние отпускной хрупкости на малоцикловую выносливость стали 40Х.- В кн.: Термическая обработка металлов, №3. М.:Металлургия, 1979, с. 94-95.
3. Фетисова М.М., Кузин О.А. Влияние микролегирования бором на свойства улучшаемых сталей.- В кн.: Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий. Тез.докл. Всесоюзн.науч.-техн.конф. Запорожье: Коммунар, 1980, с.91-92.
4. Фетисова М.М., Кузин О.А. Влияние микролегирования бором и РЗМ на отпускную хрупкость среднеуглеродистых конструкционных сталей.-В кн.: Проблемы термической и термомеханической обработки стали. Тез.докл. Всесоюзн.науч.-техн.конф. Днепропетровск: ИЧМ, 1981, с.97-98.
5. Фетисова М.М., Кузин О.А. Влияние микролегирования бором и церием на свойства пружинной стали.-В кн.: Вестник Львовского политехн.ин-та. Технология машиностроения и динамическая прочность машин, №156, Львов: Вища школа, 1981, с.99-101.
6. Фетисова М.М., Кузин О.А. Влияние термической обработки на характер разрушения сталей, микролегированных бором и РЗМ.-В кн.: Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий. Тез.докл. II Всесоюз.науч.-техн.конф. Запорожье: Коммунар, 1983, с.129.
7. Фетисова М.М., Кузин О.А., Коврова Т.П. Влияние микролегирования бором на свойства высокоотпущенной среднеуглеродистой стали.-В кн.: Термическая обработка проката. М.:Металлургия, 1983, с.72-74.
8. Фетисова М.М., Падерно В.Н., Кузин О.А., Смирнов В.П. Влияние микродобавок на перераспределение легирующих элементов в конструкционной стали при развитии обратимой отпускной хрупкости. Металловедение и терм.обработ.металлов, 1983, №3, с.23-26.
9. А.С. 985128 (СССР). Сталь /М.М.Фетисова, О.А.Кузин, В.И.Кушпир и др. - Оpubл. в Б.И., 1982, №48.
10. А.С. 1073323 (СССР). Сталь /М.М.Фетисова, О.А.Кузин, В.И.Кушпир и др. - Оpubл. в Б.И., 1984, №6.

Кузин

