

О ВЛИЯНИИ БОРА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ГОРЯЧЕКАТАНОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

МАНЯК Н.А. (ДОНГТУ)

Установлено, что микродобавки бора (0,002–0,004%) приводят к снижению химической микронеоднородности, очищению границ зерен и повышению горячей пластичности низколегированной стали. В процессе прокатки формируется структура с более однородным распределением полей напряжений, за счет чего энергия разрушения горячекатаного металла увеличивается.

Одним из наиболее экономичных способов повышения качества продукции в черной металлургии является регулирование микросостава стали и сплавов. Микропримеси, так или иначе попадающие в сплав, вызывают как положительное, так и отрицательное влияние на свойства и условия эксплуатации изделий из этих сплавов. Так, установлено, что, если десятитысячные доли процента сурьмы, висмута или свинца способны в два и более раз снижать жаропрочность сплавов, то те же количества бора или элементов из группы лантана способны существенно повысить их долговечность [1].

Взросшее понимание важной, а иногда и определяющей роли чистоты, а точнее микросостава сплавов в формировании их свойств, особенно для экстремальных условий службы, привело к развитию новых технологических процессов производства стали и сплавов, применению переплавных рафинирующих процессов, внепечной обработки, использованию чистой по примесям шихты и др.

Под микросоставом сплава следует понимать не только содержание в нем серы, фосфора и газов, но и ряда других элементов-примесей, случайно или преднамеренно введенных в расплав, а также состав и морфологию образованных ими химических ассоциаций (неметаллических включений и других «вторичных» фаз) [2]. Следовательно, принципиальное отличие микросостава от макросостава состоит в том, что микросостав определяется и зависит не от марки сплава, а от особенностей его производства, условий выплавки, раскисления, модифицирования, микролегирования, вида используемой шихты.

Именно микросостав сплава определяет степень его чистоты, часто существенно влияя на характер кристаллизации, форму и состав неметаллических включений, состав и строение границ зерен и приграничных зон, вид излома, прокаливаемость, обрабатываемость резанием, способность к горячей пластической деформации, свариваемость, коррозионную стойкость, склонность к хрупкому разрушению, т.е. на целую гамму технологических и служебных свойств.

Из всех способов управления микросоставом сплавов наиболее эффективным как с экономической, так и технологической стороны, является модифицирование и микролегирование.

Известно, что микродобавки бора используют, главным образом, для улучшения комплекса механических свойств конструкционных сталей, подвергаемых закалке с отпуском. При этом влияние бора связывают с повышением прокаливаемости [3]. Однако в работе [4] показано, что при помощи микродобавок бора в количестве 0,002–0,004% можно существенно снизить порог хладноломкости низколегированной стали в горячекатаном состоянии.

В настоящей работе исследовали влияние бора на структуру стали типа 09Г2 в литом и деформированном состоянии, характер разрушения горячекатаного металла

и его горячую пластичность. Исследованию подвергали металл промышленных плавок без бора и с содержанием бора 0,002–0,004% (по сто плавок на каждый вариант).

Объемную долю, и условный размер структурных составляющих определяли с помощью структурного анализатора «Эпиквант» в полуавтоматическом режиме. Загрязненность неметаллическими включениями оценивали по их суммарной протяженности на единице площади шлифа. Микронеоднородность определяли методами измерения микротвердости, микрорентгеноспектрального анализа и низкочастотного внутреннего трения. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3. Микрорентгеноспектральный анализ осуществляли с помощью микрозонда MS-46. Внутреннее трение измеряли на установке типа «обратный крутильный маятник». Состояние границ зерен изучали методами световой, электронной микроскопии и Оже-спектроскопии [Оже-микрозонд JAMP-10S(J)]. Испытания на ударный изгиб проводили по стандартной методике на образцах с острым надрезом на маятниковом копре МК-30А в интервале температур 0–40°C. Горячую пластичность стали исследовали на высокотемпературной установке «АЛА-Т00». Деформирование образцов осуществляли в условиях одноосного растяжения в интервале температур 930–1200°C.

Установлено, что с введением в сталь бора повышается ее загрязненность неметаллическими включениями кислородного типа. Увеличение загрязненности происходит за счет пластичных и полупластичных включений. Однако зависимости между загрязненностью металла неметаллическими включениями и энергией разрушения как для металла с бором, так и без бора не обнаружено [5].

В результате изучения микроструктуры горячекатаных листов (таблица 1) было установлено, что бор практически не оказывает влияния на размер ферритного зерна. Что касается соотношения структурных составляющих, то необходимо отметить, что в борсодержащем металле расширяется интервал их содержания, особенно по количеству структуры видманштетта. Увеличение доли последней при введении бора вероятнее всего вызвано тем, что борсодержащий металл требует более тщательного соблюдения режима нагрева и прокатки.

Таблица 1 - Структура горячекатаных листов

[B], %	Размер зерна феррита, мкм	Объемная доля, %		
		феррита	Перлита	Видманштеттовой структуры
—	13–30	60–80	15–40	0–20
0,002–0,004	13–29	50–80	10–40	0–40

Учитывая то, что структура борсодержащего металла менее стабильна по сравнению с металлом без бора, представляет интерес определить влияние параметров структуры на энергию разрушения. Как и следовало ожидать, измельчение ферритного зерна способствует увеличению энергии разрушения. Но интересен тот факт, что с понижением температуры испытания это влияние в значительной мере ослабевает, и при температуре — 40°C размер зерна практически не оказывает влияния на энергию разрушения. Аналогично влияет на энергию разрушения и объемная доля видманштеттовой структуры. Влияние объемной доли перлита в структуре горячекатаной стали носит экстремальный характер. Однако и это влияние с понижением температуры испытания ослабевает и при температуре — 40°C практически отсутствует.

Таким образом, можно заключить, что с понижением температуры определяющая роль в характере разрушения принадлежит более тонким параметрам струк-

туры: микронеоднородности, субзеренной и дислокационной структуре, состоянию границ зерен и т.д.

Изучение границ зерен на уровне световой металлографии ($\times 2000$) показало, что в борсодержащем металле значительно меньше выделений структурно свободного цементита по границам зерен. При исследовании характера излома ударных образцов, испытанных при температуре — 20°C , установлено, что как в безбористом, так и в борсодержащем металле наблюдаются участки межзеренного и внутризеренного разрушения. Статистическая обработка результатов электроннофрактографического исследования показала, что доля межзеренного излома при содержании бора в металле 0,002–0,004% уменьшается с 18 до 7%. При этом снижается и доля хрупкого внутризеренного разрушения с 70 до 43%. Следовательно, при введении бора в сталь границы зерен становятся более чистыми.

Имеющиеся в литературе данные о том, что бор очищает границы зерен путем связывания вредных примесей [6], нам представляются необоснованными, так как связанный в частицы бор, как правило, теряет свою эффективность. По всей видимости, бор, как адсорбционно-активный элемент, в результате конкурентной борьбы с другими, менее адсорбционно-активными, но сильно охрупчивающими межкристаллитные зоны примесями, занимает вакантные места на границах, вытесняя другие примеси в глубь зерна. Данное предположение было подтверждено при исследовании поверхности изломов методом Оже-спектроскопии. Установлено, что бор локализуется только по границам зерен, его присутствие на поверхности внутризеренного излома обнаружено не было. При этом наблюдается перераспределение примесей. На границах зерен резко уменьшается концентрация серы, марганца, азота и титана. Что касается углерода и кислорода, то изменение их концентрации на границах зерен выражено в меньшей степени.

На основе анализа полученных данных можно предположить, что положительное влияние бора на характер разрушения горячекатаного металла связано с его модифицирующим действием на процесс кристаллизации стали.

При исследовании дендритной структуры литого металла было установлено, что при введении бора происходит заметное утонение дендритных осей и снижение плотности дендритной структуры при неизменной ее дисперсности. При этом существенно снижается дендритная ликвация, определенная методом микротвердости. Установлено, что в столбчатой зоне она уменьшается с 28 до 18%, в равноосной — с 30 до 20%. Аналогичные результаты получены и при микрорентгеноспектральном анализе, как это видно из распределения элементов в микрообъемах дендритного кристаллита (таблица 2: в числителе — металл без бора, в знаменателе — с 0,004% В)

Таблица 2 – Распределение элементов в микрообъемах дендритного кристаллита.

Элемент	Содержание, %		
	ось дендрита	межосный участок	Степень ликвации
Mn	1,36/1,37	1,76/1,63	1,29/1,18
Si	0,25/0,24	0,40/0,33	1,60/1,32
Cu	0,07/0,08	0,13/0,11	1,85/1,37

Характерно то, что как в металле с бором, так и без него состав осей дендритов не изменяется, а изменяется только концентрация элементов в междендритных участках. Следовательно, распределение элементов в целом по кристаллиту при введении бора становится более равномерным. Об этом свидетельствуют и результаты по определению внутреннего трения. Сталь без бора имеет два максимума, располо-

женные вблизи 30 и 200°C. Высота этих максимумов изменяется от образца к образцу. У борсодержащей стали 30-градусный максимум отсутствует, высота 200-градусного невелика и несущественно меняется от образца к образцу.

Максимум внутреннего трения, расположенный вблизи 30°C, известен как максимум Сноэка и вызывается направленным перемещением атомов внедрения в кристаллической решетке под действием знакопеременного напряжения [7]. По его высоте можно судить о концентрации атомов внедрения в твердом растворе. Деформационный 200-градусный максимум связан со взаимодействием дислокаций с атмосферами примесных атомов внедрения. Его высота определяется содержанием атомов внедрения и величиной локальных микронапряжений [8]. Значительные колебания высоты рассматриваемых максимумов в случае стали, не содержащей бор, свидетельствуют о весьма неравномерном распределении примесей внедрения и полей напряжений в объеме металла. У стали, модифицированной бором, такого не наблюдается.

Ранее было установлено, что бор существенно снижает поверхностное натяжение железа на границе жидкость — газ [9], поэтому естественно предположить, что он, адсорбируясь на поверхности растущих кристаллов, затрудняет их рост. При этом увеличивается количество металла, кристаллизующегося в междендритных участках. При неизменном химическом составе осей дендритов это приводит к более равномерному распределению элементов по объему кристаллита. Кроме того, как было показано выше, бор способствует очищению границ зерен от вредных примесей, которые охрупчивают металл. При прокатке такого металла формируется структура с более однородным распределением полей напряжений. Сопротивление металла разрушению, особенно при низких температурах, при этом увеличивается.

Одной из важнейших технологических характеристик стали является сопротивление ее пластической деформации при высоких температурах. Считают [10], что влияние бора на горячую пластичность может сказываться при очень малом его содержании (порядка 0,0001%). В данной работе исследовали влияние бора на горячую пластичность при его содержаниях, не превышающих 0,004%, т.е. когда в литом состоянии исключается выделение избыточных борсодержащих фаз.

В результате исследования было установлено, что с повышением температуры деформации наблюдается закономерное снижение сопротивления деформированию как борсодержащего, так и безбористого металла. Однако в интервале температур 930–1100°C сопротивление деформированию борсодержащей стали ниже. Причем с повышением температуры эта разница увеличивается. При температуре деформации 1200°C сопротивление деформированию борсодержащего металла, наоборот, выше. В интервале температур 930–1100°C на диаграмме напряжение-деформация фиксируется некоторое разупрочнение. Причем с повышением температуры оно наблюдается при более высоких напряжениях. При температуре деформации 1200°C это явление отсутствует.

Можно предположить, что разупрочнение на начальных стадиях деформации связано с выделением частиц. Высокие скорости кристаллизации непрерывнолитых слябов способствуют получению пересыщенного раствора примесями внедрения, а также такими нитридообразующими элементами как алюминий и титан. При последующем нагреве и деформации литого металла происходит их выделение из твердого раствора с образованием мелкодисперсных частиц. Так, в результате фазового анализа распределения титана было установлено, что в листах связанного в нитриды (карбонитриды) титана примерно в 2 раза больше, чем в слябах. В то же время содержание растворенного титана в листах меньше в такое же число раз.

Таким образом, микродобавки бора до 0,004% не оказывают отрицательного влияния на деформируемость литого металла. Даже, наоборот, наблюдается некоторое ее улуч-

шение, что при одних и тех же энергосиловых затратах позволит деформировать борсодержащий металл при более низких температурах. Однако, перегрев борсодержащего металла будет сопровождаться ухудшением деформируемости по сравнению с безбористым.

Улучшение деформируемости борсодержащего металла в определенной мере связано с его более однородным строением. В этом случае должно происходить более однородное распределение полей напряжения. С повышением температуры деформации возрастает доля межзеренного проскальзывания. При реализации этого механизма деформации, очевидно, положительная роль бора сказывается в результате его влияния на состояние границ зерен.

Изучение горячей пластичности методом высокотемпературной металлографии дает информацию о деформационных рельефах. Более выраженный деформационный рельеф безбористого металла свидетельствует о больших напряжениях при деформации, чем борсодержащего.

В результате рентгеноструктурного анализа образцов после испытания на растяжение при температурах 930–1200°C было установлено, что профиль линий дифрактографических рефлексов у борсодержащего металла более четкий, имеет большую интенсивность и меньшую полуширину. По отношению истинного физического уширения линий можно сказать, что у борсодержащего металла искажения вызваны в основном дисперсностью блоков ($\beta_2/\beta_1=0,20-0,87$), в то время как у безбористого металла они обусловлены и микронапряжениями второго рода ($\beta_2/\beta_1=0,67-1,5$).

Данные рентгеноструктурного анализа горячекатаных листов текущего производства свидетельствуют о том, что размер блоков борсодержащего металла меньше, чем безбористого.

Таким образом, модифицирование низколегированной стали бором приводит к снижению химической микронеоднородности литой стали и очищению границ зерен. В процессе прокатки такого металла формируется более устойчивая субструктура, что влечет за собой повышение энергии разрушения горячекатаной стали, особенно при отрицательных температурах.

Список литературы

1. Гуляев А.П. Чистая сталь. — М.:Металлургия, 1975. — 184с.
2. Маняк Н.А., Шлемко С.В., Крикунов Б.П. Сталь с регламентированным микросоставом. — Донецк: Донбасс, 1995. — 166с.
3. Золле. Производство цементуемых и улучшаемых сталей, легированных бором. Обзор по системе Информсталь. — М.: Ин-т Черметинформация. — 1981. — Вып.13 (106). — 24с.
4. Кондратюк А.М., Акулов В.В., Маняк Л.К. Комплексное раскисление и модифицирование судовой стали//Бюл. научно-техн.информ. Черная металлургия. — 1985. — Вып.4 (984). — С. 52–53.
5. Бор и неметаллические включения в низколегированной стали/ В.И.Мачикин, Н.А.Маняк, Л.К.Маняк и др.//Металлургическая и горнорудная промышленность. — 1986. — № 3. — С. 15–16.
6. Булат С.И., Тихонов А.С., Дубовин А.К. Деформируемость структурно неоднородных сталей и сплавов. — М.:Металлургия,1975. — 350с.
7. Криштал М.А., Головин С.А. Внутреннее трение и структура металлов. — М.:Металлургия, 1976. — 375с.
8. Саррак В.И., Суворов С.О. 200-градусный максимум внутреннего трения и остаточные микронапряжения в мартенсите.-ДАН СССР. — 1973. —208. — № 2. — С. 338–341.
9. Маняк Н.А., Огунлана О.А., Долженкова Е.Ф. Поверхностное натяжение расплава железобор//Изв.вузов.Черная металлургия. — 1986. —№ 8. — С. 153–154.
10. Булат С.И., Кардонов Б.А., Сорокина Н.А. Влияние бора на пластичность нержавеющей сталей при горячей деформации//Сталь. — 1978. — № 3. — С. 259–262.

© Маняк Н.А., 1999.