



The role of the nitrogen-containing sulfides and nitrides in forming of mechanical characteristics of cast-steel is shown.

В. В. ЛУНЕВ, В. П. ПИРОЖКОВА, Н. М. БУРОВА, Л. К. ЧЕБОТАРЬ,
Запорожский национальный технический университет

УДК 621.740023:669.018.28

О РОЛИ СЕРЫ И АЗОТА В ФОРМИРОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ЛИТОЙ СТАЛИ

Общеизвестно вредное влияние серы, а именно II тип сульфидов, на комплекс пластических и вязкостных свойств литой стали. Для перевода пленочных сульфидов II типа в более благоприятную форму (III тип) традиционно используют повышенные концентрации алюминия (0,04–0,05 % спектрально определяемый). Механизм влияния алюминия на форму сульфидов достаточно подробно описан в работах [1–3].

С целью повышения механических свойств применяют и другие раскислители-модификаторы (кальций, церий), а также модификаторы-глобуляризаторы (РЗМ и ЩЗМ). Несмотря на широкое применение таких модификаторов, часть плавов все же имеет эвтектические сульфиды II типа. В настоящее время значительный интерес вызывают исследования по применению азота как наиболее эффективного и экономически выгодного модификатора, значительно повышающего свойства стали.

Нами были проведены исследования по влиянию сульфидных и нитридных включений на комплекс прочностных и пластических свойств сталей с ферритно-перлитной структурой типа 20Г2Л и 40Г2Л. Различные содержания сульфидной фазы (серы до 0,05 %) обеспечивались вводом в чистый металл сульфида железа. Повышенные концентрации азота до 0,045 % достигали путем ввода в расплавленный металл азотированного ферромарганца. Металл выплавляли в 60-килограммовой индукционной печи с основной футеровкой. Кроме того, была проведена серия опытных вакуумных плавов. Конечное раскисление металла проводили алюминием в количестве 0,2 %, затем отбирали литые образцы для механических испытаний. Механические свойства изучали на литых образцах после термообработки: нормализация при температуре 880 °С, отпуск при 660 °С, 2 ч, охлаждение на воздухе.

Контроль химического состава исследуемого металла осуществляли химическим и спектральными методами (см. таблицу). Содержание азота определяли на приборах фирмы LECO. Микро-

структуру литого и термообработанного металла исследовали на микроскопах «Эпиквант» и МИМ-8. Фазовый состав неметаллических включений (НВ), морфологию и топографию определяли петрографическим методом на исследовательском микроскопе МБИ-6 и кристаллооптическом микроскопе МИН-8 [4].

Проведенные исследования показали, что в опытных плавках стали 20Г2Л с разным содержанием серы и азота литой металл характеризуется видманштеттовой структурой, в которой кристаллы феррита имеют полигональную и игольчатую формы. Незначительное количество феррита в виде тонких игл-пластин выделяется по границам первичных литых зерен.

При сравнении плавов с возрастающими присадками азота наблюдается тенденция сокращения доли структурно-свободного феррита. Также было замечено, что с увеличением содержания азота элементы структурных составляющих измельчаются, появляется игольчатая микроструктура трооститного типа, характерная для промежуточного превращения (плавки 5, 2, 1).

После нормализации структура представляет собой чередование игольчато-полигонального феррита с участками мелкозернистого перлита. В осевых зонах дендритов формируется ферритно-перлитная структура, в междоусьях кристаллизуется преимущественно перлит. Наиболее высокая доля ферритной составляющей отмечается в металле плавов с повышенным содержанием серы (плавки 11в, 5, 6).

С увеличением содержания азота наблюдается некоторое уменьшение среднего размера зерна феррита, а также снижение степени дендритной ликвации и структурной неоднородности. С повышением содержания азота увеличиваются плотность и дисперсность дендритной структуры, сечения осей II порядка увеличиваются, а расстояния между ними сужаются.

Так, металл плавов 9в и 11в с низким содержанием азота (0,006 – 0,008 %) имел зернистую ферритно-перлитную микроструктуру.

Характеристика литых сталей

Марка стали	Номер плавки	Содержание элементов, %						Механические свойства				
		C	Si	Mn	Al	N	S	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, МДж/м ²
20 Г2Л	9в	0,23	0,40	1,76	0,100	0,006	0,017	681,1	379,7	28,4	63,2	1,30
	11в	0,22	0,42	1,60	0,110	0,008	0,045	602,0	393,4	24,7	31,5	0,60
	5	0,32	0,48	1,97	0,125	0,017	0,050	690,0	480,2	13,3	21,9	0,34
	2	0,23	0,47	2,31	0,102	0,024	0,004	735,1	412,6	19,1	20,4	0,77
	1	0,22	0,41	2,14	0,100	0,031	0,009	-	-	-	-	-
	6	0,15	0,35	1,75	0,075	0,045	0,048	556,4	430,2	12,3	13,1	0,23
40Г2Л	10в	0,42	0,36	1,68	0,120	0,006	0,015	671,0	452,0	26,0	46,7	0,70
	12в	0,39	0,39	1,75	0,130	0,008	0,045	661,7	439,0	18,7	24,9	0,40
	7	0,42	0,32	2,47	0,128	0,011	0,047	682,9	440,2	29,3	35,5	0,71
	3	0,41	0,54	2,20	0,130	0,012	0,006	718,3	442,0	28,3	55,5	0,76
	4	0,40	0,54	2,18	0,143	0,025	0,005	746,6	493,8	20,0	20,4	0,77
	8	0,42	0,44	2,44	0,128	0,033	0,047	764,3	581,5	24,0	43,7	0,70

Примечание. в – вакуумные плавки.

Зерна феррита с четкими границами чередуются с участками зернистого перлита.

Следует отметить, что в металле плавки 9в с содержанием серы 0,017 % неметаллические включения (оксиды, сульфиды и окисульфиды) располагаются в структуре металла дезориентировано и такой металл имеет хорошие показатели пластичности $\delta=28,4\%$, $\psi=63,2\%$ и вязкости KCU = 1,30 МДж/м².

В то же время в металле плавки 11в с высоким содержанием (0,045 %) серы и наличием сульфидов II типа, выделяющихся по границам литых зерен, уровень механических свойств заметно ниже. Особенно снизились показатели $\psi=31,5\%$ и ударной вязкости KCU=0,60 МДж/м².

Металл плавки 5, 2 и 1 с повышенными концентрациями азота 0,017, 0,024 и 0,031 % соответственно имел полигонально-иглообразную структуру. Неметаллические включения (оксинитриды – AlON, нитриды – AlN, сульфиды – FeS·MnS и азотсодержащие сульфиды (FeS·MnS)·N_x – твердые растворы нестехиометрического состава) распределялись в структуре металла как дезориентировано, так и по границам зерен.

Наличие изометричных нитридов и оксинитридов алюминия, а также дезориентированное

расположение их способствовало повышению прочностных свойств (см. таблицу), а наличие зернограницных сульфидов II типа и игольчатых нитридов алюминия ослабляло границы зерен, что привело к снижению пластических и вязкостных свойств. Наиболее низкие значения $\delta=13,3\%$, $\psi=21,9\%$ и KCU=0,34 МДж/м² зафиксированы в металле плавки 5 с высоким (0,050 %) содержанием серы и наибольшим количеством (более 5 % от общей суммы НВ) зернограницных включений-сульфидов II типа и игольчатых нитридов алюминия.

Высокие содержания не только серы (0,048 %), но и азота (0,045 %) в металле плавки 6 привели к образованию специфической эвтектики – одновременная кристаллизация дисперсных нитридов алюминия и сульфидов, выделившихся в междоузьях. Такая топография включений резко снизила весь комплекс показателей механических свойств (см. таблицу).

Приведенные результаты показывают, что металл с низким содержанием серы и повышенным содержанием азота (плавка 2), а также с незначительным количеством ($\approx 1,5\%$) зернограницных включений имеет более высокий уровень механических свойств, чем металл с высоким содержанием серы и низким содержанием азота.

Отсутствие зернограницных включений (плавка 9) обеспечивает высокий уровень пластических и вязкостных свойств.

Литая сталь 40Г2Л с различными концентрациями серы и азота имеет, как и сталь 20Г2Л, ферритно-перлитную микроструктуру с элементами видманштеттовой структуры. После нормализации и отпуска выявлена дендритная ликвация различной степени.

Результаты количественной оценки микроструктуры показали, что слабо выраженная ликвация наблюдается в металле плавки 7 со средним (0,011 %) содержанием азота и высоким (0,047 %) содержанием серы. Сглаженный характер дендритной ликвации имеет металл с повышенным содержанием азота (плавки 3, 4, 8).

Следует отметить, что значения величины микротвердости в металле с повышенным содержанием азота выше, чем в металле с низкими его концентрациями. Кроме того, в отмеченных плавках с повышенным содержанием азота сечение междоусных участков намного меньше, чем в плавках с низким его содержанием (плавки 10в, 12в). Другими словами, возрастающие присадки азота привели к снижению степени развития дендритной ликвации, а также к измельчению элементов дендритной структуры и всех структурных составляющих, способствуя тем самым образованию игольчатых структур бейнитного типа.

Сплав, выплавленный в вакууме (плавки 10в, 12в) с низким содержанием (0,006 – 0,008 %) азота, характеризуется зернистой ферритно-перлитной микроструктурой.

Неметаллические включения (оксиды и сульфиды) распределяются в структуре такого металла дезориентировано, формируясь преимущественно в α -фазе (феррите). Незначительная доля сульфидов II типа (до 3 % от общего количества всех НВ) выделяется по границам литых зерен. В зависимости от количества выделившихся зернограницных включений изменяются показатели ударной вязкости: при наличии ≈ 3 % зернограницных включений $KCU = 0,40$ МДж/м², а при меньшем их количестве $KCU = 0,70$ МДж/м².

Металл со средним содержанием (0,011–0,012%) азота (пл. 7,3) имел ферритно-бейнитную микроструктуру. Элементы структуры, в частности феррит, более дисперсные и более равномерно распределены в матрице, чем в металле с низким содержанием азота.

В микроструктуре стали с более высокими (0,025% – 0,033 %) содержаниями азота не происходит образование структурно-свободного феррита, т. е. азот способствует подавлению $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, смещая тем самым кристаллизацию в сторону более низких температур с образованием дисперсной игольчатой структуры бейнита.

Наличие повышенных концентраций азота привело не только к образованию дисперсных

игольчатых структур, но и новых азотсодержащих фаз. Наряду с обычными сульфидами $FeS \cdot MnS$ образовались азотсодержащие сульфиды $(FeS \cdot MnS) \cdot N_x$ – твердые растворы нестехиометрического состава, а также оксинитриды алюминия $AlON$ и нитриды алюминия AlN , располагающиеся как дезориентировано, так и по границам литых зерен. При этом сульфиды II типа наблюдаются преимущественно в металле с низким содержанием азота. Последний, взаимодействуя с сульфидами, переводит II тип в более благоприятную форму, очищая тем самым границы зерен. Вновь образованные азотсодержащие сульфиды $(FeS \cdot MnS) \cdot N_x$ отличаются от аморфных пленочных сульфидов кристаллической четко ограненной (изометричной) формой, слабо выраженной анизотропией и другими оптическими свойствами, не присущими $FeS \cdot MnS$. Располагаются такие новообразования в структуре металла дезориентировано.

Благоприятная изометричная форма азотсодержащих сульфидов $(FeS \cdot MnS) \cdot N_x$, а также нитридов AlN и оксинитридов $AlON$, высокая их микротвердость и дезориентированное расположение в структуре металла способствуют повышению прочностных характеристик (σ_b , σ_T) металла, не снижая при этом, что очень важно, показателей пластических свойств.

Незначительная доля (всего лишь 1,0 – 1,5 % от общего количества НВ) сульфидов II типа и игольчатых нитридов, выделяющихся по границам литых зерен, оказывает отрицательное влияние в первую очередь на показатели пластичности и ударной вязкости.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что азот в литых углеродистых сталях 20Г2Л и 40Г2Л с повышенным содержанием алюминия (0,2 %) образует не только нитриды алюминия AlN и оксинитриды алюминия $AlON$, но и азотсодержащие сульфиды $(FeS \cdot MnS) \cdot N_x$ – твердые растворы нестехиометрического состава.

Показано, что при повышении концентраций азота до 0,03 % и увеличении концентрации серы от 0,015 до 0,045 % практически не снижаются физико-механические свойства. При низком обычном содержании азота (0,008 %) и увеличении содержания серы до 0,045 % снижаются показатели пластичности и ударной вязкости.

Литература

1. Шульте Ю. А. Производство отливок из стали. Киев-Донецк: Вища шк., 1983.
2. Лунев В. В., Аверин В. В. Сера и фосфор в стали. М.: Металлургия. 1988.
3. Даль В., Хенгстенберг Х., Дюрэн К. Условия образования сульфидных включений различных типов // Черные металлы. 1966. Т. 86, № 13. С. 17–42.
4. Литвинова Т. И., Пирожкова В. П., Петров А. К. Петрография неметаллических включений. М.: Металлургия, 1972.