

ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛОВ

УДК 621.771.23.016.2.

Р.Е.Великоцкий, С.В.Лащинина

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 0ХСНД

Для глубокого понимания процессов, происходящих при легировании и деформировании сталей, существенную роль играет знание зависимостей между химическим составом и механическими свойствами.

Анализируя качество толстолистовой стали и проводя статистическое исследование связи механических характеристик с химическим составом и параметрами технологии производства, можно выделить основные пути по улучшению качества толстого листа: 1) применение рациональных способов раскисления, модифицирования и микролегирования стали (ванадием, ниобием, цирконием и др.), 2) проведение внепечной обработки жидкой стали синтетическими и самоплавкими шлаковыми смесями, а также применение десульфурации чугуна с целью снижения содержания серы и неметаллических включений, 3) разработка и широкое внедрение процессов прокатки с регламентированием температурных и деформационных режимов, совершенствование конструкции оборудования для охлаждения листа в процессе прокатки, 4) расширение объема, совершенствование оборудования и технологии термообработки проката.

В работе [1] отмечается, что наиболее значимыми факторами в регрессионных моделях пластических характеристик низколегированных сталей является содержание карбидообразующих элементов и их парные взаимодействия с углеро-

дом. В работе [2] приводятся данные о том, что при раскислении стали 10ХСНД силикальцием в количестве 2 кг/т, было обеспечено повышение временного сопротивления проката на 10-15% при сохранении его пластичности и вязкости на достаточно высоком уровне. В работе [3] показано влияние основных элементов на механические свойства стали 10ХСНД. Отмечено, что увеличение массовой доли углерода приводит к снижению относительного удлинения, тогда как ударная вязкость практически не изменяется. Авторы [3] считают, что уменьшение числа листов с высоким временным сопротивлением разрыву возможно при уменьшении массовой доли углерода до 0,1%. Марганец и кремний служат для раскисления стали 10ХСНД при её выплавке. Они же наиболее сильно упрочняют данную сталь [4], пластические свойства при этом изменяются незначительно, а ударная вязкость снижается. Только хром и никель не оказывают заметного влияния на последний показатель. Явление дисперсионного твердения, связанного с изменением растворимости меди в феррите, вызывает повышение прочностных и снижение пластических и вязких свойств. Сера и фосфор в стали 10ХСНД являются нежелательными примесями. Сера находится в низколегированной стали преимущественно в виде сульфидов (железа, марганца и др.), а фосфор - в твёрдом растворе. Вследствие этого сера практи-

чески не влияет на прочность, но уменьшает пластичность и ударную вязкость, в то время как фосфор существенно упрочняет феррит с соответствующим падением пластических и вязких свойств. Вредное влияние фосфора примерно до 0,04% ослабляется раскислением металла кремнием; эффективнее кремния влияет алюминий, который в количестве 0,04% обеспечивает получение удовлетворительных значений по ударной вязкости при содержании фосфора до 0,12%. В работе [5] приводятся данные о влиянии церия, бора и РЗМ на механические свойства низколегированной стали. Так, теоретически рассчитанное содержание церия, при котором обеспечивается оптимальный уровень ударной вязкости составляет 0,07-0,08%. В работе [5] также отмечено, что положительное влияние церия на ударную вязкость низколегированной стали проявляется в присутствии повышенного содержания серы и фосфора.

Введение церия с бором не оказывает влияния на предел текучести, однако при этом происходит повышение относительного удлинения и ударной вязкости. В работе [6] показано, что улучшение прочностных и пластических свойств стали 10ХСНД достигается при содержании в стали не более 0,03% серы. В работе [7] отмечено, что влияние фосфора на свойства низколегированной стали будут повышаться при условии уменьшения в ней концентрации O_2 , а также если рас-

творимость фосфора в металле будет минимальна. Для полного устранения сегрегации фосфора, по мнению авторов [7], достаточно содержания в низколегированной стали 0,1% алюминия. При растворении в феррите титана происходит интенсивное его упрочнение, однако это сопровождается резким падением пластичности и вязкости стали 10ХСНД. Эффективнее титан влияет через измельчение структуры и дисперсионное твердение, обеспечивая получение в данной стали хорошего комплекса механических показателей. Так, увеличение в стали 10ХСНД содержания титана с 0,025 до 0,1% приводит к повышению предела текучести на 10 МПа, временного сопротивления на 10 МПа, относительного сужения на 7% и к уменьшению относительного удлинения на 3% [4]. Существенное упрочнение, вследствие выделений карбида титана, наблюдается при отношении Ti:C, близком к стехиометрическому составу этого соединения. Авторы [8] считают, что повышенная прочность и склонность к хрупкому разрушению малоуглеродистой стали с содержанием более 0,3% титана в горячекатаном состоянии объясняется наличием титана в твердом растворе а-железа. Выведение титана из феррита, которое может быть

достигнуто нагревом стали до Ас₃, сопровождается значительным снижением прочности и повышением пластичности, особенно вязкости стали. В работе [9] показано, что микролегирование стали 10ХСНД титаном и кальцием улучшает качество поверхности и внутренней структуры сляба и повышает прочность и пластичность на 5-10%, а ударную вязкость после старения - на 30-50%.

Таким образом, обзор литературных источников показывает, что имеющихся данных относительно зависимости между химическим составом стали 10ХСНД и механическими свойствами явно не достаточно.

Целью настоящей работы является изучение комплексного влияния химического состава на механические свойства стали 10ХСНД. Выявление наиболее значимых химических элементов для основных свойств.

Статистические исследования проводились на основании 300 плавок. Выплавка стали, прокатка, метрологическое обеспечение и контроль параметров технологического процесса производились на основании технологической инструкции «Производство низколегированной стали марки 10ХСНД» (ТИ 229-МЦ-399-90). Требования по охране труда и технике безопасности соответствовали «Общим правилам для

предприятий и организаций metallurgicheskoy promyshlennosti», «Правилам безопасности в прокатном производстве» и инструкциям ТБ 034-1-79, ТБ 035-1-79, ТБ 034-1-Д-1. Сталь марки 10ХСНД выплавляли в 300-тонных мартеновских печах ОАО «АМК» в соответствии с технологической инструкцией «Выплавка спокойной, полуспокойной и кипящей стали в основных мартеновских печах» (ТИ 229-СТМ-032-20-92), со следующими особенностями. Разливка стали производилась в изложницы типа 13,8СМ (развес слитка 14 т) в соответствии с технологической инструкцией «Разливка стали» (ТИ 229-СТМ-032-23-94). Посад, нагрев и выдачу слитков в нагревательных колодцах производили по режимам низколегированного металла III группы в соответствии с технологической инструкцией «Нагрев слитков в нагревательных колодцах» (ТИ 229-ПОЗ-033-104-98). Фабрикацию и назначение слитков в прокатку производили в соответствии с технологической инструкций «Производство блюмсов и слябов на обжимном стане» (ТИ 229-ПОЗ-033-30-94). Зачистку, приёмку, маркировку, складирование и передачу слябов на стан 2250 производили в соответствии с инструкцией «Производство блюмсов и слябов на

Коэффициенты корреляции и их надёжность для связей относительного удлинения с содержанием химических элементов и толщиной листов стали 10ХСНД

	Коэффициенты корреляции (r_i) и их надёжность (γ_i) для листов толщиной, мм							
	4-6		7-9		10-14		4-14	
	r_i	γ_i	r_i	γ_i	r_i	γ_i	r_i	γ_i
C	-0,218	6,85	-0,243	5,38	-0,090	1,38	0,199	8,39
Mn	-0,254	8,12	-0,393	9,68	-0,010	0,15	-0,226	9,65
Si	-0,111	3,36	-0,121	2,56	-0,0099	1,52	-0,063	2,56
S	-0,054	1,62	-0,263	5,89	-0,034	0,52	-0,091	3,72
P	-0,122	3,71	-0,057	1,19	-0,042	0,64	-0,061	2,48
Cr	-0,065	1,95	-0,125	2,65	0,163	2,55	0,061	2,48
Ni	-0,030	1,11	-0,135	2,86	0,023	0,35	-0,022	0,89
Cu	-0,042	0,79	-0,206	4,48	-0,336	5,77	-0,105	4,30
Al	-0,109	3,30	-0,209	4,55	-0,074	1,13	-0,116	4,76
Ti	-0,228	7,20	-0,204	4,43	-0,139	2,16	-0,144	5,96
h	-0,130	3,96	-0,203	4,41	-0,511	10,52	-0,428	21,2

Таблица 1

Таблица 2

Уравнения регрессии комплексного влияния элементов на механические свойства стали 10ХСНД
(переменные, от содержания которых σ_t , σ_b и δ_5 зависит существенно – выделены жирным шрифтом)

Толщина листа, мм	Уравнения регрессии	Коэф. множ. кор., R
Предел текучести, МПа		
4-6	$\sigma_t = 395,1 + 664,0 \mathbf{C} - 52,6 \mathbf{Mn} + 52,7 \mathbf{Si} + 191,1 \mathbf{S} + 190,3 \mathbf{P} - 9,1 \mathbf{Cr} - 32,9 \mathbf{Ni} + 53,4 \mathbf{Cu} + 463,9 \mathbf{Al} + 1141,7 \mathbf{Ti} - 16,0 \mathbf{h}$	0,583
7-9	$\sigma_t = 284,6 + 602,0 \mathbf{C} + 18,03 \mathbf{Mn} + 132,0 \mathbf{Si} - 619,4 \mathbf{S} + 174,2 \mathbf{P} + 2,5 \mathbf{Cr} + 11,8 \mathbf{Ni} - 9,7 \mathbf{Cu} + 104,6 \mathbf{Al} + 1235,1 \mathbf{Ti} - 9,6 \mathbf{h}$	0,606
10-14	$\sigma_t = 211,5 + 551,8 \mathbf{C} - 25,0 \mathbf{Mn} + 113,4 \mathbf{Si} + 76,3 \mathbf{S} + 1979,4 \mathbf{P} + 9,3 \mathbf{Cr} + 4,9 \mathbf{Ni} + 15,6 \mathbf{Cu} + 42,3 \mathbf{Al} + 364,2 \mathbf{Ti} - 0,73 \mathbf{h}$	0,551
4-14	$\sigma_t = 310,0 + 602,5 \mathbf{C} - 31,0 \mathbf{Mn} + 101,0 \mathbf{Si} + 45,6 \mathbf{S} + 418,8 \mathbf{P} - 30,7 \mathbf{Cr} - 29,6 \mathbf{Ni} + 39,6 \mathbf{Cu} + 340,5 \mathbf{Al} + 985,4 \mathbf{Ti} - 4,8 \mathbf{h}$	0,588
Временное сопротивление, МПа		
4-6	$\sigma_b = 285,0 + 685,7 \mathbf{C} + 93,8 \mathbf{Mn} + 56,0 \mathbf{Si} - 812,4 \mathbf{S} + 116,3 \mathbf{P} + 43,9 \mathbf{Cr} + 33,6 \mathbf{Ni} + 49,4 \mathbf{Cu} + 186,8 \mathbf{Al} + 1146,7 \mathbf{Ti} - 0,81 \mathbf{h}$	0,613
7-9	$\sigma_b = 218,7 + 979,6 \mathbf{C} + 52,7 \mathbf{Mn} + 74,7 \mathbf{Si} - 276,9 \mathbf{S} - 87,5 \mathbf{P} + 64,9 \mathbf{Cr} + 72,5 \mathbf{Ni} + 16,3 \mathbf{Cu} + 246,2 \mathbf{Al} + 1052,5 \mathbf{Ti} - 6,96 \mathbf{h}$	0,773
10-14	$\sigma_b = 170,3 + 798,7 \mathbf{C} + 11,4 \mathbf{Mn} + 129,2 \mathbf{Si} - 129,4 \mathbf{S} + 1394,5 \mathbf{P} + 22,3 \mathbf{Cr} + 99,3 \mathbf{Ni} + 88,0 \mathbf{Cu} + 182,3 \mathbf{Al} + 46,3 \mathbf{Ti} - 0,72 \mathbf{h}$	0,696
4-14	$\sigma_b = 244,0 + 791,3 \mathbf{C} + 99,0 \mathbf{Mn} + 80,8 \mathbf{Si} - 378,0 \mathbf{S} + 547,7 \mathbf{P} + 30,8 \mathbf{Cr} + 45,0 \mathbf{Ni} + 71,2 \mathbf{Cu} + 233,2 \mathbf{Al} + 883,0 \mathbf{Ti} - 2,25 \mathbf{h}$	0,671
Относительное удлинение, %		
4-6	$\delta_5 = 45,24 - 56,13 \mathbf{C} - 7,47 \mathbf{Mn} + 1,15 \mathbf{Si} - 37,87 \mathbf{S} - 2,27 \mathbf{P} - 2,27 \mathbf{Cr} + 3,92 \mathbf{Ni} - 3,94 \mathbf{Cu} - 8,29 \mathbf{Al} - 78,73 \mathbf{Ti} - 0,57 \mathbf{h}$	0,411
7-9	$\delta_5 = 56,84 - 36,69 \mathbf{C} - 9,64 \mathbf{Mn} - 5,60 \mathbf{Si} - 76,89 \mathbf{S} - 10,03 \mathbf{P} + 6,06 \mathbf{Cr} - 6,44 \mathbf{Ni} - 7,82 \mathbf{Cu} - 8,10 \mathbf{Al} - 33,69 \mathbf{Ti} - 0,84 \mathbf{h}$	0,531
10-14	$\delta_5 = 40,68 - 8,58 \mathbf{C} - 0,36 \mathbf{Mn} - 0,94 \mathbf{Si} - 25,55 \mathbf{S} + 13,92 \mathbf{P} + 3,28 \mathbf{Cr} + 8,78 \mathbf{Ni} - 8,80 \mathbf{Cu} - 20,89 \mathbf{Al} - 31,93 \mathbf{Ti} - 0,72 \mathbf{h}$	0,592
4-14	$\delta_5 = 46,50 - 42,33 \mathbf{C} - 7,29 \mathbf{Mn} - 0,28 \mathbf{Si} - 52,26 \mathbf{S} + 12,75 \mathbf{P} + 0,42 \mathbf{Cr} + 2,46 \mathbf{Ni} - 9,01 \mathbf{Cu} - 0,83 \mathbf{Al} - 62,50 \mathbf{Ti} - 0,52 \mathbf{h}$	0,549

обжимном стане» (ТИ 229-ПОЗ-033-30-94). Нагрев слябов производили в соответствии с технологической инструкцией «Производство толстолистовой стали на стане 2250» (ТИ 229-ПГЛ-034-109-98) по режимам для стали 2-й группы. Прокатку опытной плавки на листы толщиной 8, 10 и 12 мм производили на стане 2250 (ТЛЦ № 1) с варьированием температуры конца прокатки ($t_{кп}$) в чистовой клети в интервале температур 740-960°C. От прокатанных раскатов отрезали пробы для изучения микроструктуры и определения механических свойств. Испытания механических свойств листов производили в соответствии с требова-

ниями ГОСТ 5521-93 и технологических инструкций «Общий порядок отбора и комплектование проб от толстолистовой стали» (ТИ 229-067-35-96) и «Отбор проб в прокатных цехах» (ТИ 229-067-85-98).

Анализ полученных результатов исследований показал что относительное удлинение горячекатаной стали 10ХСНД наиболее тесно связано с содержанием марганца, углерода и титана. По мере уменьшения значимых коэффициентов корреляции располагаются связи относительного удлинения со следующими элементами (табл. 1): при толщине листов 4-6 мм: Mn - Ti - C - Si - Al; при толщине 7-9 мм: Mn - S - C - Al - Cu -

Ti; при толщине 10-14 мм: Si - Ti. Для всего интервала толщин (4-14 мм) указанная последовательность имеет следующий вид: Mn - C - Ti - Al - Cu - S - Si.

Во всех случаях наблюдается существенная отрицательная связь относительного удлинения с толщиной листа. Полученные уравнения регрессии представлены в табл. 2. Углерод, титан и сера, как видно из этого уравнения, наиболее сильно уменьшают относительное удлинение, однако, учитывая определённый резерв указанной характеристики, это не представляется опасным. Так, увеличение содержания титана от 0,01% до предельного 0,03%

Таблица 3

Характеристики корреляционных связей между механическими свойствами стали 10ХСНД и содержанием углерода, титана, алюминия и кремния

Механические свойства	Толщина листа, мм	Уравнения регрессии	Средняя квадратичная погрешность	Коэффициент множественной корреляции
Предел текучести, МПа	4-6	$\sigma_t = 388,3 + 634,5 C + 1129,2 Ti + 390,4 Al + 35,5 Si - 15,9 h$	31,2	0,567
	7-9	$\sigma_t = 293,2 + 611,9 C + 1215,1 Ti + 123,5 Al + 131,0 Si - 10,4 h$	23,8	0,600
	10-14	$\sigma_t = 237,0 + 358,4 C + 427,1 Ti + 163,9 Al + 120,6 Si + 0,35 h$	21,2	0,475
	4-14	$\sigma_t = 292,1 + 607,7 C + 1003,4 Ti + 289,0 Al + 84,9 Si - 4,75 h$	29,6	0,580
Временное сопротивление, МПа	4-6	$\sigma_b = 317,4 + 1076,8 C + 1015,8 Ti + 180,2 Al + 128,7 Si - 1,46 h$	29,2	0,542
	7-9	$\sigma_b = 367,0 + 1076,4 C - 989,1 Ti + 447,9 Al + 107,7 Si - 6,8 h$	23,8	0,676
	10-14	$\sigma_b = 285,7 + 586,9 C - 35,2 Ti + 295,9 Al + 184,0 Si + 0,11 h$	22,3	0,600
	4-14	$\sigma_b = 320,0 + 989,9 C + 835,0 Ti + 282,4 Al + 138,8 Si - 2,4 h$	29,4	0,591

уменьшило бы при прочих равных условиях удлинение на 1,2%, но повысило бы предел текучести примерно на 20-25 МПа. Существенное влияние на относительное удлинение оказывает толщина листов. В среднем увеличение толщины на 2 мм снижает относительное удлинение на 0,8-1,0%.

Приведённые выше уравнения регрессии учитывают все элементы и дают возможность сопоставить их влияние на соответствующие механические характеристики, однако при их практическом использовании, вычисления оказываются довольно громоздкими. Кроме того, связи ряда элементов с механическими характеристиками оказались статистически не значимыми. По этой причине целесообразно в практической работе для прогнозирования механических свойств использовать более простые, но достаточно надёжные соотношения, которые учитывают влияние всех наиболее "сильных" элементов. Такими элементами для предела текучести - характеристики, по которой имеет место

наибольшая отсортировка листов, - являются титан, углерод, алюминий и кремний (см. выше).

В связи с этим произведены дополнительные расчёты уравнений регрессии, в которых включены только 4 этих элемента и толщина листов. Результаты расчётов приведены в табл. 3. Все исследованные связи существенны, причём, несмотря на то, что указанные элементы были выбраны как наиболее эффективно повышающие предел текучести, с их помощью надёжно прогнозируется и временное сопротивление, о чём свидетельствует величина коэффициентов корреляции (0,54-0,68). Несколько слабее связи с относительным удлинением. Видно, что наибольшее влияние на предел текучести оказывает титан, опережая углерод, алюминий и кремний. На временное сопротивление титан влияет лишь немного слабее углерода и значительно сильнее, чем алюминий и кремний. Относительное удлинение углерод и титан понижают примерно с одинаковой

интенсивностью. Разделив все коэффициенты регрессии в уравнениях для предела текучести на коэффициент при углероде, получим:

для листов толщиной 4-6

мм:

$$\sigma_t = 388,3 + 634,5 \cdot (C + 1,78 Ti + 0,615 Al + 0,058 Si) - 15,9 h;$$

для листов толщиной 7-9

мм:

$$\sigma_t = 293,2 + 611,9 \cdot (C + 1,99 Ti + 0,202 Al + 0,214 Si) - 10,4 h;$$

для листов толщиной 10-14

мм:

$$\sigma_t = 237,0 + 358,0 \cdot (C + 1,19 Ti + 0,457 Al + 0,336 Si) - 0,35 h;$$

для всего интервала толщин:

$$\sigma_t = 229,1 + 607,7 \cdot (C + 1,65 Ti + 0,475 Al + 0,139 Si) - 4,75 h.$$

Выходы

На примере горячекатаной стали 10ХСНД исследовано комплексное влияние химического состава на основные ее свойства.

Выходы подтверждены уравнениями регрессии, в которых учтён размерный фактор в виде толщины листов в интервале 4 – 14 мм (1, 2, 3, 4).

Установлено:

- на предел текучести стали наибольшее влияние оказывают титан, углерод, алюминий и кремний. Наиболее влиятельен титан, в меньшей степени алюминий и кремний;

- эти же элементы влияют на относительное удлинение;

ние;

- из анализа уравнений регрессии вытекает, что масштабный фактор в виде толщины листа заметно снижает прочность стали при переходе от тонколистового проката к толстолистовому с толщиной

$h > 4$ мм;

увеличение толщины прокатного листа свыше 10 мм не вызывает заметного скачка по уменьшению прочности стали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашинская Е.Г. Механизмы формирования комплекса свойств деформированных малолегированных сталей: Автореф. канд. техн. наук. -Донецк, 1994. - 22 с.
2. Никитская В.А., Пятакова Л.Л., Полтавец Н.А. и др. Улучшение механических свойств горячекатаной стали 10ХСНД // Металлург, 1973. - № 1.- С. 16-17.
3. Анциферов И.Е., Балон В.И., Краснопольский В.М. и др. Статистическое исследование химического состава и параметров термической обработки на свойства стали 10ХСНД // Производство толстолистовой стали. - М: Металлургия, 1977. - №2.-С.146-153.
4. Лейкин И.М., Литвиненко Д.А., Рудченко А.В. Производство и свойства низколегированных сталей. - М: Металлургия, 1972. - 256 с.
5. Мединская И.П. Влияние микролегирования на структуру и свойства кремнемарганцевых сталей для сварных сосудов: Автореф. канд. техн. наук. - Волгоград, 1972.-20 с.
6. Отчёт по НИР «Усовершенствование технологии прокатки стали марок 16ГС и 10ХСНД на стане 2250 с целью получения оптимального уровня механических свойств в горячекатаном состоянии». - № 068464 (КомМЗ) - № гос. рег. 77021504. - 1977. - Коммунарск. - 21 с.
7. Молдавский О.Д. Фосфор в неметаллических включениях и методы ослабления его влияния на свойства стали: Автореф. канд. техн. наук. - Москва, 1962. - 25 с.
8. Подгайский М.С. О причинах повышенной склонности к хрупкому разрушению малоуглеродистой толстолистовой стали с добавками титана более 0,3% // Производство листа. – М.: Металлургия, 1973. - № 2. - С.81-84.
9. Носоченко О.В., Сок Ю.Я., Буга И.Д. и др. Повышение качества низколегированной непрерывнолитой стали микролегированием титаном и кальцием // Металл и литьё Украины. - 1998. - № 7. - С.33-35.
10. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М. : Металлургия, 1985. - 407 с.

□ Авторы статьи:

Великоцкий

Роман Евгеньевич

- начальник патентно-информационного бюро ОАО «Алчевский металлургический комбинат»

Лащинина

Светлана Викторовна

- ассистент кафедры «Технология металлов»