

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА ВЛИЯНИЯ МИКРОЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 10Г2ФБ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ

В.П. Горбатенко, Н.И. Косаревич, В.Г. Кошарев (ДонНТУ, г. Донецк)

Установлено, что характер и степень влияния микролегирующих элементов на механические свойства стали 10Г2ФБ после контролируемой прокатки толстого листа изменяются в зависимости от температурного интервала прокатки в чистовой клети стана.

Технология контролируемой прокатки является в настоящее время основным методом производства толстых листов для изготовления труб для магистральных трубопроводов из низколегированных сталей повышенной и высокой прочности, легированных микродобавками сильных карбидо- и нитридообразующих элементов – Nb, V, Ti [1-4]. Основная цель легирования стали контролируемой прокатки этими элементами – это получение мелкозернистой конечной ее структуры, обеспечивающей необходимое сочетание показателей прочности, пластичности и вязкости, высокую хладостойкость и дополнительное упрочнение металла за счет эффекта дисперсионного твердения [1, 3-6]. Листы из таких сталей на отечественных предприятиях производят преимущественно по технологии двухстадийной контролируемой прокатки, включающей прокатку в черновой клети стана после нагрева сляба до 1040...1080 °С, подстуживание на воздухе до заданной температуры начала чистовой прокатки, прокатку в чистовой клети стана при пониженных температурах, обычно не выше 740...750 °С. Причем, с целью дополнительного упрочнения стали температуру прокатки в чистовой клети стана могут снизить до 700...710°С [3]. В связи с тем, что условия выделения карбонитридов и карбидов легирующих элементов в значительной мере определяются параметрами деформации [4], можно ожидать неоднозначного изменения показателей механических свойств стали от концентрации Nb, V, Ti.

В связи с этим в данной работе выполнен анализ характера и степени влияния изменения концентрации V и Nb в пределах марочного состава на механические свойства стали 10Г2ФБ. Листы толщиной 18,6 мм прокатывали в условиях стана 3000 ОАО “Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича” по технологии двухстадийной контролируемой прокат-

ки с контролем основных технологических параметров процесса. Анализ данных был выполнен для 735 партий листов из 157 плавок стали. С целью анализа характера влияния Nb и V в зависимости от температурного интервала чистовой прокатки все партии листов были разбиты на 5 групп в зависимости от температуры начала прокатки в чистовой клетке стана: I – 710 °С и ниже; II – 711...720 °С; III – 721...730 °С; IV – 731...740 °С; V – выше 740 °С.

Предварительный анализ результатов показал, что интервалы изменения концентрации углерода (0,07-0,13 %), легирующих элементов (Mn – 1,47-1,81 %, V – 0,080-0,110 %, Nb – 0,031-0,052 %) и примесей (Si – 0,15-0,42 %, S – 0,002-0,008 %, P – 0,008-0,023 %, Ti – 0,001-0,022 %), а также основных параметров технологического процесса (среднемассовая температура нагрева сляба – 1122-1195 °С; общее время нагрева сляба в печи – 3,4-6,5 ч; температура окончания прокатки в черновой клетке стана, – 861-1022 °С), за исключением температур начала и окончания прокатки в чистовой клетке стана, для каждой группы партий листов оказываются близкими, что позволяет получить достоверные данные сравнительного их анализа. В таблице 1 приведены механические свойства стали по каждой из групп партий листов в зависимости от температурного интервала начала прокатки в чистовой клетке стана (Тн.ч., °С).

Таблица 1 - Интервалы изменения (числитель) и средние значения (знаменатель) механических свойств стали по группам партий листов

Свойство	Значения свойства для температурного интервала Тн.ч.°С				
	≤ 710	711...720	721...730	731...740	>740
$\sigma_{в}$, Н/мм ²	<u>550 - 680</u> 621	<u>570 - 670</u> 617	<u>570 - 670</u> 612	<u>560 - 630</u> 603	<u>570 - 640</u> 602
$\sigma_{т}$, Н/мм ²	<u>490 - 590</u> 534	<u>475 - 580</u> 527	<u>490 - 570</u> 526	<u>490 - 545</u> 520	<u>500 - 540</u> 520
δ_5 , %	<u>15,5 - 29</u> 20,4	<u>17,3 - 29</u> 21,8	<u>18,5 - 28</u> 22,7	19 - 27 23,8	<u>22 - 28</u> 24,8
$\delta_{2''}$, %	<u>24,5 - 44</u> 35,2	<u>27 - 44</u> 37,3	<u>30 - 47</u> 38,6	<u>34 - 45</u> 40,8	<u>34 - 48</u> 42,2
KCV ^{-20°C} , Дж/см ²	<u>51 - 260</u> 123	<u>58 - 320</u> 140	<u>66 - 299</u> 142	<u>55 - 264</u> 154	<u>76 - 323</u> 145
KCU ^{-60°C} , Дж/см ²	<u>57 - 282</u> 153	<u>75 - 375</u> 174	<u>63 - 298</u> 179	<u>82 - 290</u> 175	<u>96 - 277</u> 174

На основе полученных зависимостей для каждого температурного интервала были рассчитаны приведенные в таблице 2 для V и Nb показатели, названные нами коэффициентами влияния элементов, которые харак-

теризуют ожидаемое изменение соответствующего показателя свойств при увеличении содержания данного элемента на 0,01 %.

Таблица 2 – Коэффициенты влияния V и Nb на механические свойства стали 10Г2ФБ в зависимости от температурного интервала начала прокатки в чистовой клети стана (Тн.ч., °С) по уравнениям зависимости показателя свойств стали от химического состава (числитель) и совместно от химического состава стали и параметров контролируемой прокатки

Свойство	Легирующий элемент	Коэффициент влияния легирующего элемента в температурном интервале Тн.ч., °С				
		≤ 710	711...720	721...730	731...740	> 740
σ_B , Н/мм ²	V	2,5/4,3	-0,2/-0,7	-0,2/-0,1	-23,1/-14,3	-7,2/6,3
	Nb	5,6/7,3	4,7/4,1	5,2/5,6	-4,4/2,9	1,7/-4,7
σ_T , Н/мм ²	V	0,8 / 4,1	-1,8 /-2,0	2,6 / 2,3	-24,9 /-2,6	-18,1/ 6,4
	Nb	2,9/ 6,1	5,2 / 4,4	4,7 / 4,7	-2,1 / 2,5	4,0 / 1,7
δ_5 , %	V	0,6 / 0,7	0,7 / 0,7	-0,2/-1,1	1,6/ 0,3	2,9 / 3,2
	Nb	0,3 / 0,5	-0,4/-0,3	-0,6/-0,4	0,4 / 0,1	0,7/-0,5
$\delta_{2''}$, %	V	0,5/ 1,5	0,7/ 0,5	-0,2/-0,6	2,7/ 1,2	4,7/-1,5
	Nb	0,6/ 0,4	-0,3/-0,3	-0,7/-0,6	3,3/ 1,4	2,7/-0,1
KCV ^{-20°C} , Дж/см ²	V	-4,7/-7,5	-12,9/-12,9	-2,3/-9,0	7,9/ 5,1	-47,8/ -91,1
	Nb	1,1/-2,1	-2,4/-0,5	-12,7/-20,7	-9,4/-36,1	-59,8/-73,8
KSU ^{-60°C} , Дж/см ²	V	-14,8/-19,5	-10,8/-11,6	-1,8/-8,6	10,8/6,9	-37,6/-86,4
	Nb	-8,9/-13,0	-1,5/-0,9	-8,3/-12,3	-15,4/-21,6	-26,9/-45,7

Примечание: Знак “+” – увеличение показателя свойств стали, а знак “-” – его снижение при повышении концентрации соответствующего элемента.

Из анализа данных таблицы 2 следует, что результаты определения коэффициентов влияния Nb и V на механические свойства стали 10Г2ФБ с учетом и без учета технологических параметров деформации для соответствующего температурного интервала прокатки в чистовой клети стана в большинстве случаев достаточно близки по значениям и совпадают по знаку. Это, по нашему мнению, позволяет считать данный подход к оценке возможного изменения характера влияния легирующих элементов на комплекс свойств стали в зависимости от условий контролируемой прокатки достаточно обоснованным. Наблюдающиеся различия в знаке коэффициентов влияния V и Nb на отдельные показатели прочностных и пластиче-

ских свойств стали, прокатанной на завершающей стадии при относительно высоких температурах могут, очевидно, объясняться более значительным влиянием температурных параметров прокатки в сравнении с эффектом микролегирования.

На основе полученных коэффициентов влияния элементов и уравнений регрессии, описывающих изменение свойств в зависимости от химического состава и параметров контролируемой прокатки были рассчитаны приведенные на рисунках 1 и 2 прогнозируемые результаты изменения показателей механических свойств стали с повышением содержания V и Nb в изученных пределах для каждой из групп партий листов при условии, когда все другие варьируемые параметры поддерживаются на среднем для данной группы листов уровне.

Выполненный анализ позволил получить ряд, на наш взгляд, интересных результатов, которые не могут быть однозначно объяснены на основе общепринятых представлений о роли легирования сильными карбидо- и нитридообразующими элементами в формировании структуры и обеспечении высокого комплекса свойств низкоуглеродистых сталей, подвергаемых контролируемой прокатке.

Так, из анализа данных, приведенных в таблице 2 и на рисунке 1, следует, что при температурах прокатки выше 730 °С можно ожидать даже отрицательного эффекта от увеличения концентрации как V, так и Nb, на прочностные характеристики стали, прежде всего, на временное сопротивление разрыву. При понижении температуры прокатки в чистовой клетке стана ниже 730 °С ванадий мало влияет на прочностные характеристики стали, следовательно, повышение его концентрации в стали, очевидно, не обеспечит сколько-нибудь заметного упрочнения металла. Следует отметить, однако, что наиболее высокое положительное значение коэффициента влияния V получили в случае прокатки листов при наиболее низких температурах (≤ 710 °С), однако, и в этом случае ожидаемый прирост прочностных свойств стали не превысит 3...4 Н/мм² на каждые 0,01 % V. Представляет интерес также тот факт, что и в случае прокатки листов при наиболее высоких температурах – выше 740 °С можно ожидать положительного влияния V на прочностные свойства стали в отличие от случая чистовой прокатки при 730...740 °С.

Следует отметить, что при общем сходном характере изменения коэффициентов влияния V и Nb в зависимости от температурного интервала прокатки листов в чистовой клетке стана можно ожидать положительного влияния повышения содержания Nb на прочностные характеристики стали в случае прокатки в чистовой клетке стана при температурах, не превышающих 730 °С. При этом коэффициент влияния Nb на прочностные свойства стали мало изменяется с понижением температуры прокатки в чистовой

клетки стана ниже 730 °С. В случае же прокатки при повышенных температурах увеличение концентрации Nb в стали может быть нежелательным по отношению к σ_B .

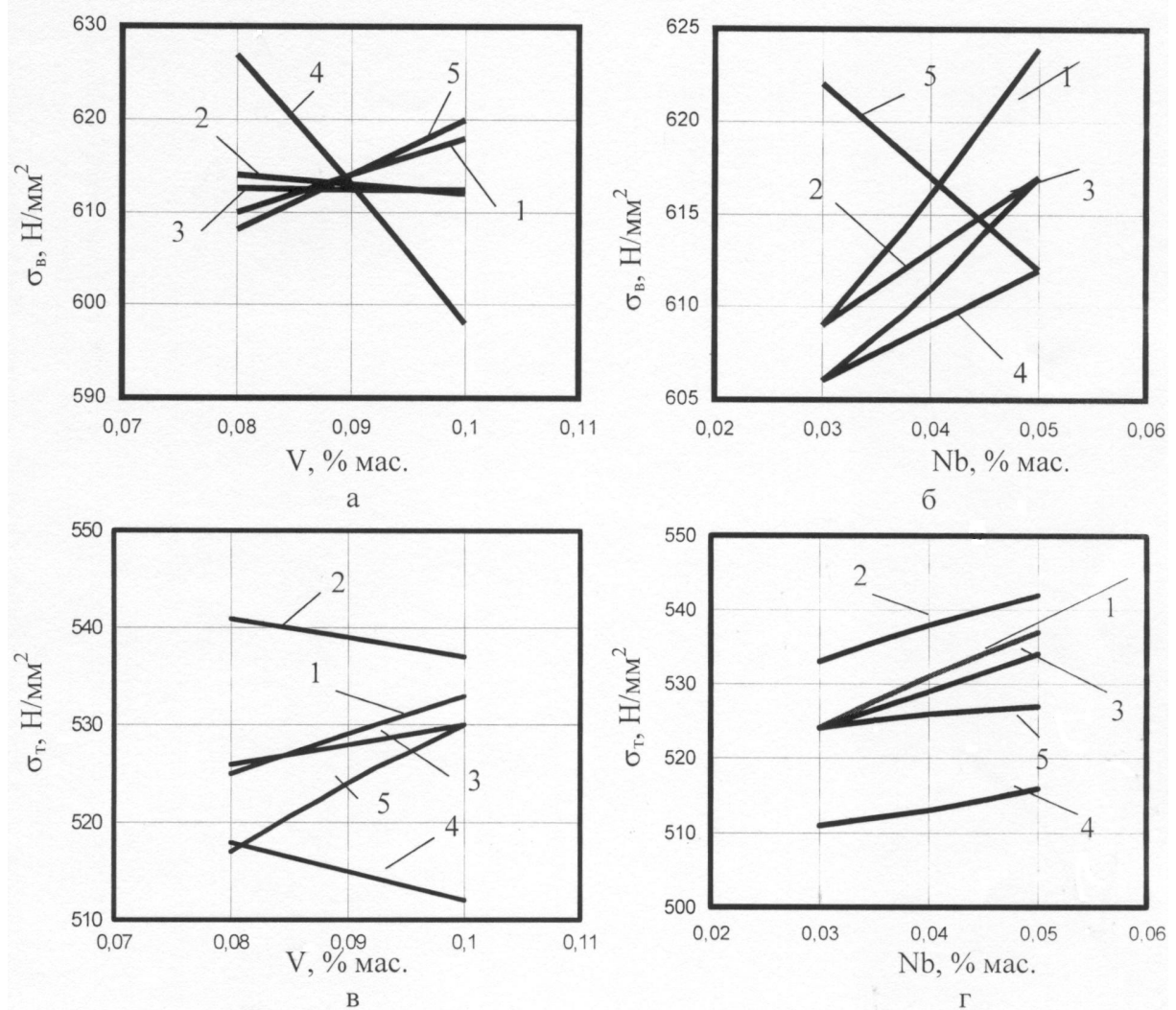


Рисунок 1 – Прогнозируемые результаты изменения показателей σ_B (а, б) и σ_T (в, г) с повышением содержания V (а, в) и Nb (б, г) в случае окончания чистовой прокатки в интервале температур ниже 710°C (1), 711...720°C (2), 721...730°C (3), 731...740°C (4) и выше 740°C (5).

Значительный положительный эффект увеличения концентрации V и Nb на показатели относительного удлинения при растяжении фиксировали в случае прокатки при повышенных температурах (таблица 2). Однако, снижение температуры прокатки в чистовой клетке стана до 720..730 °С ведет к уменьшению степени положительного влияния этих элементов и даже получению отрицательного эффекта как для V, так и для Nb на величину δ_5 и δ_2 . Дальнейшее понижение температуры прокатки в чистовой клетке стана может снижать отрицательный эффект повышения концентрации V и

Nb на показатели пластичности стали.

В отношении показателей ударной вязкости стали при отрицательных температурах испытаний коэффициенты влияния V и Nb практически для всех исследованных температурных интервалов чистой прокатки оказываются отрицательными, либо близкими к нулю. Исключение составил эффект V в случае прокатки в чистой клетке в интервале температур 730...740 °С, в котором увеличение его концентрации может обеспечить повышение показателей ударной вязкости стали (таблица 2, рисунок 2). В случае чистой прокатки при наиболее высоких температурах можно ожидать наиболее сильного отрицательного влияния повышения концентрации как V, так и Nb на ударную вязкость стали, причем, негативное влияние V может быть более значительным.

Реализация прокатки в чистой клетке стана при температурах 730...740 °С для V и 710...720 °С для Nb ведет к снижению их отрицательного эффекта на показатели ударной вязкости стали, однако, дальнейшее снижение этой температуры может усилить их отрицательное влияние V и Nb на эти характеристики качества стали.

Влияние температурных условий прокатки на свойства стали может оказаться более существенным, чем изменение концентрации легирующих элементов, что иллюстрируется данными, приведенными как на рисунках 1, 2, так и в таблице 3, в которой дана выборка из обработанной базы данных в пределах каждого из температурных интервалов для случаев, когда концентрация V и Nb близка к минимальной и максимальной, а остальные технологические параметры близки к средним значениям. Данные таблицы 3 в целом подтверждают обсужденные выше тенденции в изменении характера влияния V и Nb на механические свойства стали.

Собственно, само снижение температуры начала прокатки в чистой клетке стана приводит, как правило, к заметному снижению показателей пластичности и ударной вязкости стали. Причем, обеспечиваемый при этом эффект упрочнения стали оказывается относительно небольшим.

Таким образом, в случае начала прокатки в чистой клетке стана при наиболее высоких из реализованных в экспериментах температурах увеличение содержания как V, так и Nb представляется нежелательным. Для стали, чистовую прокатку листов из которых начинают в интервале температур 730...740 °С, повышение концентрации V может быть желательным для повышения показателей ее пластичности и ударной вязкости при возможном некотором снижении прочностных свойств.

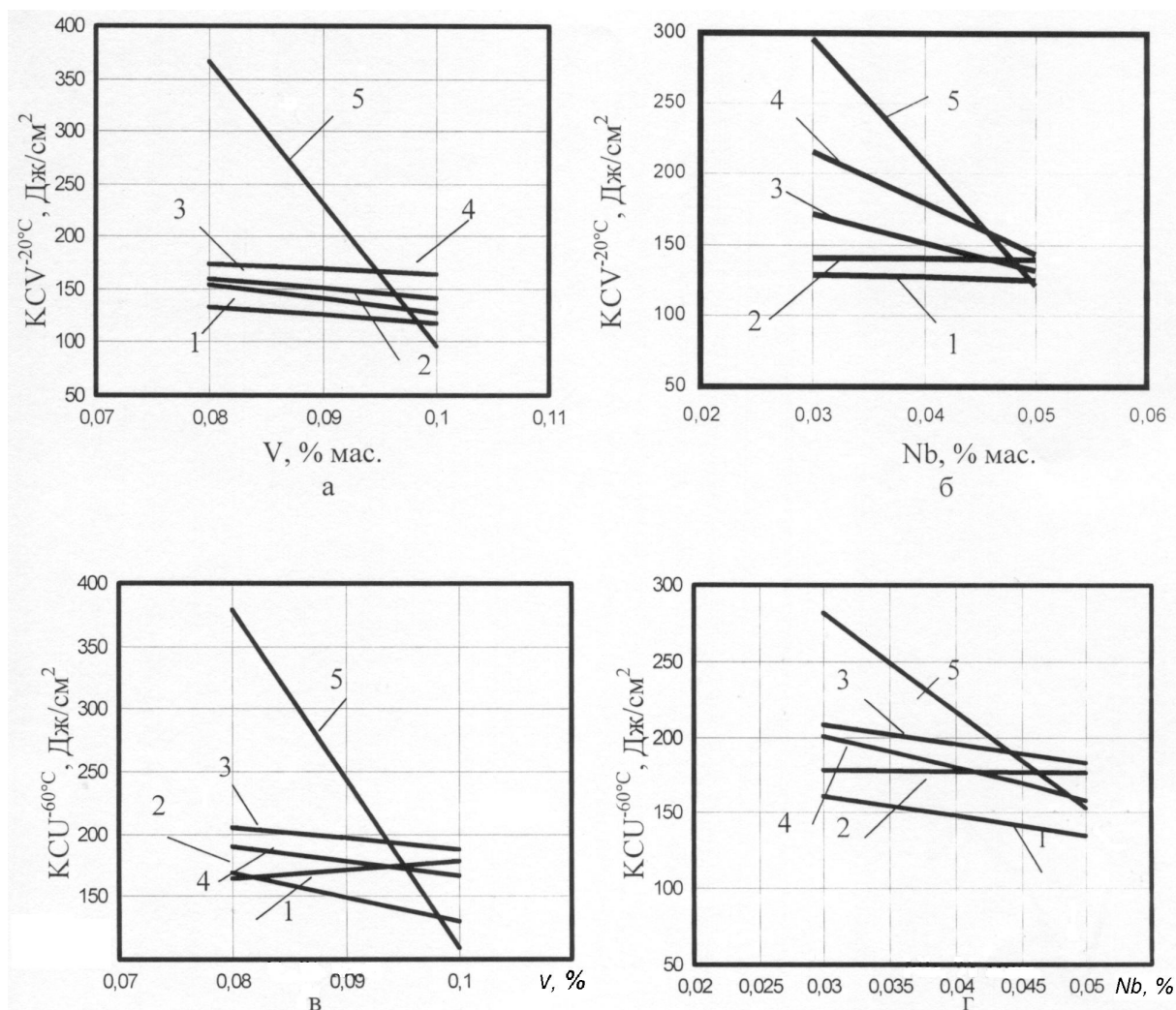


Рисунок 2 – Прогнозируемые результаты изменения показателей $KCV^{-20^{\circ}C}$ (а, б) и $KCU^{-60^{\circ}C}$ (в, г) с повышением содержания V (а, в) и Nb (б,г) в случае окончания чистой прокатки в интервале температур ниже $710^{\circ}C$ (1), $711...720^{\circ}C$ (2), $721...730^{\circ}C$ (3), $731...740^{\circ}C$ (4) и выше $740^{\circ}C$ (5).

Повышение концентрации Nb в этом случае может заметно снижать ударную вязкость стали и представляется нецелесообразным. В интервале температур чистой прокатки $720...730^{\circ}C$ повышение концентрации как V, так и Nb, очевидно, не обеспечит повышения комплекса свойств стали, следовательно, может считаться нежелательным.

Увеличение содержания Nb в стали можно рекомендовать с целью дополнительного ее упрочнения при достаточном запасе пластичности и вязкости. В случае начала чистой прокатки при температурах в интервале $710...720^{\circ}C$ повышение содержания V и Nb представляется неэффективным ввиду малого их влияния на большинство показателей свойств стали, хотя повышение концентрации Nb в этом случае может обеспечить некоторое дополнительное упрочнение стали.

Таблица 3 – Примеры изменения показателей свойств стали в зависимости от содержания V и Nb и температуры начала прокатки в чистовой клетке стана (Тн.ч.)

Тн.ч., °С	Концентрация, % мас.		σ_B , Н/мм ²	σ_T , Н/мм ²	δ_5 , %	δ_2'' , %	KCV ^{-20°C} , Дж/см ²	KCU ^{-60°C} , Дж/см ²	
	V	Nb							
≤ 710	703	0,083	0,036	600	525	20	36	131	147
	707	0,095	0,04	610	520	21	35	105	144
	705	0,086	0,034	615	535	20	38	116	156
	709	0,092	0,043	630	520	23	37	102	138
711...720	713	0,085	0,041	610	540	21	37	146	194
	717	0,098	0,046	630	540	21	39	117	153
	713	0,092	0,031	610	530	22	36	153	187
	713	0,092	0,047	630	540	20	36	127	160
721...730	722	0,084	0,042	620	530	21	41	130	214
	724	0,098	0,046	620	530	22	38	143	162
	721	0,085	0,034	600	520	20,5	36	187	236
	721	0,089	0,05	610	520	22	39	127	173
731...740	736	0,083	0,04	620	520	24	35	169	152
	734	0,098	0,041	605	520	34	37	158	187
	734	0,094	0,036	620	510	22	39	198	182
	733	0,093	0,049	600	520	23,5	41	134	145
> 740	744	0,086	0,043	605	520	34	36	279	211
	746	0,097	0,04	620	525	26	35	136	128
	744	0,091	0,034	630	520	22	41	228	178
	747	0,089	0,05	620	530	24,5	42	116	171

В случае наиболее низких температур начала прокатки в чистовой клетке стана повышение концентрации как Nb, так и V, очевидно, следует считать нецелесообразным вследствие возможного снижения и без того наиболее низких показателей ударной вязкости стали, хотя дополнительного снижения пластичности металла при этом, очевидно, ожидать не сле-

дует, а его прочностные характеристики могут быть повышены в большей мере, чем в случае более высоких температур прокатки.

Таким образом, рациональное содержание микролегирующих элементов – V и Nb – в трубных сталях повышенной и высокой прочности должно определяться с учетом планируемого режима контролируемой прокатки листов. Для обеспечения высоких показателей вязкости стали в случае пониженных температур прокатки в чистовой клети стана не рекомендуется повышать концентрацию как V, так и Nb. Прочностные же характеристики стали в большей степени возрастают под влиянием снижения температуры прокатки в чистовой клети стана, нежели с повышением концентрации микролегирующих элементов.

Перечень ссылок

1. Матросов Ю.И., Литвиненко Д.А., Голованенко С.А. Сталь для магистральных газопроводов.– М.: Металлургия.– 1989.– 288 с.
2. Перспектива развития производства штрипса класса прочности К60 для газопроводных труб диаметром 1420 мм в условиях ОАО “НОСТА”/ Ю.Д. Морозов, Л.И. Эфрон, Е.К. Шафигин, А.М. Степашин // Металлург.– 2000.– № 2.– С. 65–68.
3. Эфрон Л.И. Формирование структуры и механических свойств сталей при ТМО в потоке прокатного стана // Сталь.– 1995.– № 8.– С. 57–64.
4. Разработка и технологический процесс производства трубных сталей в XXI веке/ Ю.Д. Морозов, Ю.И. Матросов, А.С. Болотов и др. // Сталь.– 2001.– № 4.– С. 58–62.
5. Проблемы совмещения горячей деформации и термической обработки стали. / А.А. Баранов, А.А. Минаев, В.П. Горбатенко, А.Л. Геллер.- М.: Металлургия.– 1985.– 129 с.
6. Оценка анизотропии механических свойств и трещиностойкости листов и труб большого диаметра / В.М.Дорохин, В.П.Горбатенко, Ю.Д.Морозов и др. // Сталь.– 2001.– № 1.– С. 65-69.

© Горбатенко В.П., Косаревич Н.И., Конарев В.Г. 2005