



ВЫБОР СТАЛИ ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ СВАРНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. А. КОВТУНЕНКО, канд. техн. наук, **А. М. ГЕРАСИМЕНКО**, инж.

(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

А. А. ГОЦУЛЯК, канд. техн. наук (Украинский НИИ конструкционных материалов «Прометей», г. Мариуполь)

Современным требованиям к материалам для ответственных металлоконструкций строительства и машиностроения соответствует высокопрочная экономнолегированная сталь 06Г2Б. Проведен сравнительный анализ стали 06Г2Б и других, обычно применяемых в отечественных металлоконструкциях. Представлены результаты исследования служебных характеристик проката 06Г2Б и сварных соединений. Показана перспективность применения стали для изготовления ответственных металлоконструкций.

Ключевые слова: высокопрочная экономнолегированная сталь, микролегирование, прочностные свойства, хладостойкость, свариваемость, ответственные строительные металлоконструкции

В течение ряда лет Украинский НИИ конструкционных материалов «Прометей», ИЭС им. Е. О. Патона совместно проводят работу по созданию новой стали для мостовых и других ответственных строительных металлоконструкций. Комплекс исследований по отработке оптимального химического состава стали позволил понизить содержание углерода ($\leq 0,09\%$), серы и фосфора ($\leq 0,03\%$), отсутствие никеля скомпенсировано введением микродобавок карбидо- и нитридообразующих элементов. В результате исследований предложена сталь, в которой сочетаются высокая прочность и ударная вязкость за счет ограничения содержания углерода, серы, фосфора, микролегирования ниобием, ванадием и молибденом в оптимальном соотношении, модифицирующей обработки кальцийсодержащими реагентами, а также максимального измельчения структуры при термоулучшении или термической обработке [1, 2].

Благодаря химической и структурной однородности сталь 06Г2Б имеет высокие прочностные характеристики в направлениях x , y и z . Металл не теряет своих свойств после механического старения, имеет хорошие характеристики свариваемости, технологичен при использовании в условиях монтажной площадки.

Низкая склонность стали к механическому старению достигнута в результате ограничения содержания углерода и азота и их полного связывания в карбиды, нитриды, карбонитриды при раскислении и микролегировании. Путем рафинирования жидкой стали до низкого содержания серы, снижения количества и размеров неметаллических включений и диффузионной дегазации во время охлаждения листов по специальным режимам пос-

ле их прокатки обеспечиваются высокая сопротивляемость листового проката ламелярному расклевыванию (Z -свойства) и гарантированные показатели сплошности.

Результаты исследований физико-механических свойств и свариваемости опытных и опытно-промышленных партий послужили основанием для разработки и утверждения технических условий на листовую прокат свариваемых качественных сталей 06ГБ класса прочности 355-390 и 06Г2Б класса прочности 440-490 ТУ У 14-16-150-99.

Экономнолегированная сталь повышенной прочности и хладостойкости 06Г2Б для металлоконструкций (в том числе мостовых) выгодно отличается от сталей, обычно применяемых в отечественных металлоконструкциях.

Химический анализ сравниваемых сталей согласно техническим условиям приведен в табл. 1, механические свойства и ударная вязкость — в табл. 2. Сталь 06Г2Б обеспечивает показатели ударной вязкости KCV при -20°C 98, при -40 — 78, при -60 — 59 Дж/см².

Хорошая свариваемость стали 06Г2Б является следствием минимально необходимого суммарного легирования, обеспечивающего значение углеродного эквивалента $C_{\text{эКВ}} < 0,41\%$. Вычисление проведено по европейскому стандарту по формуле Международного института сварки, табл. 3:

$$C_{\text{эКВ}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mn} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15}$$

Уменьшение содержания углерода в стали 06Г2Б способствует измельчению зерна, снижает чувствительность к концентрации напряжений, что благоприятно сказывается как на выносливости, так и на хладостойкости материала и конструкций, изготовленных из него, особенно сварных.

Таблица 1. Химический состав сталей, применяемых для ответственных металлоконструкций

Марка стали	Нормативный документ	Класс прочности	Массовая доля элементов, %						
			C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S
09Г2С	ГОСТ 19281-89	295	≤ 0,12	0,50...0,80	1,30...1,70	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,040
		325							
		345							
10ХСНД	ГОСТ 19281-89	390	≤ 0,12	0,80...1,10	0,50...0,80	0,60...0,90	0,50...0,80	0,40...0,60	≤ 0,040
16Г2АФ	ГОСТ 19281-89	440	0,14...0,20	0,30...0,60	1,30...1,60	≤ 0,40	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,040
09Г2СЮЧ	ТУ У 322-16-127-97	325 390	0,08...0,11	0,30...0,60	1,90...2,20	≤ 0,30	≤ 0,30	< 0,30... 0,60	≤ 0,015
06ГБ	ТУ У 14-16-150-99	390	0,04...0,08	0,15...0,35	1,10...1,40	≤ 0,20	≤ 0,35	0,15...0,30	≤ 0,010
06Г2Б		440	0,04...0,08		1,30...1,60				
		490	0,05...0,09		1,50...1,60				

Окончание табл. 1

Марка стали	Нормативный документ	Класс прочности	Массовая доля элементов, %						
			P	Nb	Ti	Mo	V	N	Прочие
09Г2С	ГОСТ 19281-89	295	≤ 0,035	—	≤ 0,03	—	—	—	—
		325							
		345							
10ХСНД	ГОСТ 19281-89	390	≤ 0,035	—	≤ 0,03	—	—	—	—
16Г2АФ	ГОСТ 19281-89	440	≤ 0,035	—	—	—	0,08...0,14	0,015...0,025	—
09Г2СЮЧ	ТУ У 322-16-127-97	325 390	≤ 0,020	—	—	—	—	—	РЗМ 0,002...0,005
06ГБ	ТУ У 14-16-150-99	390	≤ 0,020	0,01...0,03	≤ 0,20	0,01...0,03	0,040...0,070	≤ 0,01	≥ 0,001 Ca 0,02...0,05 Al
06Г2Б		440		0,03...0,05		0,05...0,08			
		490		0,03...0,05		0,05...0,08			

Таблица 2. Механические свойства сталей, применяемых для ответственных металлических конструкций

Марка стали	Нормативный документ	Класс прочности	Толщина металла, мм	σ _T , МПа	σ _B , МПа	δ, %	KCU, Дж/см ²			
							-40 °C	-70 °C	механическое старение	
									+20 °C	-20 °C
09Г2С	ГОСТ 19281-89	295	20...32	295	430	21	29	24	29	—
		325	10...20	325	450	21	34	29	29	—
		345	До 10	345	490	21	39	29	29	—
10ХСНД	ГОСТ 19281-89	390	До 10 10...15 15...40	390	510	19	44 39 39	34 29 29	29	—
	ГОСТ 6713-91	390	8...15 16...32 33...40	390	530...685 530...670 510...670	19	39	29	29	29
16Г2АФ	ГОСТ 19281-89	440	20...32	440	590	19	39	29	29	—
09Г2СЮЧ	ТУ У 322-16-127-97	325 390	8...20 21...30 31...40	450 430 400	570 560 530	19	39 39 —	29	39	29
06ГБ	ТУ У 14-16-150-99	390	8...50	390	—	22	—	—	—	—
06Г2Б		440		440		22				
06Г2Б		490		490		20				



Марка стали	Нормативный документ	Класс прочности	Толщина металла, мм	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	KCV , Дж/см ²				
							0 °С	-20 °С	-40 °С	-60 °С	-70 °С
09Г2С	ГОСТ 19281-89	295	20...32	295	430	21	—	—	—	—	—
		325	10...20	325	450	21	—	—	—	—	—
		345	до 10	345	490	21	—	—	—	—	—
10ХСНД	ГОСТ 19281-89	390	до 10 10...15 15...40	390	510	19	— 40 40	— — 40	—	—	—
	ГОСТ 6713-91		8...15 16...32 33...40				390	530...685 530...670 510...670	19	—	—
16Г2АФ	ГОСТ 19281-89	440	20...32	440	590	19	—	—	—	—	—
09Г2СЮЧ	ТУ У 322-16-127-97	325	8...20	450	570	19	—	39	29	—	29
		390	21...30	430	560						
		390	31...40	400	530						
06ГБ 06Г2Б 06Г2Б	ТУ У 14-16-150-99	390	8...50	390	—	22	—	98	78	59	—
440		440		22							
490		490		20							

Неоспоримым преимуществом стали 06Г2Б является низкое содержание примесей. За счет этого снижается склонность к образованию горячих трещин при сварке, повышается коррозионная стойкость и хладостойкость.

В ИЭС им. Е. О. Патона проведена комплексная работа по исследованию промышленной партии стали 06Г2Б класса прочности 440 толщиной 30 мм (поставлена по ТУ У 14-16-150-99 металлургическим комбинатом «Азовсталь»), а также по отработке технологии и техники сварки.

Сталь выплавлена в кислородном конвертере емкостью 350 т с последующей обработкой жидким синтетическим шлаком и продувкой порошкообразным силикокальцием в струе аргона, что обеспечило низкое содержание серы, фосфора и неметаллических включений. Разливку осуществляли на установке непрерывного литья.

В табл. 4, 5 представлены результаты механических испытаний проката стали 06Г2Б. Прочностные свойства вдоль и поперек проката находятся практически на одном уровне и соответствуют нормам ТУ У 14-16-150-99. Сталь отли-

Таблица 3. Значение углеродного эквивалента сталей, применяемых для ответственных металлоконструкций

Марка стали	Значение углеродного эквивалента $C_{эkv}$, %	
	минимальное	максимальное
09Г2С, ГОСТ 19281-89	0,42	0,49
10ХСНД, ГОСТ 19281-89	0,38	0,52
16Г2АФ, ГОСТ 19281-89	0,36	0,61
09Г2СЮЧ, ТУ У 322-16-127-97	0,49	0,59
06Г2Б, ТУ У 14-16-150-99	0,34	0,46

вается хорошими пластическими свойствами, относительное удлинение и сужение металла соответственно составляет не менее 30 и 80 %.

Структура стали представляет собой мелкозернистую ферритно-перлитную смесь с преобладанием ферритной составляющей (малоperlитная структура), твердость стали HV 170...180. Значение углеродного эквивалента по европейскому стандарту $C_{эkv} = 0,357$ %. Относительное сужение по толщине проката ($\psi_z \geq 79$ %) характеризует высокую сопротивляемость слоистому разрушению. Ударная вязкость KCV исследуемого проката существенно превышает требования технических условий.

В соответствии с программой исследования стали 06Г2Б проводили оценку поведения металла после термомеханического старения по ГОСТ 7268-82. Старение осуществляли деформацией заготовки растяжением $10 \pm 0,5$ % и нагревом образцов до температуры 250 ± 10 °С, выдержкой в течение 1 ч с последующим охлаждением на воздухе. Результаты испытаний по сравнению с результатами испытания стали 06Г2Б толщиной 30 мм на ударный изгиб в исходном состоянии представлены в табл. 5.

Значения ударной вязкости стали 06Г2Б толщиной 30 мм после термомеханического старения несколько снижаются, но остаются на высоком уровне.

Стабильность результатов исследования механических свойств листового проката стали 06ГБ (класс прочности 390) и 06Г2Б (класс прочности 440) позволяют установить коэффициент надежности по материалу $\gamma_m = 1,10$. Норматив-

Таблица 4. Механические свойства проката стали 06Г2Б толщиной 30 мм при температуре испытаний 20 °С

Тип образца по ГОСТ 1497-84	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	Примечание
Тип I	$\frac{484...488}{486}$	$\frac{548...554}{551}$	$\frac{23,5...23,5}{23,5}$	$\frac{71,1...72,1}{72,1}$	Поперек проката
	$\frac{484...498}{491}$	$\frac{548...548}{548}$	$\frac{24,5...26,5}{25,5}$	$\frac{74,4...74,4}{74,4}$	Вдоль проката
Тип III	$\frac{499...503}{500,6}$	$\frac{569...579}{574}$	$\frac{29,3...30,7}{30,0}$	$\frac{82,6...84,0}{83,5}$	Поперек проката
	$\frac{479...496}{487}$	$\frac{570...576}{572}$	$\frac{30,3...32,3}{31,3}$	$\frac{82,6...84,0}{83,5}$	Вдоль проката
	$\frac{440...458}{452}$	$\frac{555...569}{559,3}$	$\frac{25,3...31,3}{28,1}$	$\frac{74,8...84,0}{81,5}$	В Z-направлении

Таблица 5. Ударная вязкость проката стали 06Г2Б толщиной 30 мм*

KCU, Дж/см ² (тип I по ГОСТ 9454-78)						KCV, Дж/см ² (тип IV по ГОСТ 9454-78)			
+20 °С		-40 °С		+20 °С	-40 °С	+20 °С		-40 °С	
вдоль	поперек	вдоль	поперек	после старения		вдоль	поперек	вдоль	поперек
430	434	432	429	345	346	429	431	433	433
431	430	432	429	347	347	430	433	431	434
432	431	431	430	347	346	432	434	429	432

* Полностью разрушить образцы типов I и IV при T = +20 и -40 °С не удалось, доля вязкого излома 90 %.

Таблица 6. Нормативные и расчетные сопротивления стали 06Г2Б толщиной 30 мм

Марка стали	Толщина проката, мм	Нормативное сопротивление, МПа		Расчетное сопротивление, МПа	
		по пределу текучести	по временному сопротивлению	по пределу текучести	по временному сопротивлению
06ГБ (С 390)	10...20	3900	5230	3550	4750
	21...50	3850	5170	3500	4700
06Г2Б (С 440)	10...20	4400	5690	4000	5180
	21...50	4350	5610	3950	5100

Таблица 7. Механические свойства сварных соединений стали 06Г2Б толщиной 30 мм и металла сварных швов

Способ сварки	Сварочные материалы	Сварное соединение			Металл шва			
		σ_B , МПа	место разрыва	угол загиба, град	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	ψ , %
Автоматическая под флюсом	Св-10НМА, АН-47	527	ОМ	180	624	537	23	66
		538	ОМ	180	638	572	23	66
Автоматическая в CO ₂ (горизонтальные швы на вертикальной плоскости)	Св-08Г2С, CO ₂	540	ОМ	150	690	624	19	64
		532	ОМ	62	693	636	22	67
Полуавтоматическая в CO ₂	Св-08Г2С, CO ₂	—	—	—	575	461	27	73
		—	—	—	563	445	29	69
Ручная дуговая	Электроды УОНИ-13/55	542	ОМ	148	568	454	25	73
		531	ОМ	150	617	541	20	75
	Электроды FOX EV 50	585	ОМ	180	577	471	28	76
		627	ОМ	180	604	514	32	77

ные и расчетные сопротивления представлены в табл. 6.

Сварные стыковые соединения стали 06Г2Б выполняли ручной дуговой сваркой электродами

марки УОНИ-13/55 и FOX EV 50, автоматической сваркой под слоем флюса в нижнем положении и в углекислом газе (горизонтальный шов на вертикальной плоскости), тавровые соединения —



Таблица 8. Ударная вязкость металла шва и ЗТВ сварных соединений стали 06Г2Б толщиной 30 мм

Способ сварки	Сварочные материалы	Ударная вязкость KCV , Дж/см ²			
		+20 °С		-40 °С	
		центр шва	ЗТВ	центр шва	ЗТВ
Автоматическая под флюсом	Св-10НМА, АН-47	125	431	34	233
		142	226	36	195
		100	285	36	195
Автоматическая в CO ₂ (горизонтальные швы на вертикальной плоскости)	Св-08Г2С, CO ₂	164	432	114	432
		182	433	89	429
		132	431	41	430
Полуавтоматическая в CO ₂	Св-08Г2С, CO ₂	189	244	99	143
		172	302	107	119
				76	131
Ручная дуговая	Электроды УОНИ-13/55	118	107	55	208
		141	299	50	302
		158	431	29	
	Электроды FOX EV 50	—	355	—	324
			369		373
			362		352



Рис. 1. Подготовка сваренных ЭШС блоков к контрольной сборке царги корпуса ДП-9 КГМК «Криворожсталь»



Рис. 2. Резервуар вместимостью 75000 м³ с применением стального проката 06Г2Б класса прочности С440 г. Броды (строительство осуществлялось методом подрачивания)

полуавтоматической сваркой в защитном газе. Результаты испытаний сварных соединений на растяжение и ударную вязкость представлены в табл. 7, 8.

В целом проведенные исследования показали, что экономнолегированная малоперлитная сталь 06Г2Б класса прочности 440-490 имеет стабильные механические характеристики и ударную вязкость. Следует особенно отметить высокую хладостойкость данной стали ($KCV_{-40} \geq 300$ Дж/см²). Сталь хорошо сопротивляется слоистому разрушению, нечувствительна к водородному охрупчиванию и отличается высокой стойкостью против образования в металле ЗТВ холодных трещин [3].

Установлено, что прочностные, пластические свойства и ударная вязкость шва и металла ЗТВ сварных соединений стали обеспечиваются на уровне требований ТУ У 14-16-150-99.

Производство листового проката стали 06Г2Б (06ГБ) освоено на ОАО «Меткомбинат «Азовсталь» и ОАО «Меткомбинат им. Ильича». В 2003 г. этими предприятиями изготовлено в целом 1700 т листового проката толщиной 12...45 мм. Металл использовали при капитальном ремонте домны № 9 (рис. 1) Криворожского меткомбината «Криворожсталь» [4], строительстве уникального резервуара для хранения нефти вместимостью 75000



Рис. 3. Сооружение доменной печи ДП-2 на ОАО «Азовсталь»

(рис. 2) и парка резервуаров 20000 м³. В 2005 г. прокат стали 06Г2Б толщиной 50 мм применили при строительстве доменной печи ДП-2 (рис. 3) на ОАО «Меткомбинат «Азовсталь». Листовой

прокат полностью удовлетворяет требованиям ТУ, а по характеристикам работы удара, ударной вязкости после деформационного старения, поперечному сужению и поперечному сужению в направлении толщины фактические результаты значительно превосходят нормативный уровень. В настоящее время из стали 06ГБ(Д) класса прочности 390 изготавливаются конструкции моста через вход в Гавань в г. Киеве.

Учитывая, что вопросы коррозионной стойкости являются основными для эксплуатационного ресурса мостов, Украинским НИИ конструкционных материалов «Прометей» совместно с ИЭС им. Е. О. Патона выполняются работы по созданию стали аналогичного класса прочности повышенной атмосферостойкости.

1. *Высокопрочная экономнолегированная сталь 06Г2Б с $\sigma_T > 440$ МПа для мостостроения* / В. А. Ковтуненко, А. М. Герасименко, А. Г. Синюк // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. — 2004. — № 69. — С. 106–113.
2. *Высокопрочная экономнолегированная сталь 06Г2Б с $\sigma_T > 440$ МПа для ответственных изделий машино-, судно-, мостостроения и строительных конструкций* / В. А. Ковтуненко, А. М. Герасименко, А. А. Гоцуляк // Материалы междунар. коллоквиума «Стальные резервуары: конструкции, сварка, диагностика, ремонт, ресурс», Варна, 18–20 мая, 2004 г. — С. 46–53.
3. *Экономнолегированные высокопрочные стали для сварных конструкций* / Л. И. Миходуй, В. И. Кирьян, В. Д. Позняков // Автомат. сварка. — 2003. — № 5. — С. 36–40.
4. *Сварочные технологии при капитальном ремонте доменной печи № 9 «КГМК «Криворожсталь»* / Л. М. Лобанов, В. А. Ковтуненко, А. М. Герасименко и др. // Материалы междунар. конф. «Современные проблемы сварки и ресурса конструкций», Киев, 24–27 ноябр., 2003 г. — 114 с.

Sparselyalloyed high-strength steel 06G2B meets current requirements to materials for critical metal structures applied in construction engineering and machine building. Comparative analysis of steel 06G2B and other steels extensively used in critical metal structures has been conducted. Results of investigation of service properties of rolled stock 06G2B and welded joints are presented. It is shown that the steel holds promise for fabrication of critical metal structures.

Поступила в редакцию 08.06.2006

НИЗКОВОДОРОДНЫЙ СВАРОЧНЫЙ ФЛЮС МАРКИ АН-60СМ

Разработан сварочный флюс АН-60СМ для механизированной сварки и наплавки низкоуглеродистых и низколегированных сталей соответствующими сварочными проволоками. Флюс АН-60СМ обеспечивает содержание диффузионного водорода в наплавленном металле около 3 см³/100 г и благодаря этому превосходит флюсы марок АН-348А, ОСЦ-45 и АНЦ-1 по стойкости к образованию пор.

Разработаны технические условия Украины на флюс АН-60СМ (ТУУ 05416923.013–96) и освоено его серийное производство. Флюс внедрен при сварке бытовых газовых баллонов на Дружковском заводе газовой аппаратуры и кранов, при сварке колес на Кременчугском колесном заводе, при сварке резервуаров на ОАО «Снежнянськимаш» и металлоконструкций на Макеевском заводе металлоконструкций.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 15

Тел.: (38044) 287 46 66; факс: (38044) 287 54 88; e-mail: pwi15@i.com.ua; hawtech@ukr.net