

## ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ДЛЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ КОЖУХОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

**М**еталлургическое производство в Украине было и остается базовой отраслью промышленности, ориентированной в основном на собственные сырьевые и топливно-энергетические ресурсы, а доменная плавка – основным способом получения чугуна.

Среди объектов доменного комплекса собственн доменная печь является сооружением, определяющим не только возможность непрерывного ведения технологического процесса, но и его общую промышленную безопасность.

Основным элементом доменной печи служит ее стальной кожух, представляющий собой ряд соосных сопряженных цилиндрических и конических оболочек различной толщины, ослабленных большим числом отверстий различного размера и конфигурации, предназначенных для крепления оборудования. Особенностью конструкции кожуха печи является совмещение им функций сложного инженерного строительного сооружения и технологического агрегата.

Выполняя функции технологического агрегата, кожух подвергается постоянному воздействию переменных по времени высоких температур, циклическому, пульсирующему давлению газовой среды, значительным механическим нагрузкам, коррозионным воздействиям и т.п. При этом сложность и многофакторность ведения технологического процесса не всегда обеспечивает стабильность расчетных эксплуатационных нагрузок. В связи с этим, проектирование кожуха доменной печи напрямую связано с пониманием технологии доменного производства, назначения и работы оборудования, а также взаимного влияния всех строительных и технологических факторов, определяющих характер и величину передаваемых ими нагрузок и воздействий.

Основной характерной особенностью процесса доменной плавки является его идеализируемая непрерывность, что, при соблюдении



**В.Н. Король**  
начальник Днепропетровского филиала ООО «Метинвест Инжиниринг», г. Днепр



**Е.И. Гезенцевей**  
начальник отдела строительного проектирования ООО «Метинвест инжиниринг», г. Днепр



**Е.С. Иосилевич**  
ведущий инженер отдела строительного проектирования ООО «Метинвест инжиниринг», к.т.н., г. Днепр

условия стабильности, должно было бы обуславливать стационарный характер нагрузок и воздействий, воспринимаемых конструкциями печи в процессе эксплуатации.

Однако реальный доменный процесс, несмотря на его действительную непрерывность, носит весьма нестабильный характер, что приводит в процессе эксплуатации печи к нестационарному характеру основных нагрузок как по величине, так и по зоне их максимального воздействия.

Нестационарность технологического процесса в первую очередь связана с его основным противоречием, заключающимся в непрерывности доменной плавки с одной стороны и периодичности загрузки печи и выпуска жидких продуктов плавки – с другой (см. таблицу 1). Это обстоятельство в значительной степени влияет на газодинамические и тепловые процессы внутри печи, изменяя нагрузки и воздействия по величине и району возникновения.

Таблица 1

Объем печи, м <sup>3</sup>	1000	1000–1700	2000	2700	3200	5000
Ориентировочное число выпусков чугуна в сутки	4–5	6–7	8–12	14–16	18–20	20–24

Таблица 2

Среди других причин, нарушающих стационарный характер нагрузок, можно отметить:

- остановку печи на ремонт;
- выплавку различных видов чугуна, что приводит к существенному изменению как теплового, так и газодинамического состояния печи.

Кроме того, возникают ситуации, вызванные нарушением технологического процесса и приводящие к возникновению дополнительных нагрузок на металлоконструкции кожуха печи:

- перекося уровня шихты в печи, приводящий к неравномерному одностороннему нагреву кладки;
- подвешивание шихтовых материалов с дальнейшим их обрушением;
- настывлеобразование;
- образование тепловых пятен, приводящее к появлению зон двухосного сжатия;
- изменение направления движения газов внутри печи (канальный, периферийный ход газов).

За время кампании печи (т.е. за время, исчисляемое от ее задувки до капитального ремонта I-го разряда, составляющее, как правило, 10–15 лет) происходит существенное разрушение огнеупорной кладки, просыпание набойки, выход из строя значительного числа холодильников, что вызывает перегрев и связанное с этим снижение прочностных характеристик стали. По имеющимся данным [1, 2] разогрев отдельных зон кожуха достигает 300–600 °С.

В монографии [3] приведены результаты расчетно-теоретических исследований кожухов доменных печей в районе чугунной летки, в зоне ослаблений фурменными отверстиями, а также в зоне крепления плитового вертикального холодильника при выходе его из строя, результаты которых приведены в таблице 2.

Кроме того, при длительных и повторяющихся температурных воздействиях в сварных соединениях кожуха развиваются процессы охрупчивания металла, которые при наличии двухосного и трехосного напряженного состояния повышают риск хрупкого разрушения. Одной из причин снижения характеристик сопротивления хрупкому трещинообразованию является развитие в металле тепловой хрупкости в процессе эксплуатации при температурах свыше 300 °С.

Фактор	Коэффициенты концентрации напряжений		
	кольцевых	меридиональных	
Ослабление фурменными отверстиями	2,82	1,26	
Ослабление в зоне чугунной летки	2,13	0,87	
Зона крепления плитового вертикального холодильника при выходе его из строя и нагреве до:	600 °С	4,47	7,95
	800 °С	5,96	10,6
	1000 °С	7,45	13,25

Кожух доменной печи может длительное время эксплуатироваться в экстремальных условиях «пиковых» воздействий, вызывающих значительные напряжения, иногда превышающие предел текучести металла. Так, натурные экспериментальные исследования показывают, что на ряде печей при средних измеренных напряжениях в кожухе лещади и горна, обычно составляющих 200–250 МПа, в районе чугунной летки возникают местные деформации, соответствующие растягивающим напряжениям на уровне 450 МПа.

Это может стать причиной сравнительно невысокой длительности эксплуатации сооружения и создать условия для возникновения непредсказуемых ситуаций, а также увеличивает вероятность возникновения трещин и других повреждений, приводящих к его частичному, а иногда и значительному повреждению.

Анализ эксплуатации объектов металлургических предприятий показывает, что на доменное производство приходится более 26 % всех аварий. При этом почти 15 % из них происходят из-за повреждений кожухов доменных печей [4].

Дополнительный ориентировочный уровень напряжений, вызванный некоторыми дефектами, возникшими в результате неудовлетворительного качества монтажа и нарушения нормального режима эксплуатации [4], приведен в таблице 3.

Наиболее опасным видом повреждений для кожуха доменной печи являются трещины, поскольку, учитывая наличие избыточного внутреннего давления, их возникновение может привести к аварийной ситуации.

Таблица 3

Дефекты конструкции или воздействие на нее	Дополнительные напряжения, МПа
Местный перегрев кожуха до 300 °С	80
Местный перегрев кожуха до 500–700 °С	150–200
Депланации стыков в листах до 5 мм	30
Оставленные при монтаже футерованных кожухов скобы и кронштейны	80–150
Уменьшение компенсационного слоя в футеровке на 20–25 мм	70–80
Подрез глубиной 0,5 мм радиусом 0,25 мм для толщины листа 20 мм	Коэффициент концентрации напряжений 3,6

Согласно данным [5], места возникновения опасных трещин локализируются по зонам кожуха следующим образом:

- зона горна и чугунных леток – 65 %;
- заплечики – 16 %;
- шахта – 19 %.

Также часто возникают трещины в кожухе лещади, располагающиеся, как правило, вертикально и зачастую проходящие по всей ее высоте. Такие трещины особенно опасны, поскольку плохо поддаются ремонту (после заварки через короткий промежуток времени появляются вновь) и могут привести к прорыву жидкого чугуна, что, как правило, вызывает значительное повреждение не только кожуха, но и окружающих конструкций.

Восстановление доменных печей после аварий связано с длительными остановками производства, значительными потерями продукции и большими капиталовложениями, что существенно усложняет проблему обеспечения длительной прочности кожуха печи.

Учитывая вышеизложенное, особое значение при проектировании металлоконструкций таких сооружений, как кожух доменной печи приобретает выбор материала, максимально соответствующего по свойствам сложным условиям его эксплуатации.

Кроме обеспечения прочностных свойств, сталь для кожуха доменной печи должна воспринимать расчетные напряжения, в том числе и «пиковые», без возникновения хрупкого разрушения. Поскольку хрупкое разрушение не прогнозируется при традиционных расчетах конструкций на прочность, для наиболее ответственных конструкций, таких как кожух доменной печи, должна выбираться сталь с малой склонностью к хрупкому разрушению, основным показателем которого является показатель ударной вязкости. Согласно данным [4], независимо от климатической температуры района строительства и температуры эксплуатации для кожухов доменных печей применяется сталь с гарантированным показателем ударной вязкости не менее 0,3 МДж/м<sup>2</sup> на образцах КСУ при температуре –40 °С. Кроме того, сталь должна обладать хорошей свариваемостью.

Таблица 4

Влияние химических элементов на свойства стали

Показатель	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	V	Mb	Ti	Al
<b>Механические свойства</b>												
Временное сопротивление	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0
Предел текучести	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0
Относительное удлинение	=	–	–	=	0	0	0	0	–	–	0	0
Ударная вязкость	–	=	–	=	–	+	+	0	0	0	–	0
Твердость	++	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	0
Усталостная прочность	+	0	0	0	0	0	0	0	++	++	0	0
<b>Технологические свойства</b>												
Свариваемость	–	–	0	–	0	0	0	–	+	+	+	0
Стойкость против коррозии	0	–	+	+	0	+	+	++	+	+	0	0
Хладноломкость	0	0	0	+	0	–	–	–	0	0	0	0
Красноломкость	+	+	0	0	+	0	0	0	0	–	0	0
Сохранение микроструктуры при нагреве	0	0	0	0	0	0	++	0	++	0	++	++
Сопротивление охрупчиванию при нагревании	0	++	0	0	0	++	++	+	0	++	0	0
<b>Условные обозначения:</b>	++ – значительно повышает;			= – значительно снижает;			0 – не оказывает влияния;					
	+ – повышает;			– – снижает.								

Поскольку сталь фактически является сплавом железа, углерода и других примесей, существенное влияние на ее механические и технологические свойства оказывает химический состав. В таблице 4 приведены данные о качественном влиянии на свойства стали различных химических элементов [6].

Кроме того, высокие температуры негативно влияют на физико-механические свойства стали, при нагревании наблюдается заметное снижение механических характеристик. Значения расчетного сопротивления стали марки 09Г2С при изменении температуры по данным [4] приведены в таблице 5.

Таблица 5

Температура, °С	Расчетное сопротивление, МПа
20	290
200	230
250	220
300	200
350	180
400	150
450	100
500	-

Наиболее широко применяемая в практике проектирования кожухов сталь класса С345-3 (марка 09Г2С-12) по ГОСТ 19281-89 при толщине листов 30–50 мм не в полной мере удовлетворяет всем указанным требованиям. При обеспечении достаточного уровня прочности по приведенным расчетным напряжениям, в местах возникновения зон повышенных локальных

напряжений предел текучести стали бывает превышен.

В зарубежной практике проектирования (США) кожухи доменных печей объемом 3200–4000 м<sup>3</sup>, как правило, выполняются из листов толщиной 75 мм из сталей с пределом текучести 380–620 МПа. Для печей меньшего объема толщина кожуха составляет 40–60 мм.

ООО «Метинвест инжиниринг» при проектировании замены кожуха доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> для ДП № 3 ЧАО «Азовсталь» были проведены расчетно-теоретические исследования его напряженно-деформированного состояния, которые показали, что при применении для металлоконструкций стали марки 09Г2С уже при нагреве до 200 °С прочность в зоне лещадки не обеспечивается (т.е. при возникновении зон локального перегрева кожуха весьма вероятно возникновение аварийной ситуации).

Учитывая все изложенные выше аспекты, была предложена экономлегированная сталь марки 06Г2Б класса прочности С440 по ТУ У 27.1-26416904-150:2005 толщиной 40–50 мм.

Сталь разработана украинским НИИ конструкционных материалов «Прометей», Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины совместно с ЧАО «Азовсталь». Ранее сталь применялась при капитальном ремонте доменной печи № 9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог», при строительстве доменной печи № 2 ЧАО «Азовсталь», а также при строительстве резервуара для хранения нефти объемом 75000 м<sup>3</sup> в г. Броды и серии резервуаров объемом 20000 м<sup>3</sup>.

Таблица 6

**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	295-345	≤0,12	0,05-0,08	1,3-1,7	≤0,3	≤0,3	0,15-0,3	≤0,04
10ХСНД		390	≤0,12	0,8-1,1	0,5-0,8	0,6-0,9	0,5-0,8	0,4-0,6	≤0,04
06ГБ	ТУ У 27.1-26416904-150:2005	390	0,04-0,09	0,15-0,35	1,1-1,4	≤0,25	≤0,25	≤0,14	≤0,01
06Г2Б		440			1,3-1,6				
		490			1,5-1,7				

Марка стали	Нормативный документ	Класс прочности	Массовая доля элементов, %						
			P	Nb	Ti	Mo	V	N	Прочие
09Г2С	ГОСТ 19281-89	295-345	≤0,035	-	≤0,03	-	-	-	-
10ХСНД		390	≤0,035	-	≤0,03	-	-	-	-
06ГБ	ТУ У 27.1-26416904-150:2005	390	≤0,02	0,01-0,03	≤0,02	0,01-0,2	≤0,07	≤0,012	≥0,001Ca 0,02-0,05 Al
06Г2Б		440		0,03-0,05		0,05-0,2	0,04-0,07		
		490							

Сталь марки 06Г2Б имеет высокие прочностные показатели и ударную вязкость, низкую способность к механическому старению. Листовой прокат из этой стали отличается высокой сопротивляемостью ламелярному растрескиванию (Z-свойства) и гарантированными показателями

сплошности [7]. К преимуществам стали 06Г2Б также относится низкое содержание примесей, за счет чего снижается образование горячих трещин при сварке и повышается хладостойкость и коррозионная стойкость.

Таблица 7

Механические свойства сталей, применяемых для ответственных металлоконструкций

Марка стали	Нормативный документ	Класс прочности	Толщина металла, мм	$\sigma_r$ , МПа	$\delta$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>			
						-40 °С	-70 °С	после мех. старения (+20 °С)	
09Г2С	ГОСТ 19281-89	295	20-60	295	21	29	24	29	
		325	20-60	325		29	24		
		345	20-32	345		29	29		
10ХСНД		390	до 10	390	19	44	34	29	
			10-15			39	29		
			15-40			39	29		
06ГБ	ТУ У 27.1-26416904-150:2005	390	8-50	390	22	-	-	-	
06Г2Б		440		440					22
		490		490					20

Таблица 7а

Марка стали	Нормативный документ	Класс прочности	Толщина металла, мм	КCV, Дж/см <sup>2</sup>					
				0 °С	-20 °С	-40 °С	-60 °С	-70 °С	после мех. старения
09Г2С	ГОСТ 19281-89	295	20-32	-	-	-	-	-	-
		325	10-20						
		345	до 10						
10ХСНД		390	до 10	-	-	-	-	-	-
			10-15	40	-	-	-	-	-
			15-40	40	40	-	-	-	-
06ГБ	ТУ У 27.1-26416904-150:2005	390	8-50	-	-	98	78	59	39
06Г2Б		440							
		490							

Таблица 8

Механические свойства сварных соединений (при толщине проката 30 мм)

Способ сварки	Сварочные материалы	Сварное соединение			Металл шва			
		$\sigma_b$ , МПа	место разрыва	угол загиба, град.	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
Автоматическая под флюсом	Св-10НМА, АН-47	527	ОМ	180	624	537	23	66
		538	ОМ	180	638	572		
Автоматическая в CO <sub>2</sub> (горизонтальные швы на вертикальной плоскости)	Св-08Г2С, CO <sub>2</sub>	540	ОМ	150	690	624	19	64
		532	ОМ	62	693	636	22	67
					600	492	20	67
Полуавтоматическая в CO <sub>2</sub>	Св-08Г2С, CO <sub>2</sub>	-	-	-	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



Таблица 9

**Ударная вязкость металла шва и ЗТВ сварных соединений (при толщине проката 30 мм)**

Способ сварки	Сварочные материалы	KCV, Дж/см <sup>2</sup>			
		+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 СО <sub>2</sub> (горизонтальные швы на вертикальной плоскости)	Св-08Г2С, СО <sub>2</sub>	164	432	114	432
		182	433	89	429
		132	431	41	430
Полуавтоматическая в СО <sub>2</sub>	Св-08Г2С, СО <sub>2</sub>	189	244	99	143
		172	302	107	119
Ручная дуговая	Электроды УОНИ 13/55	118	107	55	208
		141	299	50	302
		158	431	29	302
	Электроды FOX EV 50	-	355	-	324
		-	369	-	373
		-	362	-	352

Сравнительные характеристики химического состава и механических свойств различных марок сталей, применяемых для ответственных металлоконструкций, приведены в таблицах 6, 7, 7а.

Одним из важнейших технологических свойств стали для кожуха доменной печи является свариваемость. Исследования, проведенные в ИЭС им Е.О. Патона, показали, что прокат из стали 06Г2Б обладает хорошей свариваемостью. Результаты испытаний сварных соединений на растяжение и ударную вязкость [7] представлены в таблицах 8 и 9.

**Выводы.** Экономлегированная сталь повышенной прочности 06Г2Б по ТУ У 27.1-26416904-150:2005 выгодно отличается от сталей, обычно применяемых в отечественном домностроении. В ней сочетаются высокая прочность и ударная вязкость за счет ограничения содержания углерода, серы, фосфора, микролегирования ниобием, ванадием и молибденом в оптимальном соотношении, модифицирующей обработки кальций-

содержащими реагентами, а также максимального измельчения структуры при термоулучшении или термической обработке.

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

Учитывая изложенное, экономлегированная сталь марки 06Г2Б по ТУ У 27.1-26416904-150:2005 утверждена для изготовления кожуха реконструируемой ДП № 3 ЧАО «Азовсталь» и может быть рекомендована для применения в подобных конструкциях.

[1] Кандаков Г.П., Горицкий В.М., Шнейдеров Г.Р., Мартычук В.Д. Повышение надежности и ресурса кожухов доменных печей на основе оценки и прогнозирования состояния металла // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 4. – С. 6–9.

[2] Востров В.К. Трещиностойкость и долговечность кожухов доменных печей и воздухонагревателей // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 11. – С. 40–43.

[3] Байшев Ю.П. Доменные печи и воздухонагреватели (конструкции, эксплуатационные воздействия, свойства материалов, расчеты): Научное издание / Уральское отделение РАН. – Екатеринбург, 1996. – 993 с.

[4] Любин А.Е. Металлические конструкции сооружений комплекса доменной печи. Проектирование, эксплуатация, диагностика технического состояния – К.: вид-во «Сталь», 2010. – 471 с.

[5] Миллер В.Я., Корчагин В.А., Толоконников В.Г. Стальные конструкции комплекса доменной печи и газоочистки. – М.: Стройиздат, 1965. – 275 с.

[6] Мельников Н.П., Зелятров В.Н. Выбор стали для строительных конструкций – М.: Стройиздат, 1967. – 135 с.

[7] Ковтуненко В.А., Герасименко А.М., Гоцуляк А.А. Выбор стали для ответственных сварных строительных конструкций // Автоматическая сварка. – 2006. – № 11. – С. 32–37.

Надійшла 10.05.2017 р.