



## Повышение эффективности производства коррозионностойких сталей за счет снижения удельного расхода легирующих элементов и улучшения качества

*Разработана технология выплавки, внепечной обработки и экономного легирования коррозионно-стойких сталей выплаваемых по схеме: открытая дуговая печь, агрегат газокислородного рафинирования, установка ковш-печь. Показана принципиальная возможность работы на нижних граничных значениях содержания легирующих элементов Ni, Cr и обеспечения технических требований, предъявляемых к металлопродукции. Установлены факторы, разработана технология понижения содержания азота в титансодержащих коррозионностойких сталях, снижена отбраковка по всем видам дефектов. Ил. 10. Табл. 2. Библиогр.: 5 назв.*

**Ключевые слова:** открытая дуговая печь, агрегат газокислородного рафинирования, установка ковш-печь, коррозионностойкая сталь, легирование, механические свойства, пластичность

*The technology of melting, secondary treatment and economical cost of corrosion-resistant steel alloying is developed, melting is conducted by the scheme: an open-arc furnace, oxygen refining unit, ladle furnace. The principal possibility of the lower boundary values of the content of alloying elements Ni, Cr is showed and providing technical requirements for steel products. The factors are specified, the technology of reducing the nitrogen content in the titanium-containing corrosion-resistant steels is developed, and rejection by all kinds of defects is reduced.*

**Keywords:** Open arc furnace, gas-oxygen refining unit, ladle furnace, corrosion-resistant steel, alloying, mechanical properties, ductility

Одним из важнейших направлений снижения себестоимости выплавки высоколегированных сталей является снижение удельного расхода дорогостоящих ферросплавов и легирующих элементов Ni, Cr, Mo, Mn, Si и других. Значительная доля при формировании финансового бюджета ПАО «Днепро-спецсталь» от реализации готовой продукции как по объемам выплавки, производства проката и поковок, так и в стоимостном выражении, принадлежит сортаменту высоколегированных коррозионностойких сталей аустенитного класса с содержанием С до 0,03 и 0,12 %.

До 2003 г. на заводе «Днепро-спецсталь» технологической схемой производства сталей марок типа 03X18H10, 03X17H13M2 (т.е. марок с содержанием С до 0,03 %) являлась выплавка полупродукта в открытой дуговой печи (ОДП) с последующей обработкой расплава в агрегате газокислородного рафинирования (ГКР). Выплавка стали марок типа 08X18H10T, 12X18H10T осуществлялась либо напрямую в открытой дуговой печи, либо по схеме ОДП+ГКР. Эффективность и преимущества выплавки с применением агрегата ГКР хорошо известны [1-3]:

- производство низкоуглеродистых (с С до 0,03 %) коррозионностойких марок сталей, которые широко используются в мире;
- возможности для более широкого использования менее дорогого высокоуглеродистого феррохрома (ФХ 800, ФХ 900) для легирования стали;

- глубокое рафинирование расплава и, соответственно, более высокая чистота стали от загрязненности неметаллическими включениями.

Во второй половине 2003 г. в электростале-плавильном цехе № 2 (СПЦ-2), специализирующемся на выплавке коррозионностойких сталей, пущен в эксплуатацию агрегат внепечного рафинирования стали установка ковш-печь (УКП).

Основные преимущества работы с этим оборудованием, такие как возможность работать на нижних допустимых значениях содержания легирующих элементов, исключение брака по химическому составу стали, сокращение длительности плавки и улучшение технико-экономических показателей, были по достоинству оценены заводскими специалистами после внедрения в 1997 г. УКП в электростале-плавильном цехе № 3.

Основными нормативными документами, по которым осуществляется поставка на рынок СНГ сортового проката и трубной заготовки из коррозионностойких марок сталей, в т.ч. стали марки 08X18H10T являются следующие:

- ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные»;
- ГОСТ 5949-75 «Сталь сортовая и калиброванная, коррозионностойкая, жаростойкая и жаропрочная»;
- Технические условия ФГУП ЦНИИчермет

им. Бардина ТУ 14-1-565-84 «Заготовка трубная из высоколегированных коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных сталей;

- ТУ 14-1-790-73 (переизданы в 2001 г.) «Заготовка трубная из коррозионностойких марок стали для электрополированных труб»;

- ТУ 14-1-3844-84 «Заготовка трубная из коррозионностойких марок стали»;

- ТУ 14-1-3845-84 «Заготовка трубная из коррозионностойкой стали марок 08X18H10T и 08X18H10T-Ш».

В этих нормативных документах оговорены область применения, химический состав сталей и технические требования, предъявляемые к металлопродукции:

- геометрические размеры и допускаемые отклонения проката и поковок;

- требования к качеству поверхности;

- допустимое содержание газов в стали;

- требования к показателям макроструктуры; механическим свойствам, в т.ч. при высоких температурах;

- сталь должна выдерживать испытания на горячее кручение;

- с контролем внутренних дефектов металла неразрушающими методами;

- оценка загрязненности стали неметаллическими включениями и величины зерна;

- проверка на отсутствие склонности к межкристаллитной коррозии;

- с нормированием альфа-фазы в аустенитных сталях и другие технические требования.

Исследования и определение фактических значений показателей качества металлопродукции производится по соответствующим методическим ГОСТ-м.

С целью определения технической возможности работы на нижних допускаемых значениях содержания легирующих элементов, прежде всего дорогостоящего никеля, методами математического анализа и статистической обработкой данных были проанализированы массивы из более, чем 700 плавок сталей марок (08)12X18H10T, выплавленных по ранее действующей технологии без УКП.

В задачу этих исследований входило установление суженных пределов содержания основных химических элементов С, Ni, Cr, Si, Mn, Ti для этой группы марок стали, при которых гарантированно обеспечиваются все технические требования предъявляемые к стали и показатели свойств.

Особое внимание при анализе и статистической обработке данных уделялось наиболее проблемным показателям:

- расчетное и фактическое содержание альфа-фазы, повышенное содержание которой оказывает негативное влияние на технологическую пластичность как при испытаниях, так и при деформационном переделе;

**Таблица 1. Химический состав стали марок 08X18H10T и 12X18H10T**

Марка стали	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P
	не более						не более	
08X18H10T	0,08	0,8	2,0	17,0-19,0	9,0-11,0	5xC-0,7	0,020	0,035
12X18H10T	0,12	0,8	2,0	17,0-19,0	9,0-11,0	5xC-0,8	0,020	0,035

- сталь должна выдерживать испытания на горячее кручение. Число скручиваний до разрушения должно быть не менее 20. Температура испытаний  $1175 \pm 10$  °С;

- механические свойства стали, в т.ч. при повышенных температурах (в частности предел текучести при 350 °С).

Химический состав стали марок 08(12)X18H10T представлен в табл. 1 (ГОСТ 5632-72).

Как видно из табл. 1 в соответствии с ГОСТ 5632-72, содержание никеля для этих сталей составляет 9,0-11,0 %. Ранее перечисленными техническими условиями (кроме ТУ4-1-565-84) установлено содержание никеля 10,0–11,0 %.

ТУ 14-1-565-84 устанавливают содержание никеля с допускаемым отклонением (-) 1 %. Таким образом при производстве металла по ГОСТ 5632-72, ГОСТ 5949-75 и ТУ 14 -1-565-84 массовая доля содержания никеля в стали 08(12)X18H10T может составлять 9,0–11,0 %, если другое не оговаривается потребителем.

Краткое описание технологического процесса производства коррозионностойких сталей представлено ниже.

В дуговой печи (ДСП) производится расплавление шихты, состоящей из металлоотходов и ферросплавов, усреднение металла по химическому составу и температуре посредством продувки ванны кислородом в течение 5-10 мин, раскисление металла и шлака алюмокремнистыми, кремнистыми раскислителями и коксом, скачивание шлака периода плавления и наведение рафинировочного шлака, науглероживание полупродукта до содержания углерода не менее 0,60 %. Расплав-полупродукт с помощью заливочного ковша передается для дальнейшей обработки в агрегат ГКР.

**Процесс ГКР на следующие три технологические периода**

Первый период окислительного рафинирования – присадка необходимого количества металлдобавок (процесс ГКР позволяет использовать для легирования максимальное количество высокоуглеродистого феррохрома), продувка расплава кислородом с целью доводки расплава по содержанию углерода и температуре до требуемых значений, порционная присадка извести для исключения перегрева металла и обеспечения требуемого шлакообразования.

Второй период окислительного рафинирования - ступенчатая продувка расплава аргонокислородной смесью с целью глубокого обезуглероживания

расплава.

Третий период восстановительного рафинирования - продувка аргоном и раскисление расплава кремнийсодержащими материалами с целью максимально полного восстановления хрома, доводка металла по химсоставу и температуре, конечное раскисление металла перед выпуском расплава из конвертера в ковш и непосредственно в ковше перед разливкой металла.

Внедрение в эксплуатацию установки ковш-печь в СПЦ-2 позволило проводить операции по доводке по химсоставу, температуре и конечное раскисление металла непосредственно в ковше.

Перенос операции по доводке металла по химсоставу в ковше на УКП в первую очередь позволяет исключить брак по химсоставу и обеспечить экономию легирующих материалов Cr, Ni, Mn и их содержание в готовом металле ниже средних пределов.

Второе - это качество коррозионностойких сталей, стабилизированных титаном и снижение отбраковки по «титанистой неоднородности», которая выявляется при металлографическом контроле макроструктуры, ультразвуковом контроле, и на поверхности проката (поковок). Металлографические исследования дефектных мест показали, что они состоят в основном из скоплений карбонитридных и оксидных включений, а анализ влияния содержания азота на уровень отбраковки стали подтвердил значимость этого фактора [4].

В [5] опубликованы результаты совместных исследований специалистов «Днепроспецстали», НМетАУ, Никопольского южнотрубного завода, ПНЦ «Трубоцеталь» и исследована возможность уменьшения содержания никеля в стали типа X18H10 при сохранении ее технологической пластичности. Показана принципиальная возможность работы по содержанию никеля в стали марок 08(12)X18H10Т в соответствии с ГОСТ 5632-72 менее 10,0 % или в интервале 9,4-10,0 %. При этом корректировкой технологии раскисления стали, соотношением основных легирующих элементов, достигнуты удовлетворительные результаты технологической пластичности при производстве трубной заготовки, при горячем прессовании труб, а также допустимого содержания альфа-фазы и числа скручиваний при испытаниях на горячее кручение.

Таким образом, была показана возможность получения удовлетворительной технологической пластичности при деформационном переделе и требуемых показателей свойств при исследовании и испытаниях опытных плавок с содержанием никеля от 9,4 % и выше, т.е. в соответствии с требованиями ГОСТ 5632-72 и ТУ 14-1 565-84.

Внедрение УКП с возможностью работы в более узком интервале значений химических элементов открыло дополнительные резервы выплавки стали за счет экономии Ni, Cr, Mn, Si, Ti.

С целью определения возможности работы на нижних граничных значениях по содержанию никеля, с помощью методов математического анализа и ста-

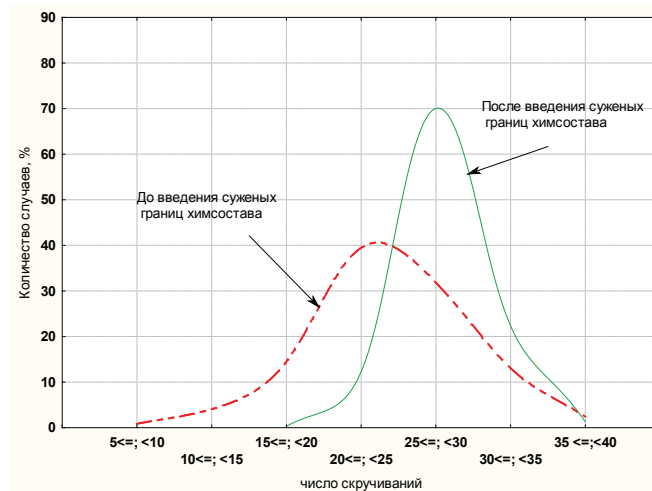
тистики были проанализированы массивы из более двухсот плавок, выплавленных по новой технологии по схеме ОДП-ГКР-УКП. Установлены корреляционные связи между параметрами, построены уравнения множественной регрессии (табл. 2), которые позволяют с достаточной долей вероятности прогнозировать показатели механических свойств. Исследовано влияние химического состава на расчетное содержание альфа-фазы и показатели механических свойств, в т.ч. при высоких температурах.

**Таблица 2. Уравнения зависимости механических свойств от химического состава сталей 08-12X18H10Т, поставляемых по ТУ 565 и 790**

Показатель	Уравнение	Коэффициент множественной регрессии
Предел прочности	$46,18 + 35,03C + 0,33Si + 1,94Mn + 0,63Cr - 0,4Ni - 6,3Ti + 8,1Al - 4,9N$	0,5
Относительное удлинение	$92,8 - 41,3C + 0,8Si - 3,1Mn + 0,01Cr - 2,4Ni - 2,3Ti - 2,1Al - 1,9N$	0,4
Горячее кручение	$72,0 + 12,3C + 3,4Si - 3,2Mn - 3,5Cr + 2,5Ni - 15,1Ti - 19,9Al - 36,4N$	0,5
Предел текучести при 350 °С	$- 19,3 + 8,0C + 8,3Si + 3,5Ni - 11,5Ti$	0,8

На основании выполненного анализа разработаны суженные пределы содержания легирующих элементов, при которых гарантированно обеспечиваются требования по содержанию альфа-фазы, показателям механических свойств, в т.ч. при высоких температурах (прежде всего предел текучести при 350 °С), необходимое число скручиваний при испытаниях на горячее кручение при производстве трубной заготовки из коррозионностойких сталей по техническим условиям ТУ 14-1-790, ТУ 14-1-565 и другим нормативным документам.

Разработаны суженные пределы содержания элементов Ni, Cr, C, Si, Mn, Ti, при этом содержание Ni



**Рис. 1. Гистограмма распределения результатов испытаний на горячее кручение в стали 08-12X18H10Т до и после введения суженных границ химсостава**



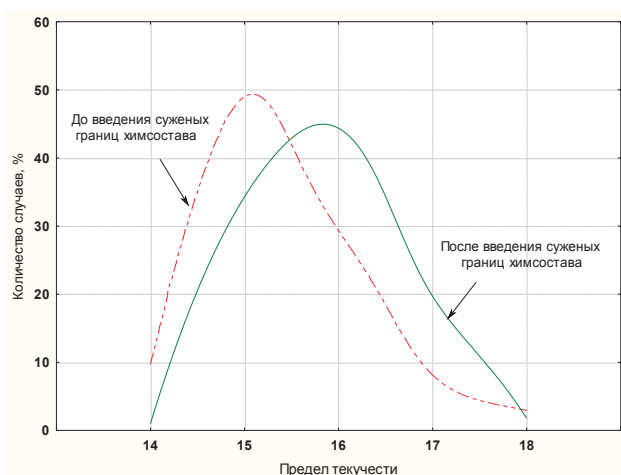


Рис. 2. Распределение результатов испытаний предела текучести при 350 °С на стали 08-12X18H10T до и после введения суженных границ химсостава

установлено 9,00-9,30 % для заказов по ГОСТ 5632-72, ГОСТ 5949-75, ТУ 14-1-565-84 и содержание Ni 10,00-10,20 % для заказов по ТУ 14-1-790-73, ТУ 14-1-3844-84 и ТУ 14-1-3845-84.

Статистическая обработка данных на массиве значительного объема плавок коррозионностойких марок стали 08-12X18H10T, выплавленных после внедрения оптимальной технологии соотношения элементов химического состава показывает, что проблемные показатели качества, такие как горячее кручение и предел текучести при 350 °С удовлетворяют требованиям технических условий (рис. 1, 2). Кроме того, принятые технологические решения позволили существенно снизить себестоимость коррозионностойких сталей.

Анализом показателей качества, первичной отбраковки по дефектам, выявленным при ультразвуковом контроле и поверхности титансодержащих коррозионностойких сталей, была установлена зависимость увеличения отбраковки от содержания азота в стали [4]. В результате выполненных работ установили основные факторы и разработали элементы технологии внепечной обработки с целью снижения содержания азота в стали и улучшения качества.

На рис. 3 показана зависимость концентрации азота от температуры разлива и содержания тита-

Зависимость концентрации азота от температуры расплава и содержания титана в металле

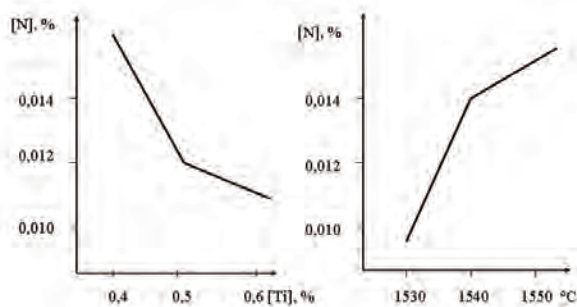


Рис. 3. Зависимость концентрации азота от температуры расплава и содержания титана в металле

на в металле. Оптимизация технологии выплавки по схемам ОДП+УКП, ОДП+ГКР+УКП позволила значительно (до 30 %) снизить содержание азота в стали, существенно сократить первичную отбраковку коррозионностойких сталей, стабилизированных титаном, по дефектам сталеплавильного производства, так называемой титанистой неоднородности, отбраковку при ультразвуковом контроле, улучшить качество поверхности проката (рис. 4).



Рис. 4. Динамика отбраковки титанистых коррозионностойких сталей в прокатном цехе по дефектам сталеплавильного производства

Как уже говорилось, эффективным способом повышения конкурентоспособности коррозионностойких сталей аустенитного класса является снижение содержания никеля, а также хрома, марганца, в пределах марочного состава с целью снижения себестоимости и, соответственно, цены металлопродукции. Однако уменьшение содержания аустенитообразующих элементов - никеля и марганца в стали приводит к увеличению расчетного и фактического количества  $\alpha$ -фазы в структуре металла и, следовательно, к уменьшению пластичности стали, к возникновению рванин при прокатке слитков на заготовку. С целью устранения негативного влияния ферритной фазы при деформационных переделах слитков на трубную заготовку, а также при горячем прессовании или при поперечно - винтовой прокатке заготовок на трубы у потребителей металла, были введены суженные границы содержания химических элементов как на аустенитообразующие (C, Ni, Mn), так и ферритообразующие элементы (Cr, Si). Кроме того, отрицательное влияние изменения химического состава компенсировали корректировкой режимов нагрева слитков перед прокаткой на стане 1050/950 и заготовок перед прокаткой на стане 550. Для снижения количества фактического содержания ферритной фазы по отношению к расчетным ее значениям для различных групп марок сталей (в зависимости от содержания углерода, молибдена и пр.) внедрены соответствующие режимы гомогенизирующего нагрева слитков и заготовок.

Корректировка режимов нагрева слитков позволила значительно (более чем в 10 раз) снизить количество слитков коррозионностойких сталей с особо низкой технологической пластичностью, «выбрасываемых» на промежуточную зачистку в виде недокатов.

Среднегодовые закупочные цены и их колебания (в т.ч. за счет изменения курса валют) на никель, феррохром, ферромарганец и ферросилиций с 2004 по 2012 гг., а также Изменение плановой себестоимости

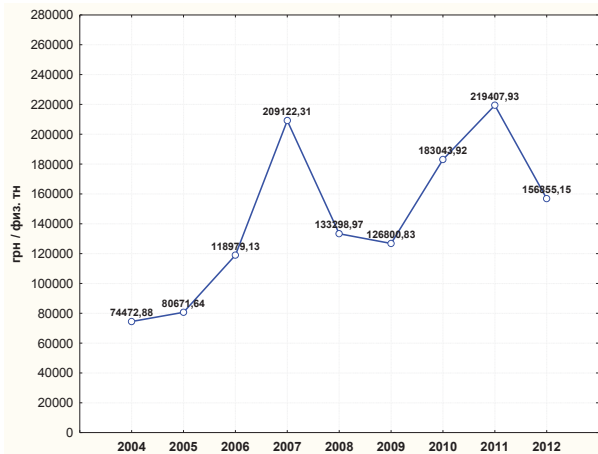


Рис. 5. Изменение закупочных цен на никель (Н1-Н2)

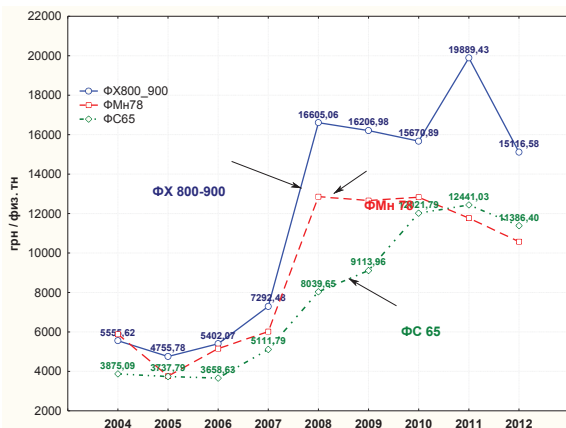


Рис. 6. Изменение цен на хром (FX800-900), марганец (FMn78), ферросилиций (FC65)

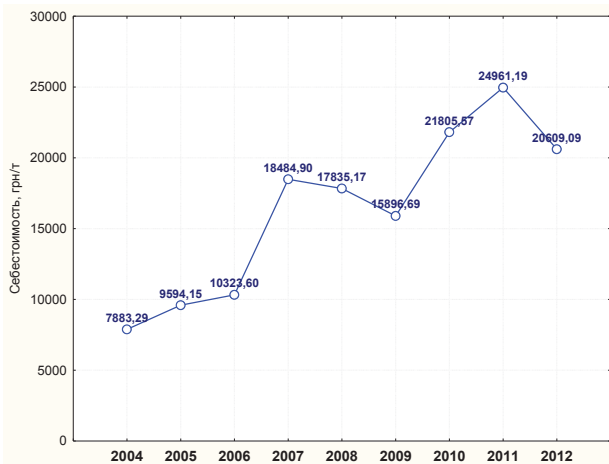


Рис. 7. Изменение плановой себестоимости стали марки 08X18N10T

стали марки 08X18N10T представлены на рис. 5-7.

На графиках (рис. 8-10) показано снижение содержания Ni, Cr, Mn в стали 08X18N10T, поставляемой по нормативным документам с допуском с содержанием Ni 9,0-11,0 % с момента внедрения УКП и новой технологии выплавки. Некоторое повышение средних значений содержания Ni свыше 9,3 % объясняется наличием определенного количества заказов по ТУ-14-1-565-84 и ГОСТ 5632-72 с требованием заказчика не менее 10,0 % содержания Ni и превы-

шением, по сравнению с расчетным, его содержания, полученным по расплавлению отходов. За счет внедрения новой технологии выплавки достигнута

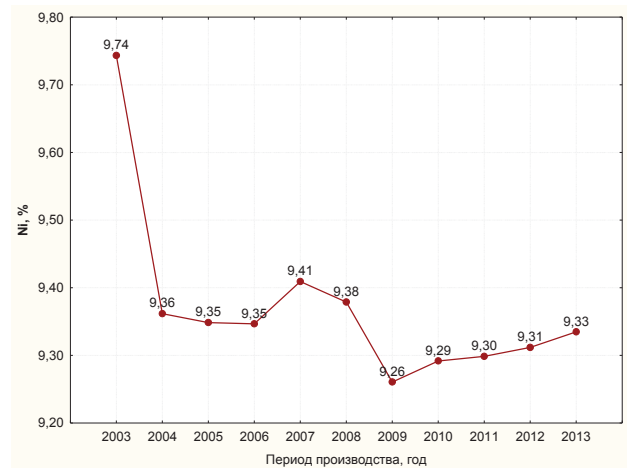


Рис. 8. Среднее содержание Ni в стали 08X18N10T (ГОСТ 5632, 5949, ТУ 565) по периодам производства

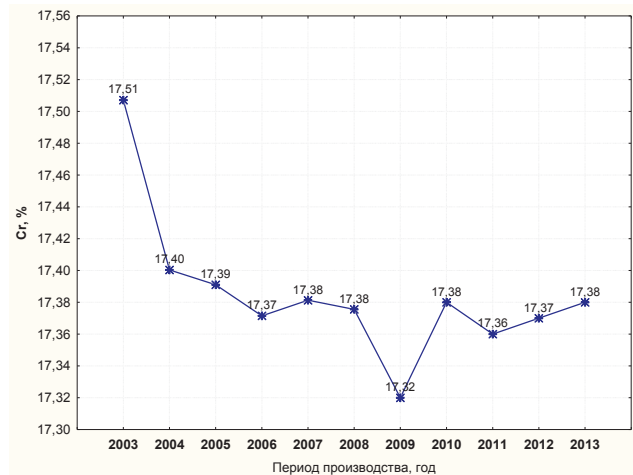


Рис. 9. Среднее содержание Cr в стали 08X18N10T (ГОСТ 5632, 5949, ТУ 565) по периодам производства

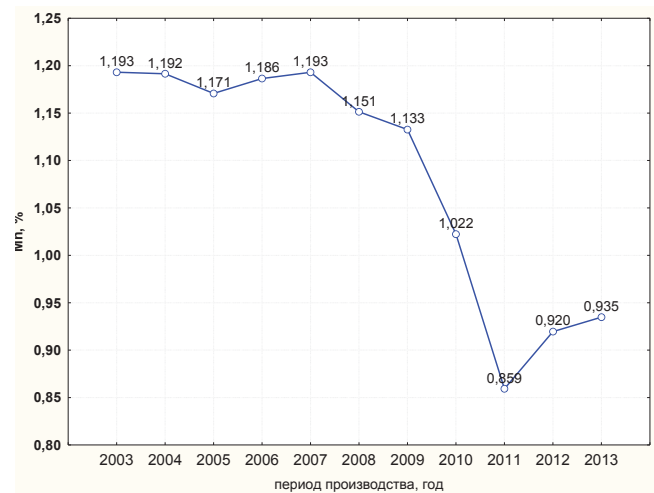


Рис. 10. Среднее содержание Mn в стали 08X18N10T (ГОСТ 5632, 5949, ТУ 565) по периодам производства

значительная экономия никеля и ферросплавов. Ежегодный экономический эффект в годы стабильной загрузки производства только за счет экономии Ni составляет от 8 млн. грн.

**Выводы**

1. В связи с внедрением агрегата ковш-печь показана принципиальная возможность работы на нижних допустимых значениях по содержанию Ni, Cr при выплавке коррозионностойких сталей. Разработаны суженные пределы содержания основных легирующих элементов.

2. Установлены основные факторы, влияющие на повышенную отбраковку по дефектам УЗК и поверхности титансодержащих коррозионностойких марок стали. Разработана технология выплавки, внепечного рафинирования и раскисления коррозионностойких сталей легированных титаном с пониженным содержанием азота. Значительно снижена отбраковка проката по всем видам дефектов.

3. За счет снижения содержания никеля при выплавке стали марок 08-12X18H10T по заказам ТУ 14-1-565-84 суммарный экономический эффект за последние годы составляет около 60 млн. грн.

**Библиографический список**

1. Садовник Ю.В., Нефедов Ю.А. Рабинович А.В. и др. Повышение качества высоколегированных сталей методом газокислородного рафинирования // Черная металлургия. - 1997. – Вып. - 5-6. - С. 23-24.

2. Нефедов Ю.А., Рабинович А.В., Садовник Ю.В. Разработка и промышленное освоение технологии выплавки коррозионностойких сталей методом газокислородного рафинирования // Современные проблемы металлургии. Науч. тр. ГМетАУ. - Вып. 1. - Днепропетровск, 1999. - С. 112-132.

3. Шульга В.О., Сальников А.С., Логозинский И.Н. Оптимизация периода газокислородного рафинирования коррозионностойких сталей // Сталь. - 2004. - № 11. - С. 19-20.

4. Шульга В.О., Король Л.Н., Сальников А.С. и др. Опыт освоения производства легированной высококачественной стали с обработкой на установке ковш-печь // Сталь. - 2004. - № 2. - С. 22-23.

5. Рабинович А.В., Садовник Ю.В., Венец Ю.С. и др. Исследование возможности уменьшения содержания никеля в стали типа X18H10 при сохранении ее технологической пластичности // Сталь. - 2002. - № 6. - С. 75-77.

Поступила 19.04.2013



УДК 669.14.018.294.001.57:669.046.554

Есаулов Г.А. /к.т.н./, Климчик Ю.В.  
ООО «МЗ «Днепросталь»

Наука

Жаданос А.В. /к.т.н./, Гасик М.И. /д.т.н./,  
Кукушкин О.Н. /д.т.н./  
НМетАУ

**Математическое моделирование теплотехнологических процессов в агрегате ковш-печь в условиях ООО «МЗ «Днепросталь»**

*Применительно к условиям ООО «МЗ «Днепросталь» разработана динамическая модель, позволяющая прогнозировать температуру расплава по ходу его обработки на установке ковш-печь с точностью ± 5°. Полученные аналитические выражения изменения температуры расплава во время обработки на установке ковш-печь позволяют интегрировать разработанную модель в существующие АСУ внепечной обработкой стали. Выполнена оценка статей энергетического баланса УКП, что позволяет определить технологические режимы, которые обеспечивают максимальный энергетический КПД. Ил. 3. Табл. 1. Библиоцр.: 10 назв.*

**Ключевые слова:** внепечная обработка стали, установка ковш-печь, теплотехнологические процессы, температура жидкой стали, энергетический баланс, автоматизированная система управления

*With regard to the conditions of LTD «Dneprostal» the dynamic model has been developed. This model allows to the temperature prediction of liquid steel during ladle-furnace treatment processes with an accuracy of ± 5°. That makes a possibility of further application in automated control system of ladled steel treatment. Completed estimation of energy balance items makes it possible to define technological regimes leading to the best power efficiency.*

**Keywords:** ladled steel treatment, ladle-furnace aggregate (LF), heat-energy processes, temperature of liquid steel, power balance, automated control system

**Постановка задачи**

Внепечная обработка стали на электродуговой установке ковш-печь (УКП) и вакуумной установке

- одно из инновационных направлений в современной металлургии. На украинских металлургических предприятиях на текущий момент функционирует 16