

ЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ АЗОТОМ ИЗ ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА (Обзор. Часть 2)

И. В. Шейко, Г. М. Григоренко, В. А. Шаповалов

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03680, Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены особенности легирования металлических материалов азотом, в том числе и из газовой фазы при плазменно-дуговом переплаве. В отличие от других легирующих элементов азот в стандартных условиях находится в газообразном состоянии. Поэтому использование его как легирующего элемента имеет свои особенности. Показано, что скорость абсорбции азота при ПДП чрезвычайно высока и это позволяет получать слитки, в которых содержание азота превышает стандартную растворимость газа в жидкой стали при температуре ликвидуса. Влияние азота как легирующего элемента сравнимо с влиянием углерода. На ряде примеров показано, что используя метод плазменно-дугового переплава представляется возможным в промышленных масштабах легировать стали азотом до концентраций, значительно превышающих его стандартную растворимость в металле. Выплавленные в плазменно-дуговых печах слитки отличаются высоким качеством поверхности и имеют плотную макроструктуру несмотря на высокое содержание азота. Растворенный в металле азот достаточно равномерно распределен в объеме слитков. Библиогр. 5, табл. 5, ил. 4.

Ключевые слова: дуговая плазма; легирование; растворимость газа; пороговая концентрация; азотсодержащие ферросплавы; плазменно-дуговой переплав; макроструктура; аустенитная структура; нержавеющие стали; инструментальные стали

Разработанные и освоенные в промышленных условиях технологии выплавки высокоазотистых сталей в плазменно-дуговых печах показали свою высокую эффективность.

Выплавка большого сортамента сталей, легированных азотом, была освоена на заводе «Электросталь» в плазменно-дуговой печи У-400 (рис. 1), созданной совместно со специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (табл. 1) [1].

Используя способ плазменно-дугового переплава (ПДП) представляется возможным в промышленных масштабах легировать стали азотом до концентраций, значительно превышающих его стандартную растворимость в металле.

При этом выплавленные слитки, несмотря на очень высокое содержание азота, имеют высокую плотность и полностью лишены подкорковой пористости и усадочной рыхлости [2, 3].

Технология производства высокоазотистых сталей базируется на том, что при выплавке металла для расходуемых заготовок в электродуговых печах используются дешевые не азотированные ферросплавы. Легирование сталей осуществляется из газовой фазы в процессе переплава расходуемых заготовок в плазменно-дуговой печи, для чего применяются аргоно-азотные смеси в качестве плазмообразующего газа. Это позволяет получать

достаточно чистые от примесей высокоазотистые стали не прибегая к применению дорогостоящих азотсодержащих ферросплавов.

Выплавленные слитки отличаются высоким качеством поверхности и имеют плотную макроструктуру (рис. 2). Подкорковые дефекты и усадочные рыхлоты в слитках отсутствуют. Раство-



Рис. 1. Плазменно-дуговая печь У-400

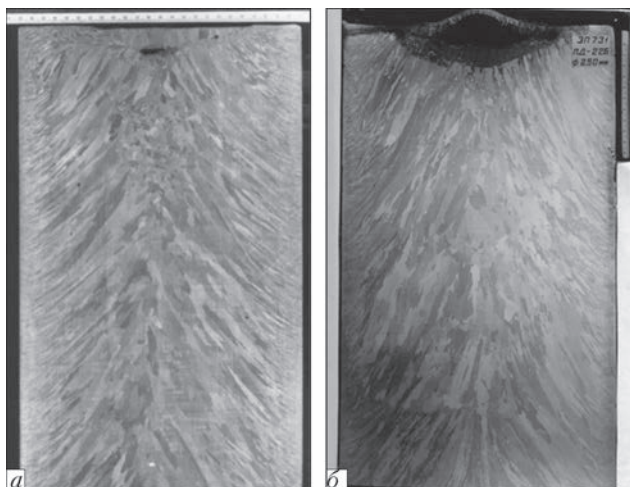


Рис. 2. Макроструктура слитков диаметром 250 мм, выплавленных в азотсодержащей атмосфере в печи ПДП: *a* — сталь ЭИ-835 (X25H16Г7АР), [N] = 0,56 %; *б* — сталь ЭП-731 (000X19H7Г7АМ2, верх слитка), [N] = 0,60 %

ренный в металле азот достаточно равномерно распределен в объеме слитков (рис. 3).

Для сталей, содержащих сверхравновесное количество азота, возможна деазотация металла при термообработке. Проверка этого предположения показала, что при нагреве стали до 1100 °С в течении 100 ч деазотация металла происходит в тонком поверхностном слое толщиной не более 0,3 мм (рис. 4) [2]. Такой же нагрев в вакууме вызывает деазотацию слоя толщиной около 1 мм.

Убедительные результаты по азотированию различных сталей из атмосферы низкотемпературной плазмы получены на промышленной плаз-

Таблица 1. Содержание азота в слитках, выплавленных в плазменно-дуговой печи У-400

Марка стали	Содержание азота, мас. %		Стандартная растворимость 1873 К), %·кПа ^{1/2}
	в расходуемой заготовке	в слитке	
X25H16Г7АР	0,12	0,69	0,34
X20H10ЛГ6	—	0,50	0,26
X16H25АМ6	0,08	0,30	0,13
X16H25М6АФ	0,08	0,30	0,14
X17H4Г14АФ	—	0,52	0,43
X18АН9	—	0,40	0,19
X21Г7АН5	0,17	0,46	0,33
X25H12АР	0,42	0,58	0,29
X15H5АМ2	0,09	0,21	0,18
X15АГ15	—	0,44	0,32
X19АН16	—	0,18	0,17
X20Г10Н7АМ2	—	0,99	0,35
X18H20M3Д2АБ	—	0,34	0,18
X18АН10	—	0,41	0,19
X23H12АГ8	—	0,46	0,34

менно-дуговой печи У-600 при выплавке слитков массой до четырех тонн (Ижевский металлургический завод, Россия) (табл. 2). Для переплава этих сталей использовали отдельную подачу газов: аргон — через плазмотроны, азот — в камеру печи минуя плазмотроны. Такую подачу газов выполняли с целью снижения тепловой нагрузки на сопла и электроды плазмотронов.

Аналогичные закономерности легирования получены в ИЭС им. Е. О. Патона при выплавке хромоникелевой стали X20H5Г2Л в плазмен-

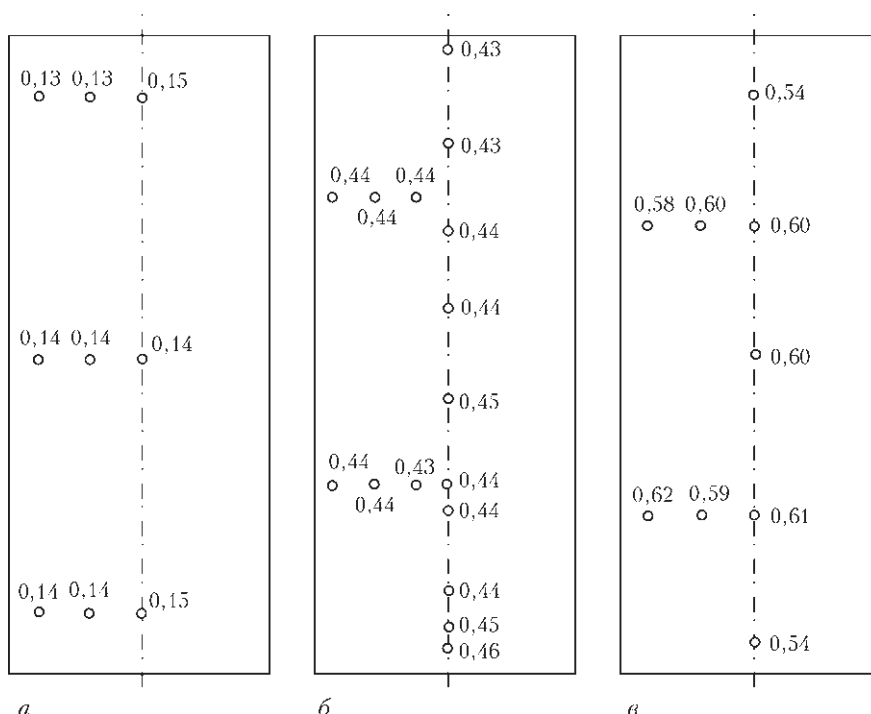


Рис. 3. Распределение азота в слитках ПДП: *a* — сталь P6M5; *б* — сталь X25H16Г7АР со стандартным (равновесным) содержанием азота; *в* — то же с повышенным (сверхравновесным) содержанием азота

но-дуговой гарниссажной печи с использованием азотсодержащей плазмы (табл. 3) [3].

По данным работы [2] в стали ЭИ-835 (X25H16Г7АР), переплавленной в плазменно-дуговой печи со стандартным содержанием азота, количество неметаллических включений находится на уровне металла ЭШП (табл. 4). Общее содержание неметаллических включений в стали в результате переплава снижается с пяти баллов до трех. Оставшиеся неметаллические включения располагаются равномерно.

Сталь ЭП-618 (X25H12АР) применяется для изготовления конструкций ответственного назначения. Согласно технических условий содержание азота в ней должно быть 0,30...0,45 % [4]. При переплаве этой стали в плазменно-дуговой печи содержание азота может быть доведено до 0,58 % [2]. Несмотря на сверхравновесное содержание азота макроструктура слитков и проката плотная и однородная. Прочность этой стали с повышенной концентрацией азота при 1000 °С выше, чем с обычным содержанием азота.

Весьма перспективным представляется легирование азотом быстрорежущей инструментальной стали, например Р6М5, производство которой составляет около 70 % от общего выпуска таких сталей [5]. Азот в быстрорежущих сталях повышает краснеломкость, стойкость к истиранию, а следовательно и ресурс работы. В этой связи представляет интерес применение ПДП с легированием азотом для производства быстрорежущих сталей. Такие работы проводили электрометаллургический завод «Электросталь» совместно с Сестрорецким инструментальным заводом. Были выплавлены опытные партии инструментальных сталей, из которых затем изготовлены пальчиковые фрезы диаметром 20 и сверла — 21 мм. Химический состав этих сталей приведен в табл. 5.

Работоспособность фрез испытывали в соответствии с методикой, разработанной ВНИИИнструмент при фрезеровании уступов из стали 45 твердостью 187 НВ.

Результаты этих испытаний следующие: средняя стойкость фрез диаметром 20 мм из стали Р6АМ5 составила 68,7...73,04 мин при коэффици-

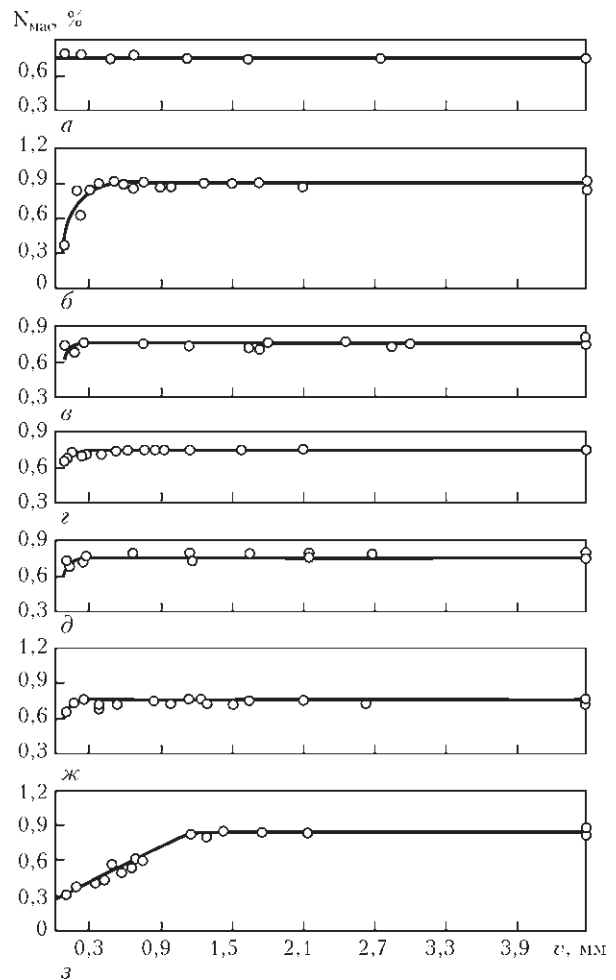


Рис. 4. Содержание азота по сечению образцов стали ЭИ835 после отжига в различных газовых средах ($T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$): а — воздух, 8 ч; б — воздух, 100 ч; в — аргон, 1 ч; г — аргон, 8 ч; д — водород, 1 ч; е — водород, 8 ч; жс — вакуум, $3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., 4 ч

енте вариации 0,12...0,2. Нормативная стойкость инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 для таких условий обработки составляет 60 мин. Средняя стойкость фрез, легированных азотом, превысила нормативную в 1,15...1,22 раза.

Стойкость сверл зависит от многих факторов, в том числе и от твердости. Исходя из многолетнего опыта Сестрорецкого инструментального завода установлено, что оптимальное сочетание свойств исследуемых сталей достигается при твердости 64...66 HRC. Сверлили глухие отверстия глубиной 63 мм в образцах стали 45. Стойкость сверл оценивали по количеству выполненных отверстий

Таблица 2. Содержание азота в слитках диаметром 500 мм, выплавленных в печи У-600 в азотсодержащей атмосфере				
Марка стали	Давление в печи, кПа	Содержание азота, мас. %		
		в атмосфере печи	в слитках	
55X20Г9АН4	150	74	0,47	
	120	64	0,43	
08X21 Г11АН6	100	68	0,56	
X18Н7Г10АМ3	160	80	0,58	

Таблица 3. Содержание азота в стали X20H5Г2Л, выплавленной в плазменно-дуговой гарниссажной печи

Объект исследования	Режим плавки		Содержание азота в металле, мас. %	
	Суммарный ток плазматронов, А	Давление в плавильной камере, кПа		
Исходный металл	—	—	0,03	
После ПДП	1800	—	0,46	
	1800	150	0,53	
	1800	200	0,56	
Исходный металл	—	300	0,02	
	После ПДП	1600	—	0,42
		1600	50	0,46
Исходный металл	—	200	0,53	
	После ПДП	1600	300	0,04
		1400	—	0,41
После ПДП	1400	150	0,44	
	1400	300	0,48	

Таблица 4. Неметаллические включения в стали ЭИ-835 ПДП

Способ переплава	Металлические включения по шкале ГОСТ 1778–62, балл					
	Хроматы	Сульфиды	Нитриды титана	Силикаты		Глобули
				хрупкие	пластичные	
ПДП	2,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
—»—	2,0	—	0,5	0,5	0,5	—
—»—	0,5	—	2,0	0,5	0,5	—
ЭШП	1,7	0,6	1,0	0,5	0,5	0,5

Таблица 5. Химический состав инструментальных сталей

Марка стали	Метод плавки	Содержание элементов, мас. %							
		C	Mn	Si	W	Cr	V	Mo	[N]
P2M5	ПДП	1,02	0,29	0,17	1,82	4,01	1,17	5,08	0,03
—»—	—»—	0,96	0,29	0,17	1,82	4,01	1,17	5,08	0,11
—»—	—»—	0,86	0,30	0,35	6,50	4,30	1,76	5,05	0,17
—»—	ДП	0,85	0,32	0,36	6,40	4,20	1,75	5,00	0,04

и величине износа режущих кромок. Критерием снятия сверл с испытаний служили скрип или его поломка. Анализ результатов испытаний показал, что стойкость сверл из стали P2M5 ПДП находится на уровне стойкости сверл из стали P6AM5 открытой выплавки (ОВ) и выше стойкости сверл из стали P2M5 ОВ. Сочетание благоприятной литой структуры и последующих обработок стали (ковка и термическая обработка) обеспечивают высокий уровень механических характеристик и служебных свойств стали P2M5 не уступающих по величине характеристикам стали P6M5 ОВ.

Таким образом, даже не изменяя состав стали, производя известные марки, содержание азота в которых поддерживается на верхнем пределе технических условий, что очень редко удается сделать при выплавке в традиционных печах из-за опасности получения пористых слитков, можно

производить сталь с комплексом положительных свойств: более прочную с хорошей коррозионной стойкостью и более дешевую.

1. Клюев М. М. Плазменно-дуговой переплав / М. М. Клюев. — М.: Metallurgy, 1980. — 256 с.
2. Лакомский В. И. Исследование процессов взаимодействия азота с металлом при ПДП / В. И. Лакомский, Г. М. Григоренко, Г. Ф. Торхов // Сб. ст. «Рафинирующие переплавы». — Киев: Наук. думка, 1975. — Вып. 2. — С. 151–159.
3. Аустенитные высокоазотистые хромоникелевые стали, выплавленные в плазменно-дуговых печах / Б. Е. Патон, В. И. Лакомский, Г. Ф. Торхов [и др.] // ДАН СССР. — 1971. — 198, № 2. — С. 391–393.
4. Свойства хромистых сталей с высоким содержанием азота / И. Н. Мелькумов, М. М. Клюев, В. В. Топилин [и др.] // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. — 1970. — № 12. — С. 18–21.
5. Григоренко Г. М. Водород и азот в металлах при плазменной плавке / Г. М. Григоренко, Ю. М. Помарин. — Киев: Наук. думка, 1989. — 200 с.

Peculiar features of alloying the metallic materials with nitrogen are considered, including that from a gas phase in plasma-arc remelting. Unlike the other alloying elements the nitrogen under the standard conditions is in a gaseous state. Therefore, its use as an alloying element has its peculiarities. It is shown that the rate of nitrogen absorption in

PAR is rather high and this allows producing ingots, in which the nitrogen content exceeds the standard solubility of gas in molten steel at the liquidus temperature. The effect of nitrogen as an alloying element is comparable with the effect of carbon. It is shown on some examples, that when the method of plasma-arc remelting is used it seems possible to alloy steel with nitrogen in industrial scales up to concentrations, much exceeding its standard solubility in metal. Ingots, melted in plasma-arc furnaces, are characterized by the high quality of surface and have a dense macrostructure in spite of the nitrogen content. Nitrogen, dissolved in metal, is distributed in the ingot volume rather uniformly. Ref. 5, Tables 5, Figures 4.

Key words: arc plasma; alloying; gas solubility; threshold concentration; nitrogen-containing ferroalloys; plasma-arc remelting; macrostructure; austenitic structure; stainless steels; tool steels

Поступила 02.03.2016

ИНВЕСТИЦИИ МЕТИНВЕСТ В ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ МАРИУПОЛЯ



Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича (ММК, Донецкая обл.) и Азовсталь, входящие в группу Метинвест, инвестировали в охрану окружающей среды города с 2011 по 2015 г. 1,6 млрд. грн. Согласно сообщению пресс-службы компании, за этот период реализовано девять масштабных проектов по улучшению экологической ситуации в Мариуполе.

«За время действия программы загрязнение окружающей среды предприятиями Метинвеста значительно уменьшилось. Инвестиции в модернизацию производства позволили мариупольским комбинатам за этот период сократить выбросы в воздух почти на четверть. В частности, в 2015 г. ММК им. Ильича отказался от грязного неэффективного мартеновского производства. После вывода из эксплуатации шести мартеновских печей выбросы соединений азота в атмосферу сократились почти на 68 %, пыли — на 12 %», — отметили в компании.

Реконструкция аглофабрики ММК им. Ильича общей стоимостью 220 млн. дол. стала крупнейшим экологическим проектом в Украине. Поэтапная реализация проекта позволит к 2020 г. сократить на 90 % выбросы пыли и на 46 % — соединений серы.

На Азовстали в 2015 г. завершена модернизация ДП-4. Обновленный чугуноплавильный агрегат будет выбрасывать из трубы менее 30 мг пыли на кубометр воздуха, что лучше европейских норм. Инвестиции в проект составили 90 млн. дол.

«Метинвест является одной из немногих украинских компаний, которая даже во время экономических и политических потрясений не прекращает развивать и модернизировать производство, ориентируясь на современные экологические стандарты. В Мариуполе мы, с одной стороны, вывели из эксплуатации устаревшие производственные мощности, с другой — реализуем инновационные «зеленые» проекты на действующих мощностях», — отметил ген. директор Метинвеста Юрий Рыженков.

<http://korrespondent.net/business/companies>