

تولید فولاد ضد زنگ آستنیتی پرنیتروژن توسط آلیاژی سازی با گاز نیتروژن و افزودن فروآلیاژهای نیتروژن دار¹

ترجمه: محمدحسین نشاطی
شرکت توسعه فولاد آلیاژی ایرانیان

چکیده: یک روش ساده و عملی برای تولید فولادهای ضد زنگ آستنیتی پرنیتروژن آلیاژی سازی با گاز نیتروژن و افزودن فروآلیاژهای نیتروژن دار در شرایط اتمسفر عادی است. آلیاژی سازی توسط دمش گاز نیتروژن در آلیاژهای سری های Fe-Cr-Mn-Mo در کوره مقاومت الکتریکی $MoSi_2$ و کوره القائی ذوب در هوا در شرایط اتمسفر عادی انجام شد. نتایج نشان داد که آلیاژی سازی با نیتروژن می تواند با افزایش سرعت جریان گاز نیتروژن، طولانی شدن مدت زمان ماندگاری حبابها، افزایش سطح تماس گاز/فولاد مذاب، و کاهش میزان گوگرد و اکسیژن در فولاد مذاب تسریع شود. علاوه بر این، فولادهای ضد زنگ آستنیتی پرنیتروژن بدون نیکل با ماکروساختار سالم و فشرده در آزمایشگاه با استفاده از کوره القائی ذوب در خلاء و کوره ذوب مجدد الکتریکی تحت سرباره (ESR) در شرایط اتمسفر نیتروژن با افزودن آلیاژ نیتروژن دار با حداکثر مقدار نیتروژن 0.81 درصد تولید شده است. تخلخل در شمش (اینکات)های حاصل از ذوب و ریخته گری در کوره القائی ذوب در خلاء با افزودن فروآلیاژهای نیتروژن دار و تحت اتمسفر نیتروژن مشاهده شد. پس از فرآیند ESR، شمش های ریخته گری شده همه کاملاً سالم و بدون تخلخل بودند. بهره دهی نیتروژن با کاهش سرعت ذوب کردن در فرآیند ESR افزایش یافت. به دلیل ذوب مجدد ESR در اتمسفر نیتروژن و افزودن ضمنی آلومینیوم به عنوان اکسیژن زدا به سرباره، تلفات منگنز به وضوح کاهش یافت. آخال های عمدتاً نامنظم Al_2O_3 و آخال های MnS در شمش های ESR وجود داشتند و اندازه اکثر آخال ها کمتر از $5 \mu m$ بود. پس از همگن سازی صفحه نورد گرم شده در $1150^\circ C$ و پس از کوانچ کردن آن در آب، ریزساختار از آستنیت همگن تشکیل شده بود.

فولادهای ضد زنگ پرنیتروژن خواص مکانیکی و همچنین مقاومت در برابر خوردگی عالی از خود نشان می دهند، از این رو تلاش های قابل توجهی برای توسعه فولادهای ضد زنگ پرنیتروژن طی دهه های گذشته انجام شده است [1-3]. فولادهای ضد زنگ پرنیتروژن را می توان در حالت مذاب [4] توسط کوره القائی، کوره قوس الکتریکی، دمش گاز در فولادهای مذاب، فرآیند کربن-زدائی با اکسیژن و آرگون (AOD)، فرآیند ESR تحت فشار (PESR)، ذوب قوس پلاسما، ذوب قوسی سرباره (arc-slag melting) و غیره تولید کرد. فرآیند PESR رایج ترین فرآیند تولید تجاری فولادهای ضد زنگ پرنیتروژن است. اما، تجهیزات مورد استفاده برای PESR پیچیده و گران هستند. ذوب دوباره یا سه باره برای ایجاد همگنی شمش انجام می شود. هنگامی که سیلیسیم نیتروژن دار برای بهبود توزیع نیتروژن در شمش استفاده می شود، ممکن است جذب سیلیسیم برای برخی از گریدهای فولاد

¹ - High Nitrogen Austenitic Stainless Steels Manufactured by Nitrogen Gas Alloying and Adding Nitrided Ferroalloys, JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH INTERNATIONAL, 2007, 14(3): 63-68

غیرقابل قبول باشد. تولید فولاد ضد زنگ پر نیتروژن توسط آلیاژی‌سازی با گاز نیتروژن و افزودن فروآلیاژهای نیتروژن‌دار در اتمسفر عادی روش ساده و امکان‌پذیری است.

در این تحقیق، آلیاژی‌سازی با گاز نیتروژن در آلیاژهای سری‌های Fe-Cr-Mn-Mo در شرایط اتمسفر عادی در کوره مقاومت الکتریکی MoSi_2 ، و کوره القائی ذوب در هوا انجام شد. فولادهای ضد زنگ آستنیتی پرنیتروژن بدون نیکل با استفاده از کوره القائی ذوب در خلاء با افزودن فروآلیاژ نیتروژن‌دار تحت اتمسفر نیتروژن و با استفاده از کوره ESR برای ذوب مجدد در اتمسفر نیتروژن تولید شدند. ریزساختار و آخال‌های شمش‌های حاصل از ESR و صفحه نورد گرم شده مورد آزمایش قرار گرفتند.

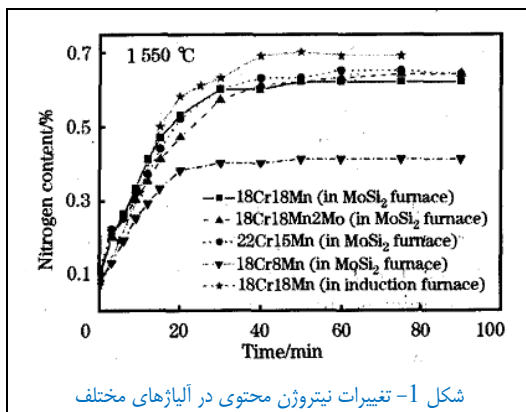
1- آلیاژی‌سازی با گاز نیتروژن

1.1 آزمایش

یک بوته از جنس منیزیا حاوی تقریباً 1 کیلوگرم آلیاژ در منطقه‌ای نگهداری شده در دمای ثابت در کوره مقاومت الکتریکی قرار داده شد و تحت اتمسفر آرگون با استفاده از برقراری جریان آرگون از کف کوره، حرارت داده شد. هنگامی که دما به 1550°C رسید، اولین نمونه از فولاد گرفته شد. سپس 2 گرم تراشه آلومینیوم به عنوان اکسیژن‌زدا به فولاد مذاب اضافه شد. پس از 5 دقیقه، سرباره تشکیل شده بر روی فولاد مذاب گرفته شد (خارج گردید). جریان آرگون از کف کوره به جریان نیتروژن تبدیل شد. پس از اینکه فشار جزئی نیتروژن به 1MPa رسید، لوله آلومینا برای دمش گاز به عمق فولاد مذاب فرو برده شد، و خروجی لوله در ارتفاع 10mm از کف بوته قرار گرفت. در طی کل آزمایش، سرعت جریان در 0.15 لیتر بر دقیقه کنترل شد، و فواصل زمانی 3، 6، 9، 12، 15، 20، 30، 40، 50، 60، 75 و 90 دقیقه برای نمونه‌برداری از کوره برای تعیین میزان نیتروژن با استفاده از دستگاه LECO TC-436 انتخاب شدند.

یک آزمایش اضافی توسط دمش نیتروژن از پوروس پلاگ (تویی متخلخل) واقع در کف یک کوره القائی ذوب در هوا انجام شد. سرعت جریان گاز 5 لیتر در دقیقه کنترل شد. قبل از دمش نیتروژن، آرگون از پوروس پلاگ دمیده شد. سرباره‌ای متشکل از 60 درصد CaO، 30 درصد Al_2O_3 ، 5 درصد MgO و 5 درصد CaF_2 به فولاد مذاب اضافه شد. در طی آزمایش، آلومینیوم به عنوان اکسیژن‌زدا به طور مداوم به سرباره اضافه می‌شد.

%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
18Cr8Mn (در کوره مقاومت الکتریکی MoSi_2)	0.15	0.42	18.58	0.016	0.012	20.45	-
18Cr18Mn2Mo (در کوره مقاومت الکتریکی MoSi_2)	0.16	0.38	19.69	0.020	0.018	18.88	2.82
22Cr15Mn (در کوره مقاومت الکتریکی MoSi_2)	0.18	0.40	14.94	0.015	0.008	22.84	-
18Cr8Mn (در کوره مقاومت الکتریکی MoSi_2)	0.12	0.35	8.75	0.019	0.017	19.63	-
18Cr8Mn (در کوره القائی)	0.12	0.35	19.50	0.015	0.004	18.96	-



شکل 1- تغییرات نیتروژن محتوی در آلیاژهای مختلف

1.2 نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی آلیاژها در جدول 1 و تغییرات محتوای نیتروژن در شکل 1 نشان داده شده‌اند. محتوای نیتروژن $18\text{Cr}18\text{Mn}$ ، $18\text{Cr}18\text{Mn}2\text{Mo}$ و $22\text{Cr}15\text{Mn}$ در کوره مقاومت الکتریکی پس از 60 دقیقه به تعادل رسید. محتوای نیتروژن $18\text{Cr}18\text{Mn}$ در کوره القائی پس از 50 دقیقه به تعادل رسید.

مدل ترمودینامیکی جدیدی برای محاسبه حلالیت نیتروژن در فولادهای ضد زنگ مذاب در دامنه گسترده‌ای از غلظت آلیاژها، دما و فشار

به صورت نشان داده شده در معادله‌های (1) و (2) در تحقیق قبلی [5] توسعه یافته است. پارامتر جدید δ_N^P بدست آمد که نشان دهنده تأثیر فشار نیتروژن بر ضریب اکتیویته نیتروژن است.

$$\delta_N^P = 0.06, P_{N_2}/P^\circ > 1.0 \text{ هنگامی که } \delta_N^P = 0, P_{N_2}/P^\circ \leq 1.0$$

جدول 2 مقایسه غلظت نیتروژن محاسبه شده با استفاده از مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در کوره MoSi₂ و کوره القائی در 1550°C را نشان می‌دهد، که نشانگر وجود انحراف منفی بزرگتر می‌باشد. تحقیقات زیاد در مورد آلیاژی‌سازی با گاز نیتروژن نشان داده‌اند که آلیاژی‌سازی با نیتروژن می‌تواند تسریع شود با: افزایش سرعت جریان گاز نیتروژن، طولانی شدن مدت زمان ماندگاری حباب‌ها، افزایش سطح تماس گاز/فولاد مذاب و کاهش میزان گوگرد و اکسیژن در فولاد مذاب. نیتروژن کمتر بدست

آمده در فولاد مذاب در کوره MoSi₂ عمدتاً ناشی بود از: سرعت جریان کمتر گاز، عمق کمتر فولاد مذاب منجر به مدت زمان کوتاه ماندگاری حباب، محتوای بیشتر گوگرد سطح-فعال بالاتر در فولاد مذاب که از انتقال جرم نیتروژن جلوگیری می‌کند، و همزنی ناکارآمد.

در طی آزمایش در کوره القائی 100 کیلوگرمی

جدول 2- مقایسه غلظت نیتروژن محاسبه شده با مقادیر اندازه‌گیری شده.			
	مقدار اندازه‌گیری [%]	مقدار محاسباتی [%]	فشار جزئی نیتروژن [MPa]
18Cr8Mn (در کوره مقاومت الکتریکی MoSi ₂)	0.62	0.81	0.1
18Cr18Mn2Mo (در کوره مقاومت الکتریکی MoSi ₂)	0.64	0.83	0.1
22Cr15Mn (در کوره مقاومت الکتریکی MoSi ₂)	0.65	0.80	0.1
18Cr8Mn (در کوره مقاومت الکتریکی MoSi ₂)	0.41	0.49	0.1
18Cr8Mn (در کوره القائی)	0.69	0.71	0.078

ذوب در هوا، مقادیر اندازه‌گیری شده 18Cr18Mn اندکی کمتر از مقادیر محاسبه شده به صورت نشان داده شده در جدول 2 است. سطح تماس گاز/فولاد مذاب در اثر ایجاد تعداد زیادی حباب نیتروژن بسیار ریز تولید شده از پوروس پلاگ‌های اصلاح شده در کف کوره در فولاد مذاب افزایش داده شد. افزایش سرعت جریان نیتروژن، فولاد مذاب عمیق‌تر با افزایش زمان ماندگاری حباب، همزنی کارآمد، و محتوای گوگرد و اکسیژن کمتر برای جذب نیتروژن بودند.

2 آلیاژی‌سازی با نیتروژن توسط فروآلیاژهای نیتروژن‌دار

2.1 آزمایش‌ها

سری‌های Fe-Cr-Mn-Mo فولادهای ضد زنگ آستنیتی پرنیتروژن بدون نیکل با استفاده از کوره القائی ذوب در خلاء (VIF) 25 کیلوگرمی و 100 کیلوگرمی تحت اتمسفر نیتروژن با افزودن فروکروم نیتروژن‌دار (نیتروژن 5 درصد) بدست آمدند. دمای ذوب در 1530-1550°C کنترل شد، و فروکروم نیتروژن‌دار به طور یکنواخت و پیوسته اضافه شد. سپس مذاب برای مدت زمان کوتاهی نگه داشته شد و هنگامی که دما در دامنه 1460-1480°C بود، ریخته‌گری شد. شمش‌های ریخته‌گری شده توسط رادیوگرافی برای سالم بودن آنها مورد بررسی قرار گرفتند و از نظر ترکیب شیمیایی آنالیز شدند.

شمش‌های ریخته‌گری شده در دمای 1200°C به مدت 2 ساعت نگه داشته شدند و به الکترودهایی با قطر 75mm (100 کیلوگرم VIF) و 50mm (25 کیلوگرم VIF) آهن‌گری گردیدند. دمای نهایی آهن‌گری باید بالاتر از 1050°C باشد.

سپس الکترودها تحت اتمسفر نیتروژن در فرآیند ESR ذوب مجدد شدند. ترکیب سرباره به شرح زیر بود:

(A) ANF-6 ; (B) 0.63 CaF₂- 0.17 CaO - 0.15 Al₂O₃- 0.02 SiO₂- 0.03 MgO

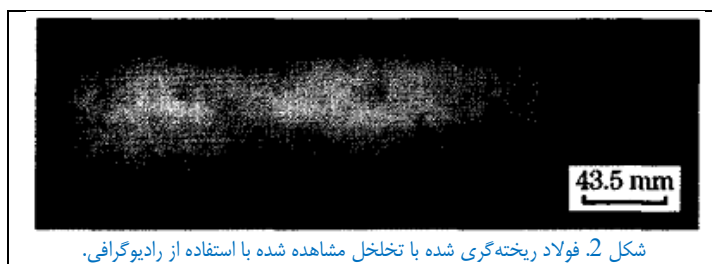
ردیف	گرید فولاد	ولتاژ متوسط [V]	جریان متوسط [A]	قطر قالب [mm]	قطر الکترود [mm]	سرعت ذوب کردن [kg·min ⁻¹]	سرباره	کمیت سرباره [kg]	کمیت اکسیژن زدا [g]	محافظت با نیتروژن
1	18Cr8Mn	51	2000	130	75	0.95	A	3	0	خیر
2	18Cr8Mn	44	1600	80	50	0.78	B	2	10	بله
3	18Cr8Mn	44	1750	80	50	0.80	B	2	10	بله
4	18Cr18Mn2Mo	44	1750	80	50	0.74	B	2	10	بله
5	18Cr18Mn2Mo	44	1750	80	50	0.79	B	2	10	بله
6	18Cr18Mn2Mo	44	1800	80	50	0.84	B	2	10	بله
7	18Cr18Mn2Mo	47	2200	130	75	1.22	B	3.5	70	بله

در طی ESR، آلومینیوم به عنوان اکسیژن زدا به طور مداوم به سرباره اضافه می‌شود. پارامترهای فرآیند ESR در **جدول 3** نشان داده شده است. سپس شمش‌های ESR از نظر ترکیب شیمیایی آنها مورد آنالیز قرار گرفتند و توسط رادیوگرافی بررسی شدند. اچ کردن با اسید گرم برای تعیین ساختار ماکرو انجام شد. ترکیب معمول آخال با استفاده از SEM مورد بررسی قرار گرفت. شمش ESR شماره 2 به صفحه 6mm نورد گرم شد و سپس آخال‌های معمول با استفاده از SEM مورد بررسی قرار گرفتند. ریزساختار صفحه نورد گرم شده پس از همگن‌سازی در دمای 1150°C به مدت یک ساعت و سپس کوانچ کردن در آب با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت.

2.2 نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل رادیوگرافی شمش ریخته‌گری تولید شده با VIF تحت اتمسفر نیتروژن، تخلخل گسترده‌ای را نشان داد، همانطور که در **شکل 2** نشان داده شده است. در طی انجماد، تشکیل منطقه فریت دلتا با حلالیت کم نیتروژن در فولاد Fe-Cr-Mn-M وجود داشت، که نیتروژن را به فضای بین دندریتی پس می‌زند. جوانه‌زنی نیتروژن ممکن است در این سطح تماس ناهمگن بین دندریت و فلز مذاب رخ دهد. تمام شمش‌های ESR سالم و بدون تخلخل بودند، همانطور که در **شکل 3** نشان داده شده است. احتمال وقوع جوانه‌زنی حباب گاز، به دلیل سرعت خنک‌کنندگی سریع و زمان کوتاه انجماد محلی در طی فرآیند ESR کم بود.

مقایسه غلظت نیتروژن اندازه‌گیری شده در VIF با مقادیر محاسبه شده در **جدول 4** نشان داده شده است. شمش‌های ریخته‌گری شده با غلظت بالای نیتروژن که نزدیک به مقادیر محاسبه شده بودند با استفاده از VIF توسط افزودن فروکروم نیتروژن‌دار تحت اتمسفر نیتروژن بدست آمدند. حداکثر محتوای نیتروژن 0.83



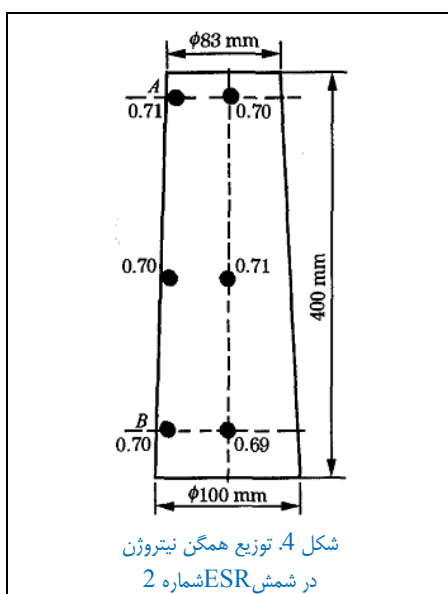
ردیف	فشار جزئی نیتروژن [MPa]	دمای ذوب تصفیه‌ای [°C]	غلظت نیتروژن اندازه‌گیری شده [%]	غلظت نیتروژن محاسباتی [%]
1	0.1	1535	0.69	0.69
2	0.1	1550	0.73	0.82
3	0.1	1530	0.83	0.85
4	0.1	1543	0.77	0.82
5	0.1	1550	0.71	0.81
6	0.1	1570	0.59	0.69
7	0.1	1550	0.70	0.84

درصد بود. ترکیب شیمیایی شمش قبل و بعد از ESR در **جدول 5** نشان داده شده است. بهره‌دهی نیتروژن در طی ESR به دلیل اتمسفر نیتروژن و سرعت پائین ذوب کردن زیاد بود. حداکثر مقدار نیتروژن 0.81 درصد بود. توزیع همگن نیتروژن در شمش‌های ESR شماره 2 در **شکل 4** نشان داده شده است. چنانکه در شکل 4 و جدول 5 نشان داده شده است، کروم و منگنز نیز به صورت همگن توزیع شده‌اند.

بهره‌دهی نیتروژن با کاهش سرعت ذوب افزایش یافت همانطور که در **شکل 5** ارائه شده است. این احتمالاً می‌تواند به دلیل این واقعیت باشد که وقتی سرعت ذوب کردن کم و حوضچه مذاب کم عمق باشد، انجماد در حال پیشروی می‌تواند به سرعت نیتروژن را در طی انجماد شمش گیر بیاندازد. علاوه بر این، حلالیت نیتروژن در فولادهای آستنیتی سری‌های Fe-Cr-Mn-Mo در حالت جامد بیشتر از فولاد مذاب بود، به طوری که در طی انجماد سریع، نیتروژن بیشتری در شمش‌های منجمد شده تقسیم می‌شد.

جدول 5- ترکیب شیمیایی شمش‌های ریخته‌گری شده و شمش‌های حاصل از ESR.

ردیف	ESR	C	Si	Mn	P	S	Cr	N	O	Mo	Al	بهره‌دهی نیتروژن [%]
1	قبل	0.055	0.26	17.7	0.015	0.015	17.6	0.69	0.0025	-	< 0.03	81.2
	بعد	0.047	0.24	15.6	0.015	0.009	17.5	0.56	0.0046	-	< 0.03	
2	قبل	0.057	0.36	19.20	0.022	0.014	19.78	0.73	0.0036	-	< 0.03	97.3
	بعد - A	0.053	0.24	19.10	0.020	0.007	19.78	0.71	0.0038	-	< 0.03	
	بعد - B	0.052	0.22	19.95	0.020	0.008	19.82	0.70	0.0025	-	< 0.03	
3	قبل	0.058	0.20	18.53	0.021	0.015	19.93	0.83	0.0036	-	< 0.03	97.5
	بعد	0.052	0.17	18.30	0.020	0.006	20.01	0.81	0.0025	-	< 0.03	
4	قبل	0.055	0.42	18.84	0.019	0.015	19.07	0.77	0.0075	2.20	< 0.03	100
	بعد	0.057	0.38	18.83	0.019	0.007	19.15	0.77	0.0052	2.25	< 0.03	
5	قبل	0.048	0.45	18.19	0.020	0.015	19.10	0.71	0.0071	2.23	< 0.03	97.2
	بعد	0.045	0.40	17.54	0.020	0.007	18.59	0.69	0.0036	2.03	< 0.03	
6	قبل	0.052	0.49	15.12	0.023	0.012	19.55	0.59	0.0082	2.28	< 0.03	94.9
	بعد	0.045	0.47	14.83	0.022	0.006	19.47	0.56	0.0050	2.26	< 0.03	
7	قبل	0.048	0.23	18.95	0.018	0.015	19.55	0.70	0.0090	2.06	< 0.03	92.9
	بعد	0.042	0.18	18.24	0.017	0.006	19.20	0.65	0.0040	2.25	< 0.03	



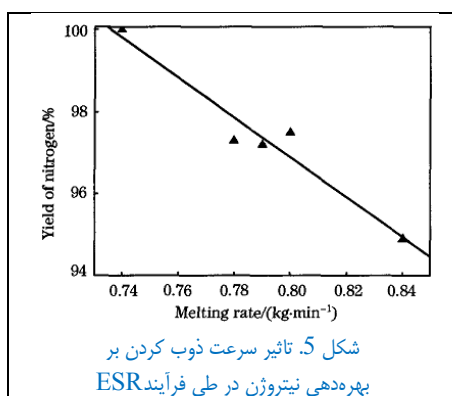
به دلیل انجام ذوب مجدد ESR تحت شرایط اتمسفر نیتروژن و افزودن مداوم آلومینیوم به عنوان اکسیژن‌زدا به سرپاره، پتانسیل اکسیژن در سرپاره کاهش یافت و تلفات منگنز به وضوح کاهش یافت، همانطور که در **شکل 6** نشان داده شده است. **شکل 7** ساختار ماکروی معمول جهت طولی و عرضی شمش ESR را نشان می‌دهد. شمش عاری از تمام نواقص است. نتایج آنالیز SEM نشان داد که آخال‌های متنوع نامنظم Al_2O_3 و تعداد محدودی از آخال‌های MnS وجود دارند، که به طور نمونه‌وار در **شکل 8** نشان داده شده‌اند. اندازه اکثر آخال‌ها کمتر از $5\mu m$ بود. **شکل 9** آخال‌های نمونه‌وار با ضخامت $6\mu m$ موجود در صفحه نورد گرم شده را نشان می‌دهد. از آنجا که آخال MnS مستعد تغییر شکل است، نوار آخال MnS با اندازه تقریبی $10\mu m$ در امتداد جهت نورد وجود دارد. پس از همگن‌سازی صفحه نورد گرم شده در دمای $1150^\circ C$ به مدت یک ساعت و به دنبال آن کوانچ کردن در آب، ریزساختار از آستنیت همگن تشکیل شده بود، همانطور که در **شکل 10**

نشان داده شده است.

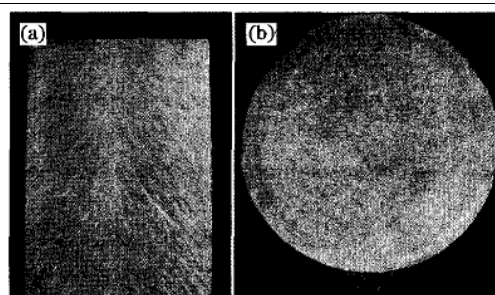
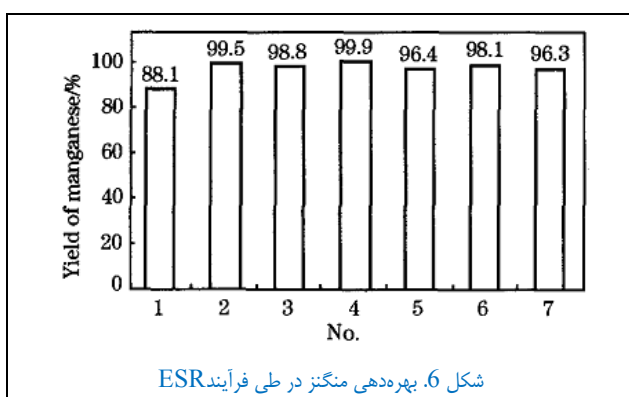
3 نتیجه گیری

(1) آلیاژی سازی با نیتروژن می تواند با افزایش سرعت جریان گاز نیتروژن، طولانی شدن زمان ماندگاری حبابها، افزایش سطح تماس گاز/فولاد مذاب و کاهش میزان گوگرد و اکسیژن در فولاد مذاب، تسریع شود. محتوای نیتروژن 0.69 درصد در 18Cr18Mn با استفاده از کوره القائی ذوب در هوا توسط دمش گاز نیتروژن از پوروس پلاگ بدست آمد.

(2) شمش سالم فولاد ضد زنگ بدون نیکل و پرنیتروژن می تواند با استفاده از کوره القائی ذوب در خلاء با افزودن فروکروم نیتروژن دار و کوره ذوب مجدد ESR در اتمسفر نیتروژن تولید شود. با کاهش سرعت ذوب می توان بهره دهی نیتروژن را افزایش داد.



شکل 6. بهره دهی منگنز در طی فرآیند ESR



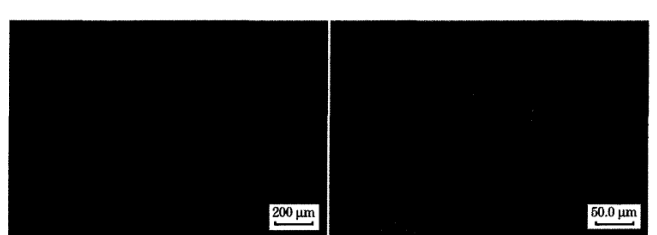
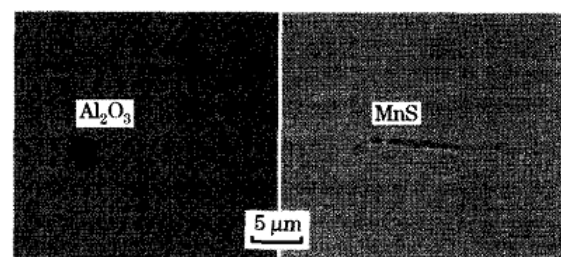
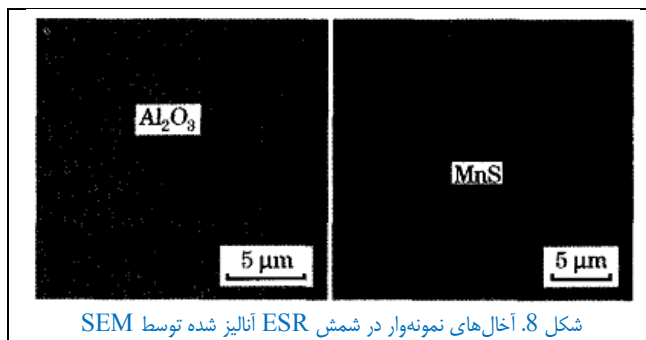
(a) Longitudinal direction; (b) Transversal direction

شکل 7. ساختار ماکروی شمش ESR

(3) به دلیل ذوب مجدد ESR تحت شرایط اتمسفر نیتروژن و افزودن مداوم آلومینیوم به عنوان اکسیژن زدا به سرباره، تلفات منگنز به وضوح کاهش یافت.

(4) آخال های عمدتا نامنظم Al_2O_3 و آخال های MnS در شمش های ESR وجود دارند، و اندازه بیشتر آخال ها کمتر از $5\mu m$ بود.

(5) پس از همگن سازی صفحه نورد گرم شده در دمای $1150^\circ C$ به مدت یک ساعت و سپس کوانچ کردن در آب ریزساختار از آستنیت همگن تشکیل شده بود.



مراجع:

- 1-Simmons JW. High-Nitrogen Alloying of Stainless Steels [J]. Material Science and Engineering, 1996, 207A; 159-169.
- 2-Paton B E, Saenko V Y, Pomarin Y M, etal. Arc Slag Remelting for High Strength Steel and Various Alloys [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(24) : 7269-7274.
- 3- Stein G, Huchlenbroich I. Manufacturing and Application of High Nitrogen Steels[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2004, 19(1) : 7-17.
- 4-Mudali U K, Raj B. High Nitrogen Steels and Stainless Steels [M]. Pangbourne: Alpha Science International Ltd, 2004.
- 5- JIANG Zhou-hua, LI Hua-bing, CHEN Zhao-ping, etal. The Nitrogen Solubility in Molten Stainless Steel[J]. Steel Research International, 2005, 76(10) : 730—735.