



چکیده

امروزه نیاز به فولاد های تمیز؛ روند رو به افزایشی داشته و دست یابی به کیفیت های بالاتر مورد نظر صنایع گوناگون به ویژه صنایع نفت و گاز؛ ریلی و... می باشد. با توجه به میزان کیفیت مورد نیاز؛ سطوح کیفی گوناگونی برای فولاد تمیز ارایه می شود. مهمترین خواص فولاد که تحت تاثیر میزان تمیزی فولاد قرار دارد شامل استحکام؛ چقرمگی؛ مقاومت به خوردگی و قابلیت ماشینکاری می باشد. از دیدگاه کلی فولاد های تمیز از نظر ناخالصی ها و عناصر ناخواسته زیانبار (گوگرد؛...)؛ آخال ها؛ گازهای اکسیژن؛ نیتروژن و هیدروژن در پایین ترین مقدار ممکن قرار دارند. یکی از روش های بهینه ی تولید برای این منظور به کار گیری کنورتور تحت خلاء می باشد که در این فرآیند امکان کاهش مقدار گازهای محلول؛ گوگرد؛ آخال ها و نیز اصلاح شکل آنها با عملیات تزریق سیلیکو کلسیم فراهم شده است. طراحی کنورتور خلاء به گونه ایست که دو هدف عمده را فراهم می کند:

1- تولید انواع فولاد های پرآلیاژ و زنگ نزن به ویژه با کربن کمتر از 0/03 %



تولید فولاد تمیز با فن آوری پالایش مذاب در کنورتور خلاء

غلامرضا انعامی - مجتبی عطاری
ماشین سازی اراک



2- تولید انواع فولادهای تمیز و گاززدایی شده مطابق قانون سیورت؛ مقدار گاز حل شده در مذاب با جذر فشار جزئی آن گاز متناسب است. بنابراین با ایجاد خلاء در محیط کنورتور و سپری شدن زمان کافی؛ گازهای اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن از مذاب خارج شده و امکان رفتن ناخالصی ها به سرباره نیز فراهم می شود. برای سنجش آخال ها از استانداردهای گوناگونی استفاده می شود که اساس کار در آنها شبیه هم بوده و در استاندارد DIN50602 با دو روش M (بر مبنای تعیین بزرگترین ناخالصی) و K (بر مبنای شمارش ناخالصی هایی که مساحت آنها قابل توجه می باشد) انجام می شود.

کلمات کلیدی: فولاد تمیز - کنورتور خلاء - گاززدایی - آخال

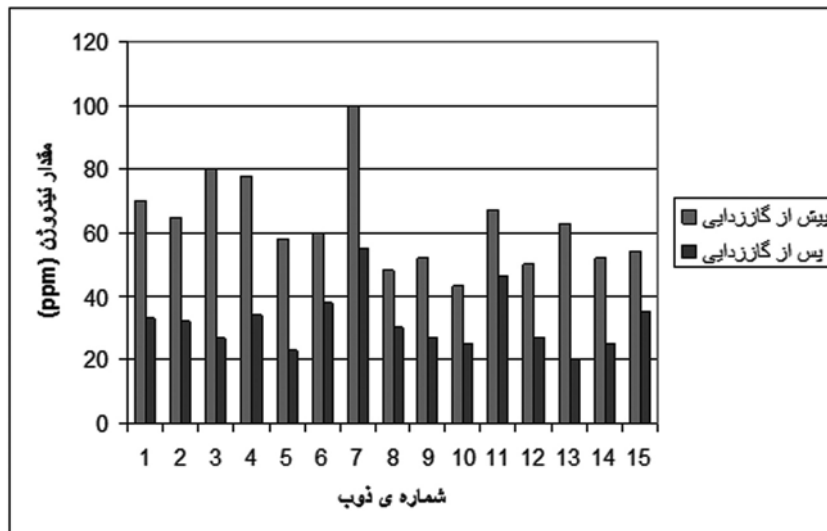
مقدمه

و هیدروژن از مذاب خارج شده و امکان رفتن ناخالصی ها به سرباره نیز فراهم می شود. البته گاز اکسیژن محلول در مذاب با کربن واکنش داده و تولید گاز منوکسید کربن میکند که با کاهش فشار جزئی این گاز در شرایط خلاء، واکنش به سمت تولید منوکسید کربن بیشتری رفته و بنابراین گاز اکسیژن حل شده در مذاب کاهش بیشتری خواهد داشت. گاز نیتروژن نیز، هم در مذاب حل شده و هم ترکیبات نیتریدی همانند نیتريد آلومینیم، نیتريد سیلیسیم و نیتريد کرم تشکیل می دهد که با کاهش مقدار نیتروژن در اثر ایجاد خلاء، ترکیبات یاد شده تجزیه شده و گاز نیتروژن آزاد شده از مذاب خارج می شود.

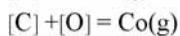
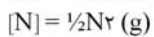
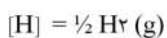
مطابق قانون سیورت (1) مقدار گاز حل شده در مذاب $[g] \propto \sqrt{p}$ جزئی آن گاز متناسب است:

(1)

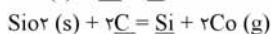
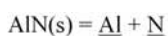
بنابراین در صورتیکه بتوان فشار گازهای موجود در محیط کوره را کاهش داد، گازهای محلول در مذاب تمایل بسیار زیادی برای خارج شدن از مذاب خواهند داشت که با دمش گاز آرگون از کف حمام مذاب، این امر شدت خواهد یافت. با ایجاد خلاء در محیط کوره و سپری شدن زمان کافی، گازهای اکسیژن، نیتروژن



شکل 1- کاهش نیتروژن در فولاد های ساختمانی در فرآیند گاز زدایی در خلاء



واکنش های جنبی دیگر نیز به شرح زیر انجام می شوند:



(2) از طرفی با توجه به اینکه شرایط احیایی خوبی در مذاب به دست

می آید، امکان گوگردزدایی نیز در حد بالایی وجود دارد. با ایجاد

(3) چنین شرایطی در کنورتور تحت خلاء که دارای جداره ی نسوز دولومیتی است، مقدار گوگرد به کمتر از 0/007% مقادیر گازهای

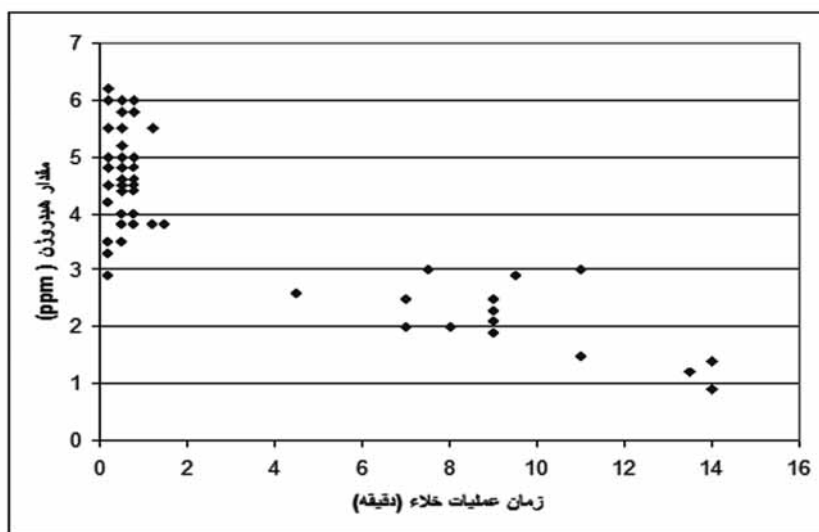
(4) حل شده در مذاب به کمترین مقدار (شکل های 1 و 2) و میزان

(5) ناخالصی ها در پایین ترین حد قرار خواهد گرفت. واکنش های

(6) گاز زدایی به صورت زیر هستند که با توجه به کاهش فشار در

محفظه ی خلاء؛ به سمت راست پیش رفته و گاز بیشتری تولید

و از مذاب خارج می شود:



شکل 2 - کاهش هیدروژن با توجه به زمان در فرآیند گاز زدایی در خلاء

و امکان دست یابی به کربن کمتر از 3/0٪ نیز وجود دارد. در این حالت به همراه کربن مقداری کرم، منگنز و سیلیسیم نیز می‌سوزد که از مجموع واکنش‌های انجام شده، حرارت مورد نیاز تا پایان عملیات فراهم می‌شود. هنگامی که ذوبی با درصد کرم بالا در فشار 1 bar و درجه حرارت 1700°C تحت دمش اکسیژن قرار گیرد، اکسایش کرم با رسیدن درصد کربن در مذاب به 0/4 درصد شروع می‌شود ولی در شرایط خلاء سوختن کرم پس از رسیدن درصد کربن به 0/15 درصد شروع خواهد شد و در واقع به دلیل سوختن ترجیحی کربن در شرایط خلاء تلفات دیگر عناصر آلیاژی حد اقل خواهد بود. به ازای سوختن هر 0/1٪ کربن، کرم، منگنز و سیلیسیم به ترتیب در حدود 10:10؛ 5 و 30 درجه سانتی‌گراد به دمای ذوب افزوده می‌شود. اگر فرآیند به خوبی اجرا شود اکسایش کرم؛ سیلیسیم و منگنز اندک بوده و به ترتیب در حدود 0/5؛ 0/2 و 0/2 درصد خواهد بود. در مراحل پایانی دمش اکسیژن و به منظور جلوگیری از سوختن بیش از اندازه ی کرم از دبی اکسیژن به تدریج کاسته می‌شود. برای بازیابی کرم اکسید شده پس از پایان اکسیژن دهی از یک مخلوط احیایی شامل آلومینیم، فروسیلیسیم، آهنک پخته و... استفاده می‌شود. در پایان مرحله ی دمش اکسیژن، درجه حرارت در کنورتور به بیش از 1800 خواهد رسید و فرصت کافی برای گاززدایی نهایی در خلاء فراهم می‌باشد. البته لازم به ذکر است که در مرحله ی سوختن کربن و تولید منوکسید کربن، نیتروژن زدایی از مذاب در حد بالایی انجام شده است.

چگونگی اجرای فرآیند

طراحی کنورتور تحت خلاء (شکل 3) به گونه ایست که اهداف زیر را تامین می‌کند:

1 - تولید انواع فولاد های پرآلیاژ و زنگ نزن به ویژه با کربن کمتر از 3/0٪

2- تولید انواع فولادهای تمیز و گاززدایی شده

نخست مذاب در کوره قوس الکتریکی بر مبنای آنالیز مورد نیاز و نزدیک به آنالیز نهایی آماده شده و با کمترین

مقدار سرباره با دمای 1700 به کنورتور منتقل می‌شود. پیش از تخلیه ذوب؛ بایستی کنورتور تا بیش از

1000 پیش گرم شده باشد و جریان دمش آرگون از کف در آن برقرار باشد.

پس از اندازه گیری دمای مذاب و نمونه گیری در کنورتور، افزودنی های مورد نیاز همانند آهنک پخته و ... به درون کنورتور

ریخته می‌شود. سپس کنورتور به حالت عمودی قرار گرفته و سقف یا درپوش روی آن قرار گرفته و سیستم بسته می‌شود. در

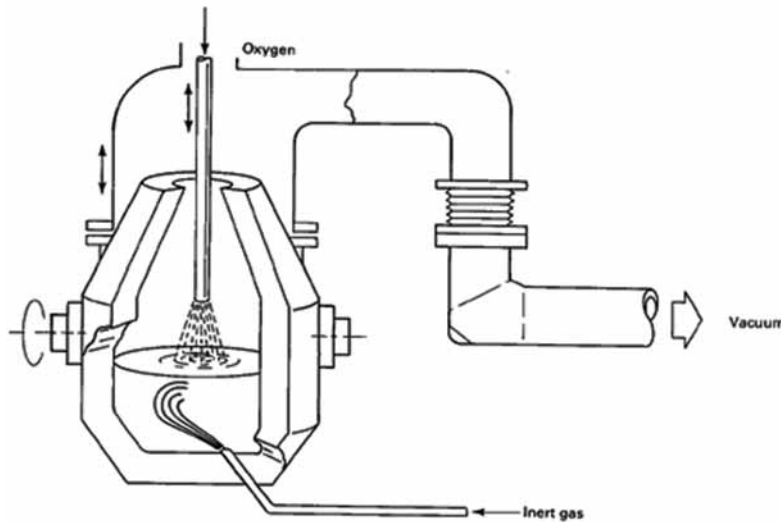
شروع کار پمپ های آبی روشن شده و فشار درون کنورتور در حد متوسط کاهش می‌یابد. همزمان لانس اکسیژن نیز حرکت کرده و

در ارتفاع حدود یک متری از سطح مذاب در کنورتور قرار گرفته و دمش اکسیژن با دبی 600 مترمکعب در ساعت، شروع می‌شود. در

این مرحله سوختن آلومینیم در خلاء متوسط انجام و گرما تولید می‌شود. شایان ذکر است که به ازای هر 0/1٪ سوختن آلومینیم،

25 به دمای مذاب افزوده می‌شود. البته در صورتیکه تولید فولاد پر آلیاژ و زنگ نزن مورد نظر باشد، مذاب اولیه دارای

1/5 - 1٪ کربن بوده و با دمش اکسیژن این کربن سوزانده شده



شکل 3- نمایی از کنورتوردمش اکسیژن در خلاء (VODC)

آنها اهمیت بسیار زیادی دارد. در عمل دسته بندی آخال ها از نظر اندازه به آخال درشت و آخال ریز مرسوم است. آخال های درشت بایستی به دلیل اثرات زیانبار شان حذف شوند، اما وجود آخال ریز می تواند قابل تحمل باشد. عبارت فولاد تمیز به معنی فولاد عاری از آخال می باشد، اما هیچ فولادی نمی تواند عاری از کلیه ی آخال ها باشد. تعداد آخال ها در یک تن فولاد در محدوده ی 10^{10} تا 10^{15} برآورد شده است. از این رو یک فولاد تمیز به معنی فولاد تمیز تر و فولادی است که دارای کمترین مقدار آخال درشت و زیانبار باشد. در فولاد هایی که از طریق گاز زدایی در خلاء تهیه شده و علاوه بر گوگردزدایی تحت عملیات تزریق پودر سیلیکو کلسیم نیز قرار می گیرند، به خوبی میزان آخال ها کاهش یافته و پراکندگی آنها نیز از یکنواختی بالایی برخوردار بوده و شکل آنها نیز گرد می شود. برای بررسی ناخالصی ها از استانداردهای گوناگونی همانند ASTM E45 ؛ DIN 50602 ؛ JIS G0555 و Gost 1778 استفاده می شود. به طور کلی در ارزیابی آخال ها نخست نوع آخال (شکل 6) شناسایی می شود. سپس ضخامت و در نهایت طول یا مجموع طول در هر مقطع تعیین شده و با جدول ها یا نمودار ها مطابقت داده می شود. اساس کار در این استانداردها یکسان بوده و در استاندارد DIN 50602 به این شرح می باشد: دو روش برای سنجش در نظر گرفته شده است: 1- روش M: در این روش بزرگترین ناخالصی دیده شده از نظر طول؛ ضخامت یا قطر برای انواع مختلف در هر نمونه ثبت و گزارش می شود.

2- روش K: در این حالت ضریب درصد سطح ناخالصی های غیر فلزی در یک ساختار تعیین می شود. یعنی مجموع به دست آمده از شمارش ناخالصی هایی که مساحت آنها قابل توجه می باشد در سطح نمونه که بر مبنای مساحت 1000 میلی متر مربع

با در مدار قرار گرفتن تزریق کننده های بخار؛ فشار درون کنورتور کاهش یافته و در نهایت به زیر 5 میلی بار می رسد (خلاء عمیق). در این شرایط گازهای محلول در مذاب در حد بسیار پایینی کاهش خواهند یافت. همچنین در این فاصله آخال های موجود در ذوب به سرباره آمده و ضمن کاهش میزان آخال ها ذوب از نظر دما و ترکیب شیمیایی نیز بسیار همگن و یکنواخت می شود. در صورتیکه پوشش نسوز کنورتور دولومیتی باشد، گوگردزدایی نیز در حد بسیار بالایی انجام و مقدار گوگرد نهایی در مذاب به کمتر از 0/007 درصد خواهد رسید.

در پایان عملیات، تزریق سیم سیلیکو کلسیم (1) به منظور گرد کردن شکل آخال ها و کاهش اثرات نا مطلوب آنها نیز انجام می شود. همانگونه که دیده می شود از توانایی های بارز این فرآیند گاززدایی، آخال زدایی، گوگرد زدایی و کربن زدایی عالی به همراه تلفات اندک کرم می باشد. همچنین مهمترین ویژگی هایی که در این فرآیند با تولید فولاد های تمیز به دست خواهد آمد به شرح زیر خواهند بود:

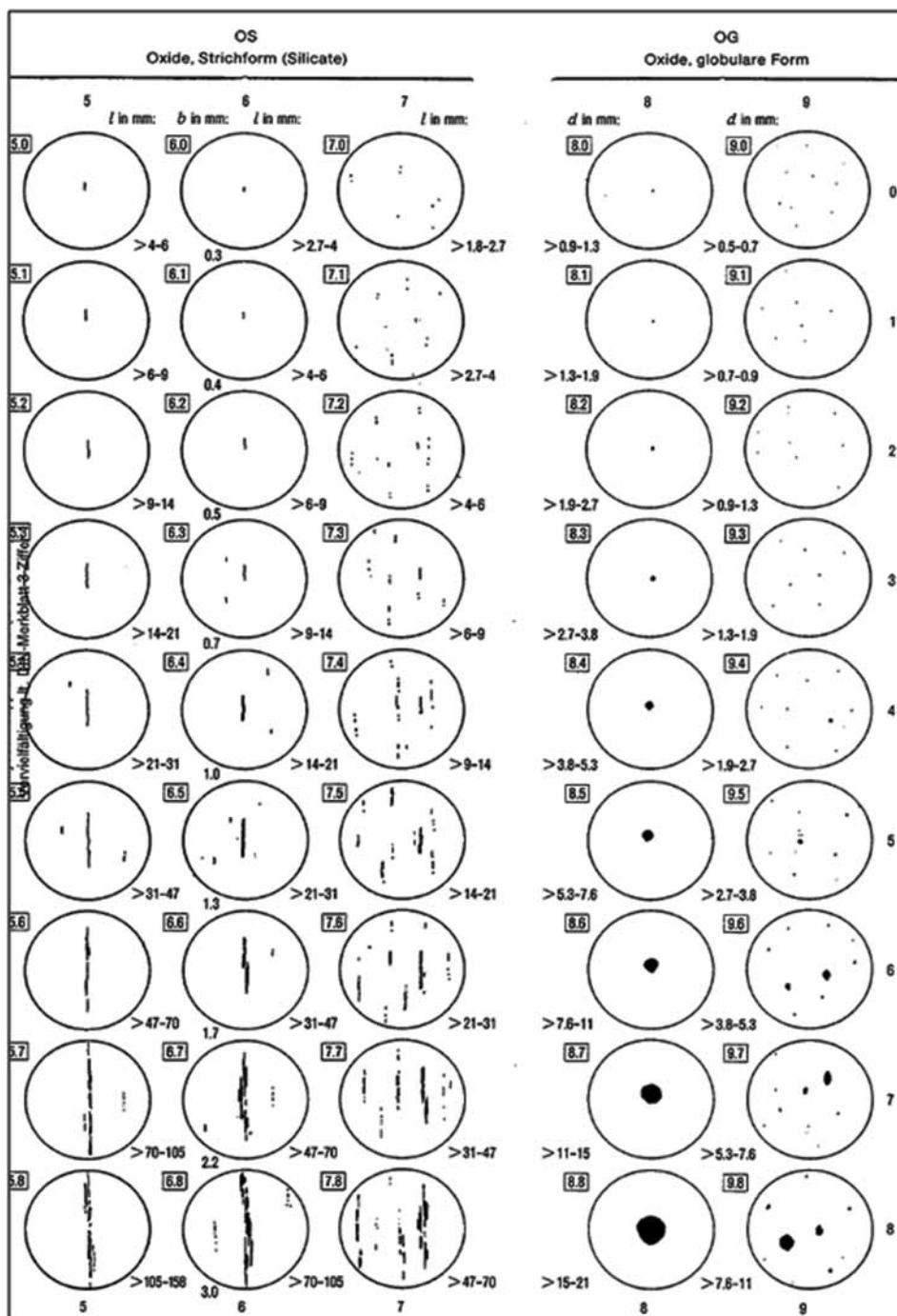
- 1- دست یابی به یکنواختی بسیار بالا در ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی
- 2- افزایش مقاومت در برابر ترک های گرم و سرد
- 3- کاهش عیوب ریختگی همانند حفره های گازی و ...
- 4- بهبود چقرمگی؛ استحکام خستگی و قابلیت جوش کاری
- 5- افزایش سیالیت مذاب و قابلیت ریخته گری
- 6- بهبود خواص ریخته گری و ماشینکاری

وضعیت آخال ها در فولاد

آخال ها اثرات نا مطلوبی بر خواص و کیفیت فولاد می گذارند. بنابراین کاهش، کنترل شکل؛ چگونگی توزیع و نیز اندازه ی

شوند. (شکل 4) نمونه گیری برای هر ذوب از ابتدا، وسط و انتهای ورق یا میلگرد انجام شده و حداقل 6 نمونه تهیه میشود. نمونه ها در جهت موازی با نور و از منطقه ی 1/4 ضخامت مطابق آنچه که در استاندارد آمده تهیه گشته (برای ضخامت کمتر از 25 میلی متر)

بیان می گردد. در این روش از یکسری دیگرام هایی با بزرگنمایی 100 و به قطر 80 میلیمتر؛ استفاده می شود. این نمودارها از صفر تا 8 و برای 4 نوع آخال شامل اکسیدی OG؛ سیلیکاتی OS؛ آلومینایی OA و سولفیدی SS دسته بندی شده اند که سطح تمیزی فولاد از K8 به سوی K0 افزایش می یابد. در واقع در معیار K0 بیشترین تعداد یا درشت ترین ناخالصی ها دیده می



شکل 4 - نمونه ای از دیگرام های سنجش ناخالصی ها طبق DIN 50602

(severity) که بر مبنای طول و تعداد آخال ها تنظیم شده گزارش می شود. در روش B هر ناخالصی که دارای طول 127 میکرون و یا بزرگتر از آن باشد اندازه گیری و گزارش می شود. در روش C اکسیدهای شکل ناپذیر آلومینیم و نوار های شکل پذیر سیلیکاتی شناسایی و با نمودار مربوطه مطابقت داده شده و بزرگترین رشته از هر نوع گزارش می شود. در روش D که ویژه ی فولاد های کم ناخالصی و تمیز می باشد با توجه به جدول 1 و نمودار مربوطه، ضریب شدت توزیع شناسایی و تعداد آخال ها گزارش می شوند. در روش E نیز ضریب شدت پراکنش و تکرار ناخالصی های بزرگ از نوع B و D با توجه به جدول های 1 و 2 و نمودار مربوطه ارزیابی می شوند.

ضخامت نمونه برابر با قطعه می باشد) و به خوبی پولیش می شوند. در برخی موارد برای اینکه ناخالصی ها در سطح پولیش شده ی نمونه ها دفرمه یا کشیده نشوند؛ نیاز به انجام عملیات حرارتی برای سخت کردن نمونه ها می باشد.

شایان ذکر است که مساحت ناخالصی ها از یک کلاس به کلاس دیگر تقریباً 2 برابر می شود یعنی مجموع طول و عرض آنها در حدود 1/5 برابر خواهد شد.

در استاندارد ASTM E45 به صورت کلی روش های ارزیابی آخال ها به 5 گروه از A تا E و آخالها در انواع سولفیدی A، آلومینایی B، سیلیکاتی C و اکسیدی گرد یا گلوبولار D دسته بندی شده و آخال های با قطر کمتر از 2 میکرون در نظر گرفته نمی شوند. در روش A با توجه به جدول 1 بدترین منطقه ی حضور آخال ها در نمونه شناسایی و با توجه به ضریب شدت توزیع

جدول 1 - جدول های شناسایی ناخالصی با توجه به طول (میکرون) یا تعداد و اندازه ی ضخامت در روش های A, D

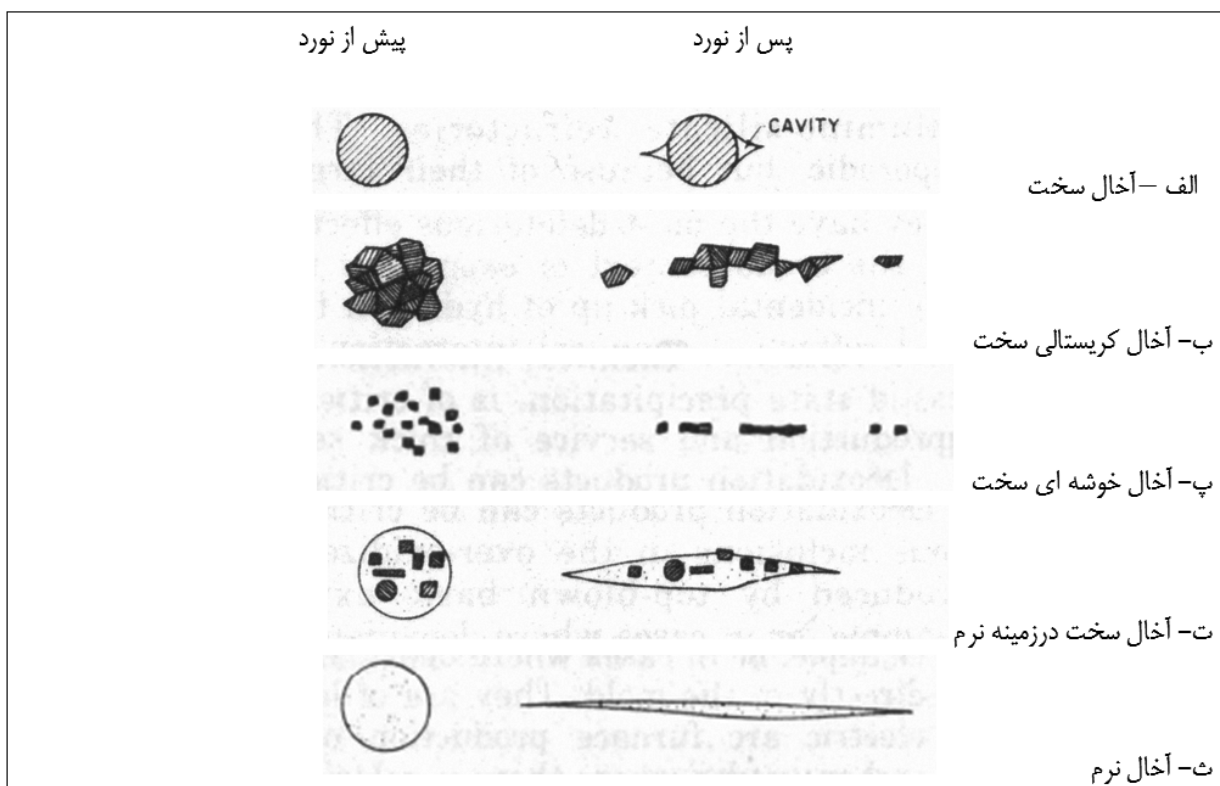
Severity	A	B	C	D	
0.5	37.0(.002)	17.2(.0007)		17.8(.0007)	1
1.0	127.0(.005)	76.8(.003)		75.6(.003)	4
1.5	261.0(.010)	184.2(.007)		176.0(.007)	9
2.0	436.1(.017)	342.7(.014)		320.5(.013)	16
2.5	649.0(.026)	554.7(.022)		510.3(.020)	25
3.0	898.0(.035)	822.2(.032)		746.1(.029)	36
3.5	1181.0(.047)	1147.0(.045)		1029.0(.041)	49
4.0	1498.0(.059)	1530.0(.060)		1359.0(.054)	64
4.5	1898.0(.075)	1973.0(.078)		1737.0(.068)	81
5.0	2230.0(.088)	2476.0(.098)		2163.0(.085)	100

Type	Thin Series		Heavy Series	
	Width, min, μm	Width, max, μm	Width, min, μm	Width, max, μm
A	2 (.00008)	4 (.00016)	>4 (.00016)	12 (.0005)
B	2 (.00008)	9 (.00035)	>9 (.00035)	15 (.0006)
C	2 (.00008)	5 (.0002)	>5 (.0002)	12 (.0005)
D	2 (.00008)	8 (.0003)	>8 (.0003)	13 (.0005)

2- سولفید آهن که در فولاد ریختگی به صورت نوارهای کشیده می باشد و در مرز دانه ها رسوب میکند. سولفید منگنز دملی شکل است و در درون دانه تجمع میکند. سولفید منگنز تا دمای 1000 نرم بوده و شکل پذیری خوبی دارد که به صورت کشیده در آمده و به رنگ خاکستری دیده می شود. البته در دمای بیش از 1000 شکل پذیری چندان زیادی ندارد. سولفیدها به رنگ خاکستری روشن دیده می شوند.

در شناسایی ناخالصی ها می توان از موارد زیر با توجه به نوع آنها از نظر نرم یا سخت بودن (شکل های 5 و 6) نیز کمک گرفت:

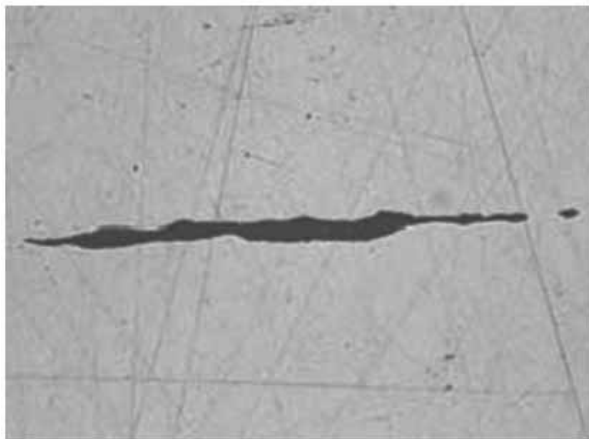
1- اکسید آلومینیم در شرایط انجماد به صورت دندریتی و خوشه ای منجمد می شود که در زمان نورد با توجه به دمای نورد و جامد و سخت بودن این ناخالصی؛ شکل پذیر نبوده و به صورت ذرات ریز درآمده در جهت نورد امتداد می یابند. آلومینات های کلسیم نیز در دماهای نورد شکل پذیر نیستند.



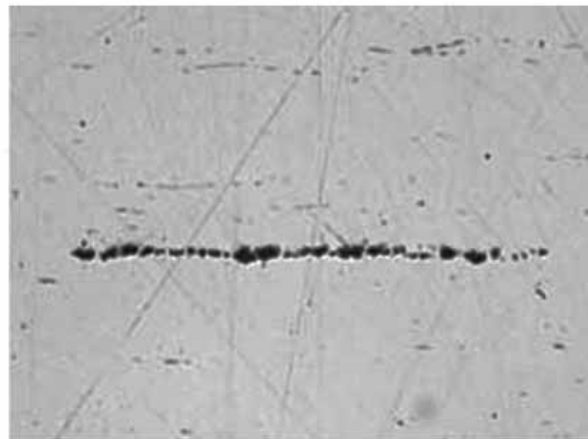
شکل 5 - اشکال ناخالصی ها پیش و پس از نورد

4- اکسیدهای آهن و ترکیبات اکسیدی به دلیل ماهیت سخت شان در دماهای متعارف نورد، به شکل کروی باقی مانده و تنها در هنگام نورد خرد و پخش می شوند. البته در دماهای بالاتر از 1200 شکل پذیر هستند.

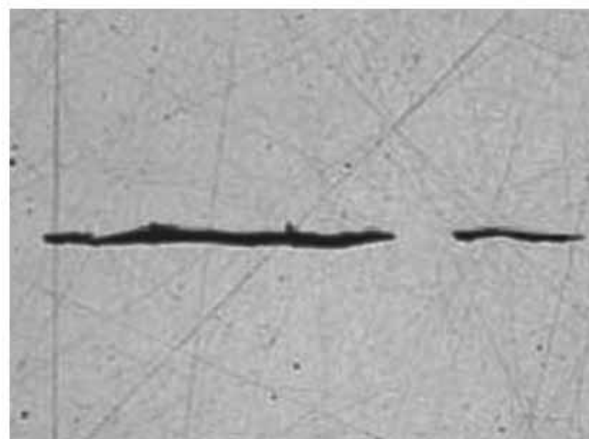
3- سیلیکاتها گونه های مختلفی دارند و در دمای اتاق شکل پذیر نبوده ولی در درجه حرارت های بالاتر شکل پذیر هستند. یک نوع از آنها در دمای نورد نرم بوده و به صورت کشیده ظاهر می شود و بقیه به صورت ذرات پراکنده دیده می شوند. البته شبیه سولفیدها انتهای کشیده ندارند و به رنگ های تیره تر و سیاه دیده می شوند.



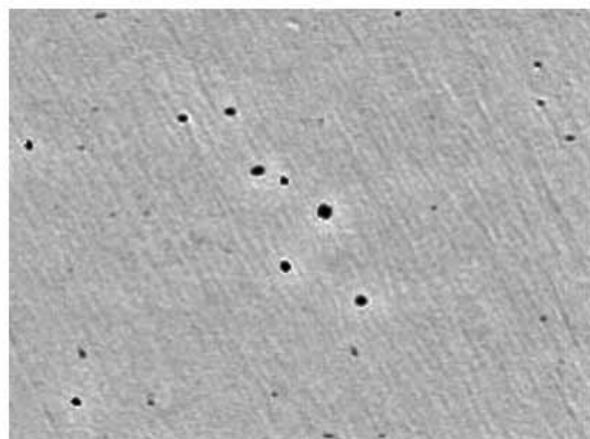
سولفیدی A



آلمینایی B



سیلیکاتی C



اکسیدی گرد (گلوبولار) D

شکل 6- نمونه ای از آخال ها در فولاد A: (سولفیدی B) آلومینایی C) سیلیکاتی D) اکسیدی گرد

ninth edition Volume 15, 1992

3- محمد حسین نشاطی «فولاد سازی ثانویه 1384؛ اصفهان؛ انجمن آهن و فولاد ایران»

4-DIN 50602, Metallographic examination; microscopic examination of special steels using standard diagrams to assess the content of non-metallic inclusions, 1985

5- احمد پاکزاد فولادسازی در کوره های زیمنس مارتین و کنورتور 1366؛ مرکز نشر دانشگاهی تهران

6-Charles R. Taylor, «Electric Furnace Steelmaking» Iron & Steel Society AIME, 1985

7- ASTM E45 Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel

نتیجه گیری

باتوجه به روند افزایشی تقاضا برای فولاد های با کیفیت بالا؛ یکی از روش های بهینه برای تولید اینگونه فولادها به کار گیری تجهیزات کنورتور تحت خلاء می باشد. از مزایای این روش کاهش مصرف و تلفات اندک مواد آلیاژی؛ کنترل عالی در فرآیند و امکان دسترسی به کربن بسیار پایین و گوگرد زدایی مطلوب به همراه گاززدایی می باشد. همچنین کاهش آخال ها و یکنواختی بسیار بالا در ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی از مزایای دیگر آن بوده و توانایی تولید انواع فولادهای پرآلیاژ و زنگ نزن از قابلیت های ویژه ی آن می باشد.

منابع و مراجع

- 1- کتابچه های کنورتور VODC مربوط به شرکت ALD
- 2- ASM international Edition, «Metals Handbook