



دانشگاه علم و صنعت
دانشکده مواد

بررسی انجماد و ساختار نانو در فولادهای زنگ نزن آستنیتی

فهرست

فولادهای زنگ نزن

معرفی

تقسیم بندی

نام گذاری

کاردها

فولادهای زنگ نزن آستنیتی

معرفی و خصوصیات

محدوده ترکیب شیمیایی

انواع گریدهای فولادهای زنگ نزن آستنیتی

انجماد فولاد زنگ نزن آستنیتی

حالت‌های انجماد

ریزساختار

جدایش عناصر آلیاژی

ترک‌های انجمادی

ایجاد ساختار نانو در فولاد زنگ نزن آستنیتی به روش ترمومکانیکی

فصل اول

فولادهای زنگ نزن

تعریف یک فولاد زنگ نزن

❖ فولادهای زنگ نزن گروهی از فولادهای پرآلیاژ بر پایه سیستمهای Fe-Cr-C, Fe-Cr و Fe-Cr-Ni می باشند. این فولادها شاخه مهمی از مواد مهندسی هستند که بطور گسترده در صنایع و محیطهای مختلف استفاده می شوند.

❖ یک تکنیک ساخت بسیار مهم برای فولادهای زنگ نزن جوشکاری می باشد.

❖ در مقایسه با فولادهای کربنی و آلیاژی مقاومت به خوردگی بالا، بدلیل تشکیل لایه محافظ نامرئی و چسبنده غنی از کرم. این فولادها حاوی حداقل 10%wt کرم می باشند. این مقدار کرم اجازه تشکیل یک اکسید پسیو، که از اکسیداسیون و خوردگی فلز زیرلایه تحت شرایط محیطی غیرخورنده جلوگیری می کند، را می دهد. عناصر دیگری که برای بهبود این خصوصیت به این فولادها اضافه می شوند عبارتند از:
Ni, Mn, Mo, Cu, Ti, Si, Nb, Al, S, Se

تقسیم بندی فولادهای زنگ نزن

با تغییر درصد کرم و سایر عناصر نظیر نیکل، مولیبدن، کربن و تیتانیوم ساختارهای مختلفی ایجاد می شود. بنابراین فولادهای زنگ نزن بر اساس فاز متالورژیکی غالب به گروه های مهم ذیل تقسیم می شوند:

۱. فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی با 0.1-1 درصد کربن و 12-17 درصد کرم.

۲. فولادهای زنگ نزن فریتی با مقادیر اندکی کربن و 12-20 درصد کرم

۳. فولادهای زنگ نزن آستنیتی با 17-25 درصد کرم و 8-20 درصد نیکل

۴. فولادهای زنگ نزن دوفازی (آستنیتی و فریتی)

۵. فولادهای زنگ نزن رسوب سختی شده (PH)

جدول (۱-۱): ترکیب شیمیایی انواع گریدهای فولاد زنگ نزن

Type	Nominal composition, %									
	Carbon(a)	Manganese(a)	Phosphorus(a)	Sulfur(a)	Silicon(a)	Chromium(a)	Nickel	Molybdenum	Copper	Other
Austenitic stainless steels										
301	0.15	2.0	0.045	0.03	1.00	17.0	7.0	---	---	---
302	0.15	2.0	0.045	0.03	1.00	18.0	9.0	---	---	---
304	0.08	2.0	0.045	0.03	1.00	19.0	9.3	---	---	---
304L	0.03	2.0	0.045	0.03	1.00	19.0	10.0	---	---	---
309	0.20	2.0	0.045	0.03	1.00	23.0	13.5	---	---	---
310	0.25	2.0	0.045	0.03	1.50	25.0	20.5	---	---	---
314	0.25	2.0	0.045	0.03	2.00	24.5	20.5	---	---	---
316	0.08	2.0	0.045	0.03	1.00	17.0	12.0	2.5	---	---
316L	0.03	2.0	0.045	0.03	1.00	17.0	12.0	2.5	---	---
317	0.08	2.0	0.045	0.03	1.00	19.0	13.0	3.5	---	---
321	0.08	2.0	0.045	0.03	1.00	18.0	10.5	---	---	Ti(min), 5 × C ⁻
347	0.08	2.0	0.045	0.03	1.00	18.0	10.5	---	---	(b)
348	0.08	2.0	0.045	0.03	1.00	18.0	11.0	---	---	(c)
Nitrogen-strengthened austenitic stainless steels										
18Cr-2Ni-12Mn	0.15	12.0(d)	0.06	0.03	1.00	18.0	2.0	---	---	0.30 N
21Cr-6Ni-9Mn	0.08	9.0(d)	0.04	0.03	1.00	21.0	6.0	---	---	0.28 N
18-18 Plus	0.15	18.0(d)	0.04	0.04	1.00	18.0	---	1.0	1.0	0.50 N
22Cr-13Ni-5Mn	0.06	5.0(d)	0.04	0.03	1.00	22.0	13.0	2.0	---	0.30 N, 0.2 Nb, 0.2 V
Martensitic stainless steels										
403	0.15	1.0	0.04	0.03	0.50	12.3	---	---	---	---
410	0.15	1.0	0.04	0.03	1.00	12.5	---	---	---	---
414	0.15	1.0	0.04	0.03	1.00	12.5	2.0	---	---	---
431	0.20	1.0	0.04	0.03	1.00	16.0	2.0	---	---	---
440A	(e)	1.0	0.04	0.03	1.00	17.0	---	0.75(a)	---	---
Ferritic stainless steels										
405	0.08	1.0	0.04	0.03	1.00	13.0	---	---	---	0.1-0.3 Al
430	0.12	1.0	0.04	0.03	1.00	17.0	---	---	---	---
430F	0.12	1.25	0.06	(f)	1.00	17.0	---	0.6(g)	---	---
442	0.20	1.0	0.04	0.03	1.00	20.5	---	---	---	---
446	0.20	1.5	0.04	0.03	1.00	25.0	---	---	---	0.25 N max
Precipitation-hardening stainless steels										
17-7 PH	0.07	0.70	0.02	0.01	0.40	17.0	7.0	---	---	1.15 Al
PH 15-7Mo	0.07	0.70	0.02	0.01	0.40	15.0	7.0	2.25	---	1.15 Al
17-4 PH	0.07	1.00	0.04	0.03	1.00	17.0	4.0	---	4.0	0.03 Nb
Custom 450	0.05	1.00	0.03	0.03	1.00	15.0	6.0	0.75	1.5	Nb, 8 × C min
Custom 455	0.05	0.50	0.04	0.03	0.50	12.0	8.5	0.20	2.0	1.1 Ti, 0.30 Nb
15Cr-5Ni	0.07	1.00	0.04	0.03	1.00	15.0	5.0	---	3.5	0.30 Nb
PH 13-8	0.05	0.20	0.01	0.008	0.10	13.0	8.0	2.25	---	1.1 Al, 0.01 N

نام گذاری فولادهای زنگ نزن

❖ در ایالات متحده، فولادهای زنگ نزن کارشده، معمولاً با سیستم نام گذاری انجمن آهن و فولاد آمریکا (AISI) و سیستم نام گذاری واحد (UNS) نام گذاری می شوند. از بین دو سیستم AISI و UNS، سیستم AISI قدیمی تر است و بیشتر استفاده می شود.

❖ در این سیستم نام گذاری، نام اکثر گریدهای فولاد زنگ نزن از سه رقم تشکیل شده است. سری های 200 و 300 معمولاً فولادهای زنگ نزن آستنیتی هستند، درحالیکه سری های 400 یا فریتی هستند یا مارتنزیتی. برخی از گریدها در این سیستم نام گذاری، دارای یک یا دو حرف پسوند هستند که نشاندهنده اصلاحات خاص انجام گرفته روی ترکیب آنهاست.

چرا فولاد زنگ نزن، زنگ می زند؟

بسیاری از فولادهای حاوی 12%wt Cr یا حتی بیشتر Cr، هنگامی که در معرض شرایط محیطی قرار می گیرند، زنگ می زنند. علت این امر آن است که مقداری از Cr بصورت کاربیدها یا سایر ترکیبات درآمده و مقدار کرم زمینه را تا حدی که تشکیل یک لایه پیوسته اکسید محافظ می دهد، پایین می آورد.

اثرات کلی عناصر آلیاژی اصلی

کرم: کرم یکی از عناصر اصلی، در تشکیل لایه محافظ است. عناصر دیگر می توانند تأثیر کرم را در تشکیل این لایه کم یا زیاد کنند؛ اما هیچ کدام به تنهایی نمی توانند خاصیت زنگ نزن بودن را در تأمین کنند. مشاهده شده است که لایه محافظ در مقدار کرم حدود 10.5% تشکیل می شود. اما از لحاظ ترکیب بسیار ضعیف است و تنها در اتمسفر ساده خاصیت حفاظتی دارد.

نیکل: حضور نیکل در مقادیر کافی، ساختار آستنیت را پایدار می کند؛ این امر باعث بهبود خواص مکانیکی و خصوصیت ساخت می شود. نیکل در ترمیم لایه محافظ، خصوصاً در اتمسفر احیایی نقش بسیار مهمی دارد. خصوصاً در ایجاد مقاومت به خوردگی توسط اسیدهای معدنی بسیار کارآمد است.

منگنز: منگنز در مقادیر متوسط، به همراه نیکل، بسیاری از کارهایی را که به نیکل نسبت داده می شود، انجام می دهد؛ هرچند جایگزینی کامل نیکل با منگنز عملی نیست. فولادهایی با منگنز بسیار زیاد، خواص مکانیکی غیرعادی و مفیدی مانند مقاومت به سایش دارند.

مولیبدن: مولیبدن در ترکیب با کرم در پایداری لایه محافظ در حضور کلریدها، تأثیر مهمی دارد. حضور مولیبدن در افزایش مقاومت به شروع خوردگی حفره ای و خوردگی شکافی نیز بسیار مهم است.

کربن: افزایش مقدار کربن باعث افزایش سختی پذیری فولادها توسط عملیات حرارتی می شود که اساس فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی است. ضمن اینکه افزایش مقدار کربن، استحکام کافی را برای کاربردهای دما بالا تأمین می کند.

نیتروژن: حضور نیتروژن در فولادهای زنگ نزن آستنیتی بسیار مفید است؛ زیرا مقاومت به خوردگی را افزایش می دهد، سرعت تشکیل فاز σ (کرم-مولیبدن) را کند می کند و به فولاد استحکام می بخشد.

کاربردها

- فولادهای زنگ نزن در طیف وسیعی از کاربردها استفاده می شوند.
- بیشترین کاربرد آنها در صنایع شیمیایی و مهندسی انرژی است.
- از این کاربردها می توان به استفاده در مخازن راکتورهای هسته ای، مبدل‌های حرارتی، لوله های صنایع نفتی، اجزاء مورد استفاده در فرایندهای شیمیایی، صنایع کاغذ و اجزاء کوره و بویلرهای مصرفی در ماشینهای تولید کننده انرژی الکتریکی از سوخت فسیلی اشاره کرد.

فصل دوم

فولادهای زنگ نزن آستنیتی

فولادهای زنگ نزن آستنیتی

معرفی و خصوصیات

- این فولادها شامل 16-25 درصد کروم و ۷ تا ۲۵ درصد نیکل که برای پایداریتر نمودن زمینه آستنیتی به آنها عناصری مانند منگنز و یا نیتروژن می افزایند.
- شبکه FCC.
- اثر مضر کربن و نیتروژن در فریت، با تغییر ساختار کریستالی آستنیت (FCC) می تواند از بین برود. بدلیل داشتن این شبکه در دمای محیط، غیرمغناطیس است.
- استحکام تسلیم پایین.
- نقطه ضعف اساسی این فولادها در دماهای بالاتر از محیط است. چون در دمای 450°C تا 850°C در مرزخانه های آستنیت، رسوبات کاربید کرم تشکیل می شود و مناطق اطراف این کاربیدها از کرم خالی می شود که سبب کاهش مقاومت به خوردگی می گردد که می بایست با کاهش درصد کربن به مقادیر کمتر از 0.03% و افزودن عناصری مانند Ti و Nb مشکل را حل کرد.
- سرعت کرنش سختی بالا.
- قابلیت پذیرش عملیات جوشکاری

- تافنس عالی.
- مقاومت به خوردگی مناسب.
- مقدار کربن در این فولادها اندک است.
- به همین دلیل بهای تولید آنها نسبتاً بالاست.
- قابلیت پذیرش عملیات حرارتی را نداشته و صرفاً توسط عناصر آلیاژی (بصورت محلول جامد) و یا توسط کارسختی می توان به آنها استحکام بیشتری بخشید.
- محدودیت دیگر آنها گرانی و مقاومت کم به خوردگی تنشی.

محدوده ترکیب شیمیایی

- ❖ 16-25%wt کرم
- ❖ 8-20%wt نیکل
- ❖ 1-2%wt منگنز
- ❖ 0.5-3%wt سیلیسیم
- ❖ 0.02-0.08%wt کربن (<0.04%wt نشاندهنده شاخه های L می باشند)
- ❖ 0-2%wt مولیبدن
- ❖ 0-0.15%wt نیتروژن
- ❖ 0-0.2%wt تیتانیم و نیوبیوم

انواع گریدهای فولادهای زنگ نزن آستنیتی

۱. آلیاژهای سری 300 (Fe-Cr-Ni)

۲. آلیاژهای سری 200 (Fe-Cr-Mn-Ni)

پسوندها:

۱. L: نشاندهنده تغییرات کم کربن با یک مقدار کربن اسمی حدود 0.03%wt.

۲. H: نشاندهنده مقادیر کربن نزدیک به 0.1%wt.

۳. N: نشاندهنده مقداری نیتروژن حداکثر تا 0.2%wt.

پرمصرفترین این آلیاژها، انواع 304، 316، 321 و 347 بوده و تغییرات آنها از نوع 8-18 یا مقادیر اسمی 18Cr و 8-10Ni می باشند.

جدول (۱-۲). ترکیب شیمیایی انواع گریدهای فولاد زنگ نزن

Type	UNS Number	Composition, wt. % ^a							
		C	Mn	Si	Cr	Ni ^b	P	S	Other
201	S20100	0.15	5.5-7.5	1.00	16.0-18.0	3.5-5.5	0.06	0.03	0.25 N
202	S20200	0.15	7.5-10.0	1.00	17.0-19.0	4.0-6.0	0.06	0.03	0.25 N
301	S30100	0.15	2.00	1.00	16.0-18.0	6.0-8.0	0.045	0.03	—
302	S30200	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03	—
302B	S30215	0.15	2.00	2.0-3.0	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03	—
303	S30300	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.20	0.15 min.	0-0.6 Mo
303Se	S30323	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.20	0.06	0.15 Se min.
304	S30400	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	—
304H	S30409	0.04-0.10	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-11.0	0.045	0.03	—
304L	S30403	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-12.0	0.045	0.03	—
304LN	S30453	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-12.0	0.045	0.03	0.10-0.16 N
304N	S30451	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	0.10-0.16 N
305	S30500	0.12	2.00	1.00	17.0-19.0	10.0-13.0	0.045	0.03	—
308	S30800	0.08	2.00	1.00	19.0-21.0	10.0-12.0	0.045	0.03	—
309	S30900	0.20	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03	—
309S	S30908	0.08	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03	—
310	S31000	0.25	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	—
310S	S31008	0.08	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	—
314	S31400	0.25	2.00	1.5-3.0	23.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	—
316	S31600	0.08	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo
316H	S31609	0.04-0.10	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.040	0.03	2.0-3.0 Mo
316L	S31603	0.03	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo
317	S31700	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	0.045	0.03	3.0-4.0 Mo
317L	S31703	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	0.045	0.03	3.0-4.0 Mo
321	S32100	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-12.0	0.045	0.03	5 x %C Ti min
329	S32900	0.08	1.00	0.75	23.0-28.0	2.5-5.0	0.045	0.03	1.0-2.0 Mo
330	N08330	0.08	2.00	0.75-1.5	17.0-20.0	34.0-37.0	0.04	0.03	—
347	S34700	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	Note c
348	S34800	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	0.20 Co ^{c,d}
384	S38400	0.08	2.00	1.00	15.0-17.0	17.0-19.0	0.045	0.03	—

فصل سوم

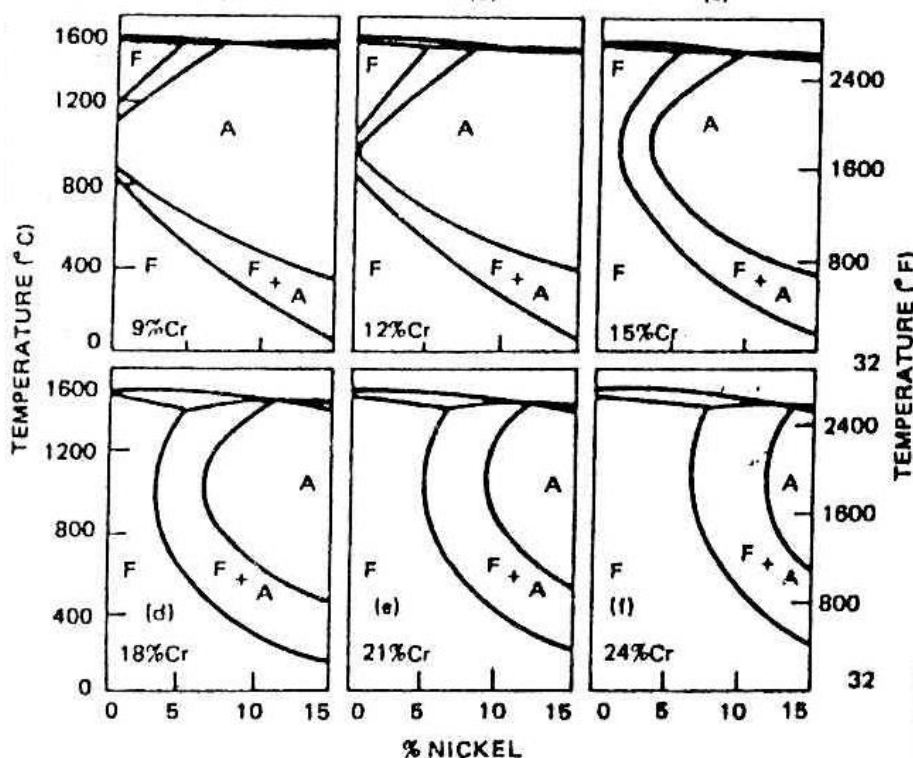
بررسی انجماد جهتدار فولادهای زنگ

نزن آستنیتی

انجماد جهتدار فولادهای زنگ نزن آستنیتی

نمونه ها به منظور بررسی مد انجماد، جدایش عناصر آلیاژی و تغییر ریزساختاری بصورت جهتدار منجمد می شوند. در آزمایشات انجماد جهتدار امکان بررسی شدت توزیع عناصر آلیاژی و تغییرات مورفولوژی را می دهد، زیرا در فرایندهای انجماد جهتدار کنترل جهت خروج حرارت، سرعت انجماد و گرادیان دمایی امکان پذیر است. انجماد جهتدار بعنوان یک روش مؤثر برای مطالعه تغییر ریزساختار ضمن انجماد مهم است. رشد جهتدار می تواند وابسته به کنترل هر دو پارامتر، سرعت فصل مشترک و گرادیان دمایی باشد، و بنابراین امکان مقایسه مستقیم اثرات آنها روی محصول استحاله رامی دهد.

- دیاگرام سه تایی آهن-کروم-نیکل، به عنوان سه جزء اصلی در فولادهای زنگ نزن آستنیتی، بیانگر چگونگی شرایط انجماد تعادلی در این سیستم سه تایی است.
- با توجه به درصد عناصر آلیاژی در چنین فولادهایی و نیز طبق دیاگرام تعادلی، فولادهای زنگ نزن آستنیتی پس از انجماد دارای زمینه ای آستنیتی، فریتی و یا آستنیتی-فریتی بوده که در دمایی محیط تمامی زمینه تبدیل به فریت می گردد.



شکل (۱-۳). دیاگرام سه تایی آهن-کرم-نیکل

- البته عدم وجود شرایط تعادلی انجماد یا بعبارتی سرعت تبرید زیاد، در فرایندهای مختلف مانند ریخته گری، شمش ریزی و جوشکاری مزیتی است که بواسطه آن در دمای محیط، زمینه این فولادها آستنیتی می شود.
- دو عامل دیگر نیز که منجر به تغییر در چگونگی انجماد چنین فولادهایی می شود، عبارتند از:

۱. عناصر آلیاژی دیگر و ناخالصیهای موجود در فولاد.

۲. سرعت نفوذ محدود هر عنصر آلیاژی در فازهای مختلف.

حالت‌های انجماد

تحت چنین شرایطی، استفاده از دیاگرامهای تعادلی، برای پیش بینی انجماد چنین فولادهایی مناسب نبوده و نیاز است تا توسط روشهای مختلف و مناسب، فرایند انجماد را مرحله به مرحله دنبال نمود.

مدهای انجماد فولادهای زنگ نزن آستنیتی با دو پارامتر کنترل می شود:

۱. انجماد فاز اولیه

۲. استحاله حالت جامد

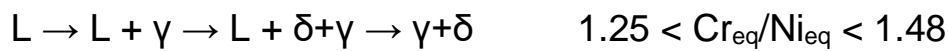
براساس و طبق نتایج تحقیقات برخی از محققان، نحوه انجماد فولادهای زنگ نزن آستنیتی،
باتوجه به تغییر شرایط ترکیبی و تبریدی، به ۴ گروه عمده تقسیم بندی می گردد:

A mode:



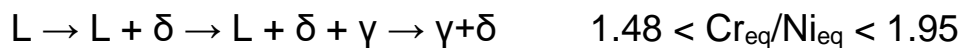
انجماد تکفازی آستنیتی: مذاب صرفاً تبدیل به آستنیت شده و در دماهای بالا هیچ استحاله دیگری
صورت نمی گیرد و ساختار کریستالی FCC می باشد.

AF mode:



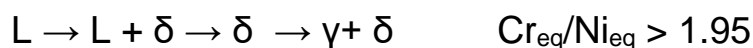
انجماد دو فازی آستنیتی-فریتی: فاز رسوبی اولیه آستنیت بوده، سپس ترکیب مذاب غنی از عناصر
پایدارکننده فریت شده و قبل از تکمیل انجماد مابقی مذاب در مرزهای دندریت تبدیل به
فریت (فریت سلولی) می گردد.

FA mode:



انجماد دو فازی فریتی-آستنیتی: فریت، فاز رسوبی اولیه از مذاب بوده (فریت اسکلتی) و بواسطه
واکنش پریتکتیکی و یا یوتکتیکی میان سه فاز مذاب، فریت و آستنیت، فاز آستنیت در لابلای
دندریتهای فریت رسوب نموده و در ادامه انجماد، آستنیت موجود ضمن پیشروی در مذاب، به
داخل دلتا فریت نیز رشد می نماید بنحویکه کاهش شدیدی در درصد حجمی دلتا فریت حاصل
خواهد شد. البته در اثر بروز جدایش عناصر آلیاژی فریت زا، همواره مقادیری کم از فریت در آخرین
مراحل انجمادی در لابلای دندریتها باقی خواهند ماند.

F mode:



انجماد تکفازی فریتی: فریت تنها فاز در حین انجماد بوده و پس از اتمام انجماد، آستنیت بطور ترجیحی در مرزدانه ها جوانه زده و توسط مکانیزم ویدمن اشتاتن در داخل فریت رشد می نماید. در این حالت ساختار دندریتی به آسانی قابل مشاهده نیست.

در استحاله های توصیف شده در بالا، تشکیل فریت و آستنیت از مذاب بستگی به ضرایب جدایش مختلف عناصر آلیاژی، K، از Cr و Ni دارد.

دو اشکال در تفکیک دقیق میان گونه های مختلف انجمادی:

۱. در انجماد مد A بواسطه بروز جدایش و سگرگاسیون، تا حدودی فریت دلتا تشکیل می گردد.

۲. گاهی دو نوع انجماد مد AF و FA در کنار یکدیگر و بطور همزمان بوقوع می پیوندند.

Ni معادل و Cr معادل

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C + 30 \times \%N + 0.5 \times \%Mn$$

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb$$

مفهوم میزان نیکل معادل و کرم معادل :

راهی معمول برای نشان دادن اثر چندین عنصر روی پایه ساختار کریستالی فولاد زنگ نزن آستنیتی.

مراحل انجماد برای فولاد AISI 304

باتوجه به معادلات بالا C_{req} محاسبه شده: $18.77wt\%$ و $Nieq$ محاسبه شده $10.59wt\%$ و در نتیجه نسبت $C_{req}/Nieq$ برای فولاد زنگ نزن AISI 304 تست شده، 1.77 می باشد. بنابراین، حالت انجماد این فولاد می تواند، حالت FA باشد که شامل مراحل زیر می باشد:

۱. رسوب دندریتهای فریت اولیه

۲. واکنش یوتکتیک فریت-آستنیت

۳. تشکیل مستقیم آستنیت

بررسی ریزساختارهای مختلف

طبق دیاگرام سه فاز $Fe-Cr-Ni$ ، یک ناحیه واکنش سه فاز برای ترکیبات کرم و نیکل بیشتر از $15wt\%$ کرم و $10wt\%$ نیکل وجود دارد.

۱. انجماد آلیاژهای فلزی، معمولاً یک مورفولوژی دندریتی را نتیجه می دهد که شامل بازوهای اولیه، ثانویه، ثالثیه و مراتب بالاتر می باشد، در نتیجه سیستم کمپلکسی که بازوهای دندریتی شامل فازهای ثانویه و ذرات رسوب شده است.
۲. رشد دندریت در انجماد آلیاژهای فلزی خیلی مهم است و روی ویژگی هایی از قبیل جدایش میکرو و ماکرو و توزیع تخلخل و خواص مکانیکی محصول نهایی تأثیر می گذارد.

۳. در فولادهای آستنیتی، ساختار دندریتی بستگی به حالت انجماد دارد. فرایند انجماد در اطراف یک بازوی دندریتی بستگی به جدایش عنصر آلیاژی در فاز مایع در حال جامد و پدیده نفوذ در داخل جامد دارد.

۴. زمینه اصلی در فولادهای زنگ نزن آستنیتی، فاز آستنیت است که مقادیر جزئی فاز فریت دلتا نیز در کنار آن وجود دارد.

۵. فاز فریت دلتا بواسطه سگرسایون کرم موجود به داخل مذاب پس ماند و یا جامد موجود در زمینه فولاد و در لابلای دندریت های آستنیتی رسوب کرده و تا دمای محیط پایدار می ماند.

عوامل مؤثر بر ریزساختارهای مختلف

ریزساختار منجمدشده فولادهای زنگ نزن آستنیتی شامل ساختارهای ترکیبی متنوعی از فریت-آستنیت می باشد. این ساختار ترکیبی نتیجه رفتار انجماد و استحاله حالت جامد متوالی است که با ترکیب و سرعت رشد کنترل می گردد. این ساختار ترکیبی متأثر از عوامل زیر می باشد:

۱. رفتار انجماد

۲. بالانس ترکیبی بین عناصر پایدارکننده آستنیت و فریت

۳. پارامترهای حرارتی از قبیل سرعت سرد کردن، سرعت رشد و گرادیان دمایی.

ساختارهایی که در اینجا مورد بررسی قرار می گیرند:

شرایط انجماد:

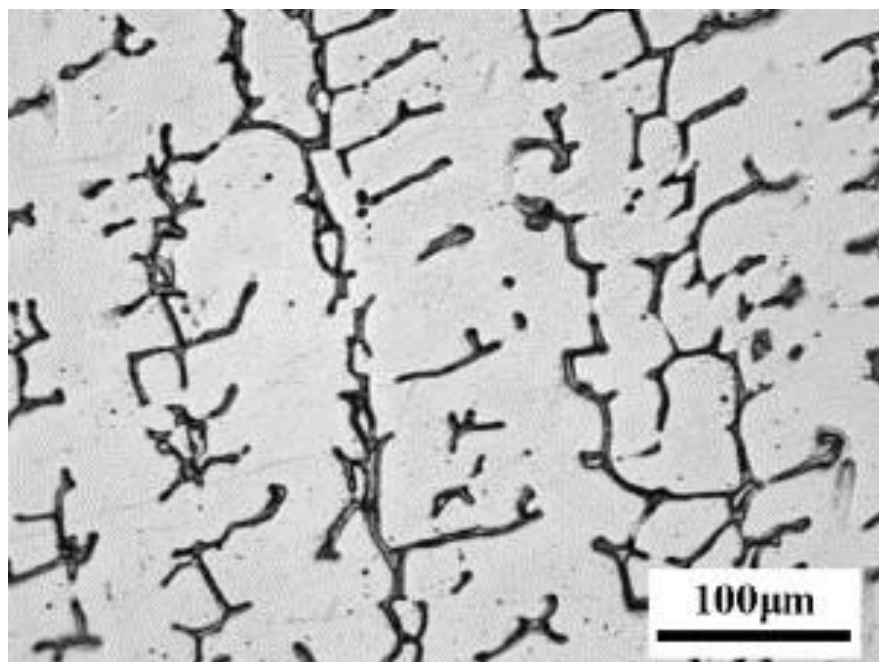
انجماد جهتدار فولاد زنگ نزن AISI 304 با ترکیب زیر در یک اتمسفر گاز آرگون

با گرادیان دمایی: 20K/mm و

سرعتهای withdraw: 166.7 μ m/S

Element	Cr	Ni	Mn	Si	C	P	S	Fe
Wt%	17.93	8.76	0.77	0.56	0.048	0.031	0.013	balabce

ریزساختار منجمد شده



شکل (۲-۳). مورفولوژی فریت دلتا در فولاد زنگ نزن AISI 304 منجمد شده بصورت جهتدار

ریزساختارهای کوینج شده

برای حفظ ریزساختار منجمد شده در دمای اتاق جهت مشاهده، روش کوینج ضمن انجماد جهتدار فولاد مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل، تصاویر SEM ریزساختارهای کوینج شده فولاد زنگ نزن AISI ۳۰۴ که براساس ترکیب شیمیایی آن مد انجماد FA می باشد، در مراحل مختلف نشان داده شده است که شامل مراحل زیر می باشد:

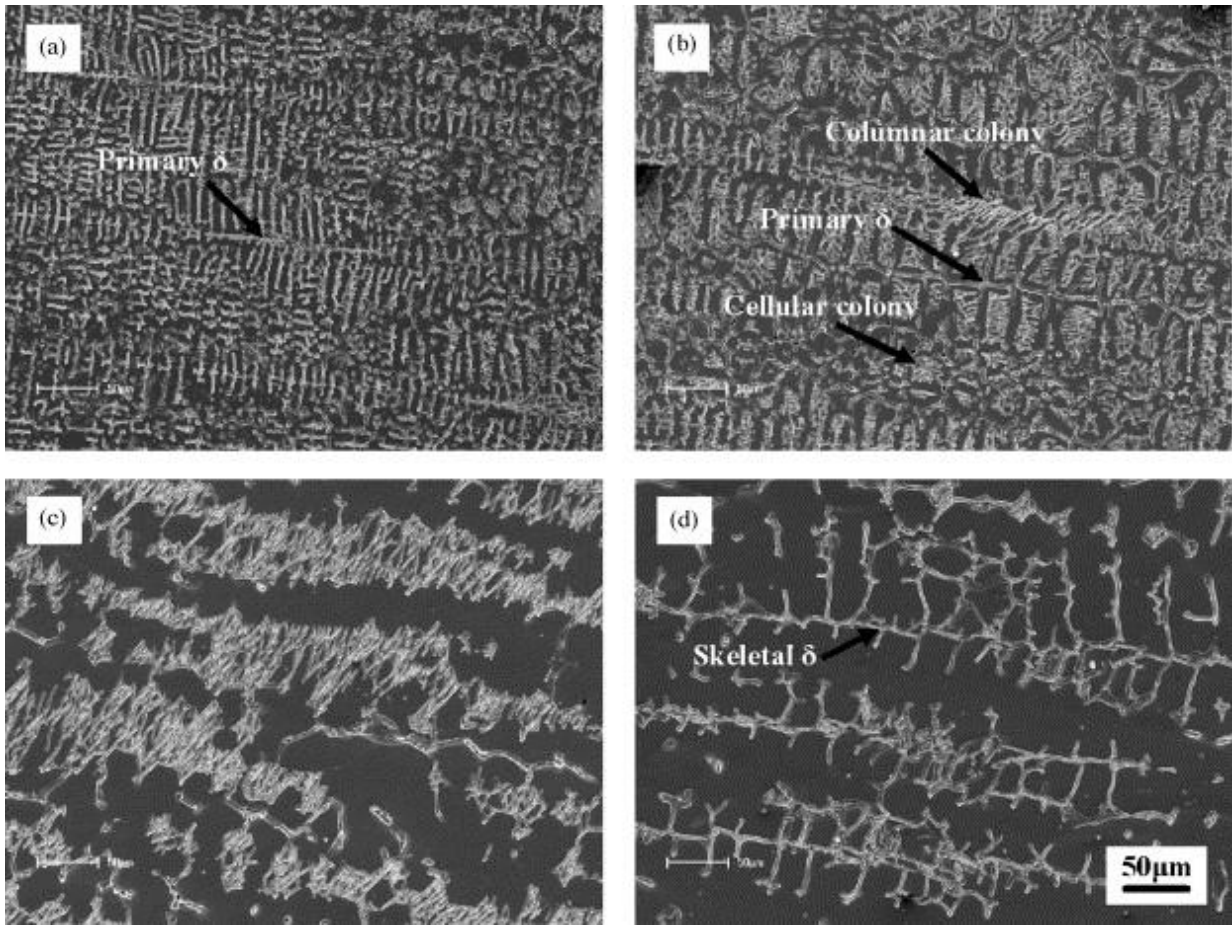
(a) مرحله رسوب فریت اولیه

(b) مرحله واکنش سه فازی

(c) مرحله استحاله حالت جامد

(d) مرحله نهایی

در مرحله واکنش یوتکتیک، کلونی های ستونی و سلولی یوتکتیک از رشد جفتهای فریت و آستنیت لایه ای تشکیل شده اند. حین مرحله استحاله حالت جامد، آستنیت بتدریج به داخل فریت رشد کرده، در نتیجه کلونی های یوتکتیک محوشده و دندریتهای اولیه باریک شده و هسته های دندریت فریت اولیه بعنوان فریت اسکلتی نهایی در ریزساختار نهایی باقی می ماند.



شکل (۳-۳).

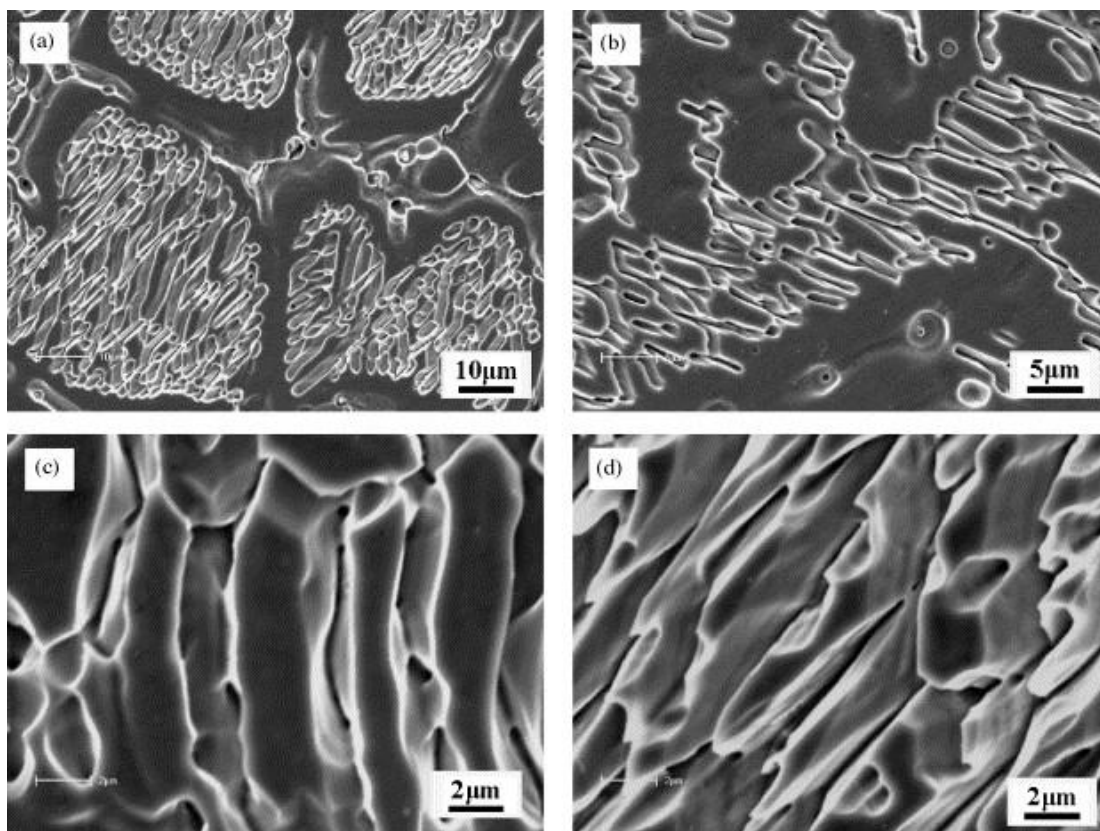
طبق ریزساختارهای کویچ شده در شکل (۳-۳)، فرایند انجماد جهتدار فولاد زنگ نزن تست شده می تواند به ۴ مرحله تقسیم شده است:

2a) در مرحله اول، رسوب دندریتهای فریت اولیه مستقیماً از مذاب؛

2b) کلونی های یوتکتیک سلولی و ستونی از میان دندریتهای فریت اولیه در مرحله واکنش سه فاز؛

2c) با ادامه انجماد، برخی کلونی های یوتکتیک بتدریج محو می شود چون استتال $\delta \rightarrow \gamma$ در مرحله تحول حالت جامد؛

2d) و بالاخره تقریباً همه کلونی‌ها از بین رفته و فقط فریت اسکلتی در ریزساختار نهایی باقی می‌ماند.

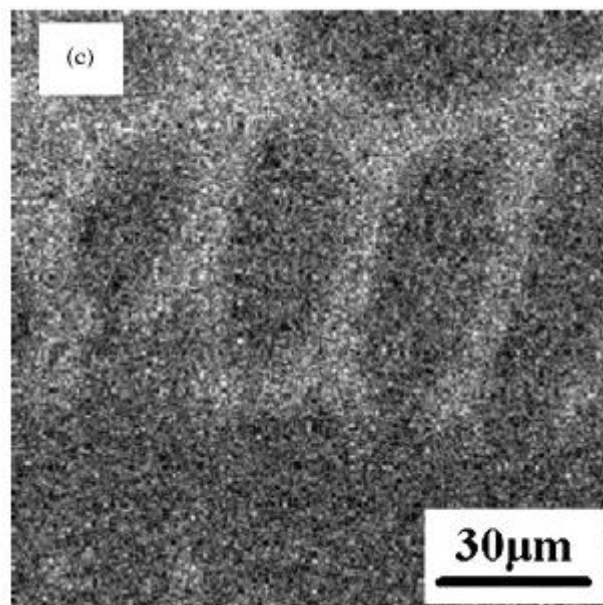
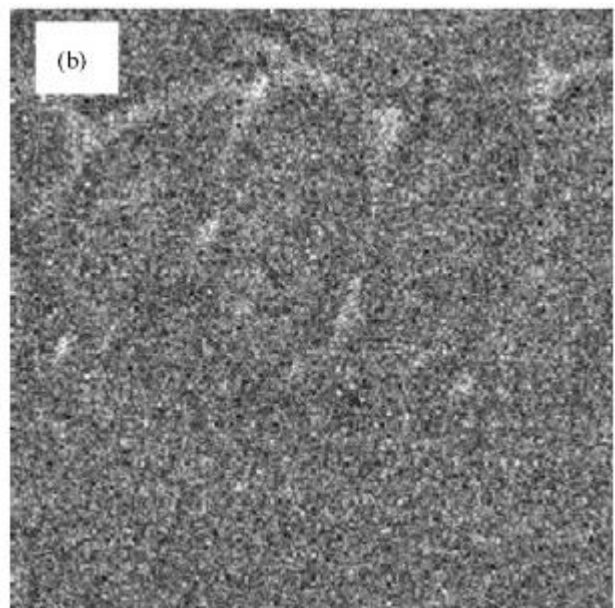
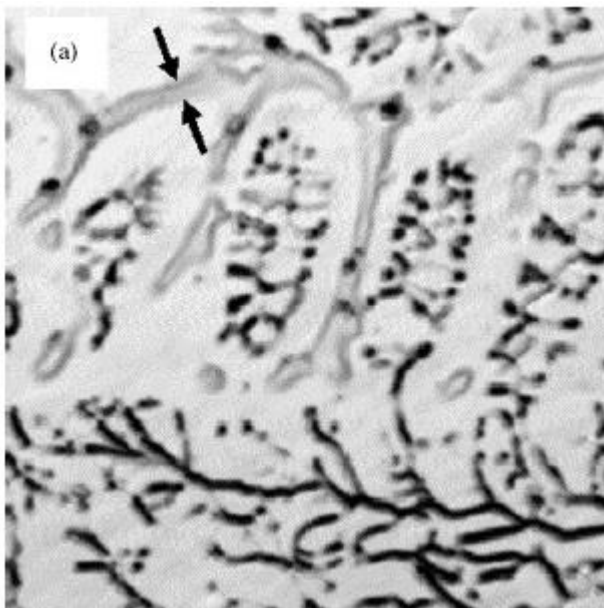


شکل (۳-۴). تصاویر SEM کلونی‌های یوتکتیک. (a) کلونی‌های ستونی؛ (b) کلونی‌های سلولی؛ (c) تصویر

بزرگنمایی شده (a)؛ و (d) تصویر بزرگنمایی شده (b)

اشکال بالا، کلونی‌ها یوتکتیک سلولی و ستونی بزرگ شده را نشان می‌دهد. این می‌تواند فریت پیوسته به هم با آستنیت اطراف شامل کلونی‌های سلولی و ستونی باشد (a و b). تصاویر سه بعدی SEM فریت دلتا در کلونی‌های سلولی و ستونی در اشکال C و D نشان داده شده است.

جزئیات بیشتر در مرحله نهایی واکنش سه فازی می تواند از پروفیل غلظت Cr و Ni نشان داده شده تحت واکنش سه فازی، بدست می آید. در شکل زیر، آخرین ناحیه مایع منجمد شده بین فریت اولیه و کلونی های یوتکتیک غنی از Cr و Ni است که بداخل آستنیت در انتهای انجماد منجمد شده است.



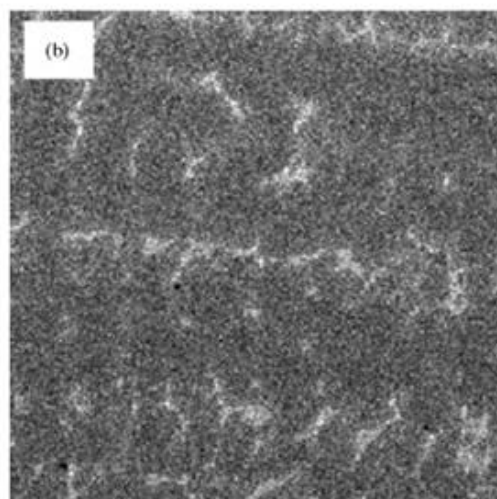
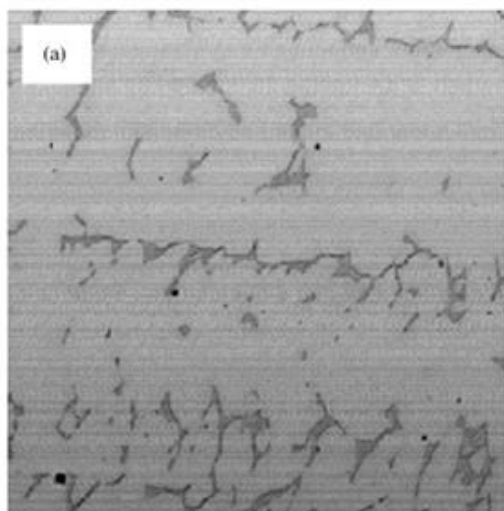
شکل (۵-۳). پروفیل غلظت Cr و Ni در مرحله واکنش سه فازی.

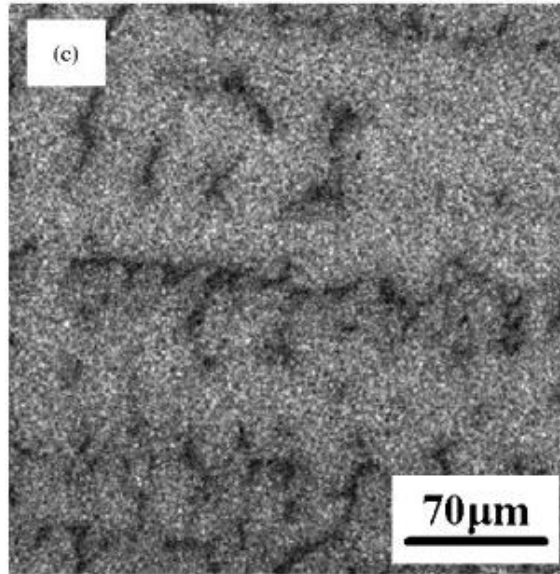
(a) تصویر Backscattered؛

(b) پروفیل غلظت Cr؛

(c) پروفیل غلظت Ni.

استحاله حالت جامد یک نقش مهم در تغییر ریزساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی، بازی می کند. براساس تغییر ریزساختاری ضمن انجماد جهتدار، استحاله از فریت به آستنیت یک فرایند تدریجی برای فولاد زنگ نزن می باشد که بوسیله نفوذ عنصر در این فولاد کنترل می شود. از آنجاییکه نفوذ بوسیله فرایند سرد کردن محدود شده است، تحول از فریت به آستنیت ناکامل می باشد. بنابراین، لایه نازکتر فریت حین فرایند سرد کردن بعد از انجماد به آستنیت تغییر کرده، در حالیکه دندریتهای اولیه ضخیم تر نمی تواند بطور کامل به حل نشده و هسته های دندریت غنی از Cr و فقیر Ni، بعنوان فریت اسکلتی در ریزساختار نهایی باقی می ماند.





شکل (۶-۳). پروفیل غلظت Cr و Ni در مرحله نهایی. (a) تصویر Backscatter شده؛ (b) پروفیل غلظت C؛Cr) پروفیل غلظت Ni.

انواع جدایش

۱. جدایش ماکروسکوپی (بین دندریتها)
۲. جدایش ماکروسکوپی (درون دندریتها)

جدایش ماکروسکوپی

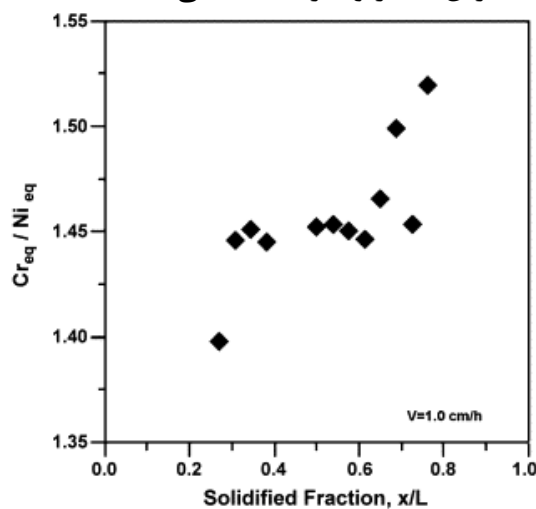
➤ سطح جدایش عنصر آلیاژی روی تشکیل آستنیت و فریت تأثیر گذاشته در واقع از طریق مقدار معادل Cr و Ni، اثر چندین عنصر روی اساس ساختار کریستالی فولادهای زنگ نزن آستنیتی مطرح می شود.

➤ اثر عناصر آلیاژساز روی ریزساختار انجماد می تواند به دو گروه تقسیم بندی شود:
 پایدارکننده های δ و γ Cr ← مؤثرترین پایدارکننده فاز bcc فریت و Ni ←
 مؤثرترین پایدارکننده فاز fcc آستنیت.

➤ علاوه بر Cr و Ni، عناصر دیگری نیز در فولادهای زنگ نزن وجود دارد که روی تعادل فریت و آستنیت تأثیر دارند که عبارتند از: Mo, Al, Nb, Ti, W, V, Co, N, Cu, C, Mn و Si.

➤ در مورد فولاد AISI 316 در حالتی که مد انجماد A است، اکثر عناصر آلیاژساز در این فولاد، ضریب جدایش کمتر از یک را نشان می دهند. در این مورد، فاز اولیه آستنیت است و قسمت مرکزی بازوهای دندریتی فقیر از محلول (عناصر آلیاژی) می باشد چون جدایش عناصر آلیاژی در مذاب را داریم. این جدایش عناصر آلیاژی منجر به تغییر مد انجماد از A به AF می شود.

توزیع عنصر آلیاژی در نمونه با انجماد جهتدار تغییر داده می شود و منجر به تغییر کمی در نسبت Cr_{eq}/Ni_{eq} می شود که این حالت در شکل نشان داده شده است.
 نتایج نشان می دهد که نسبت Cr_{eq}/Ni_{eq} در قسمت اولیه نمونه حداقل و تقریباً 1.4 و در قسمت انتهایی نمونه بیشترین مقدار و تقریباً 1.5 می باشد.



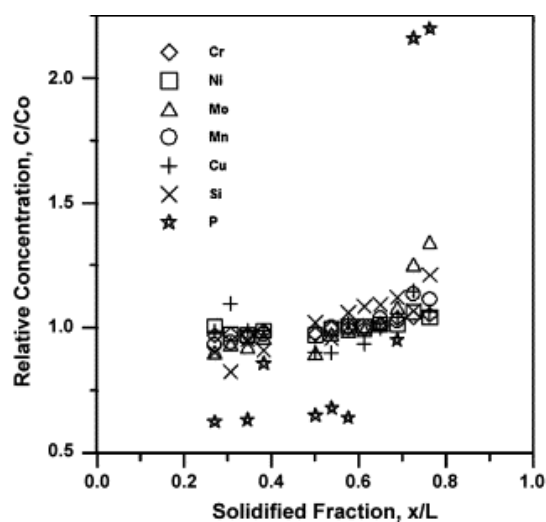
شکل (۳-۷). تغییر نسبت Ni_{eq}/Cr_{eq} در امتداد نمونه منجمد شده بصورت جهتدار در $V=1.0 \text{ cm/h}$

جدایش عناصر آلیاژی باعث تشکیل کاربید کرم و مولیبدن به فرم ساختار یوتکتیکی شده که منجر به انحطاط رشد صفحه ای شده و رشد سلولی و به دنبال آن رشد دندریتی را خواهیم داشت.

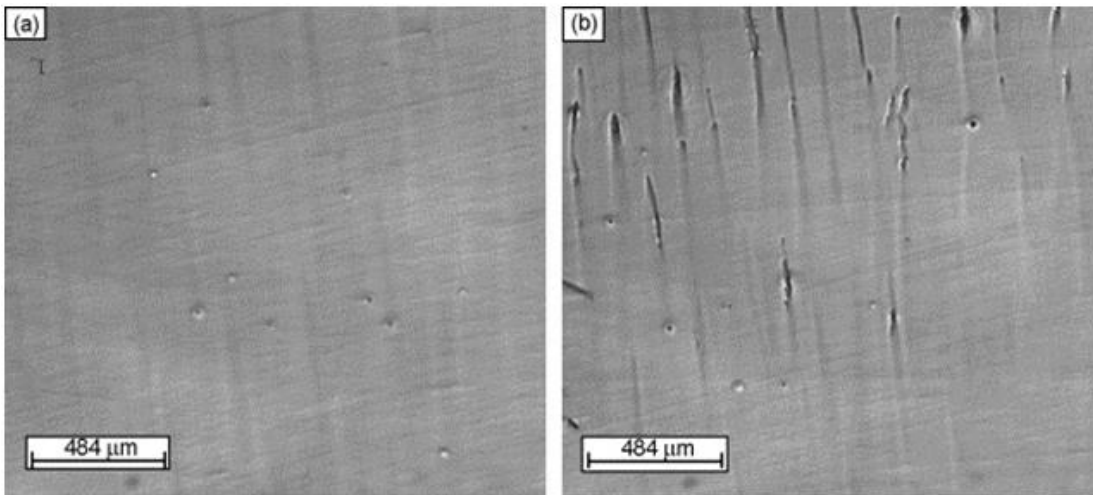
در شکل، تغییر ریزساختاری نمونه منجمد شده نشان داده شده است، جایکه $f_s=X/L$ ، X موقعیت روی نمونه و L طول نمونه است.

با ادامه فرایند، جدایش عناصر آلیاژی باعث می شود که قسمت باقیمانده نمونه غنی از محلول شود. بررسی پروفیل محلول نتیجه می دهد که ضریب جدایش عناصر در این نمونه

کمتر از یک است.

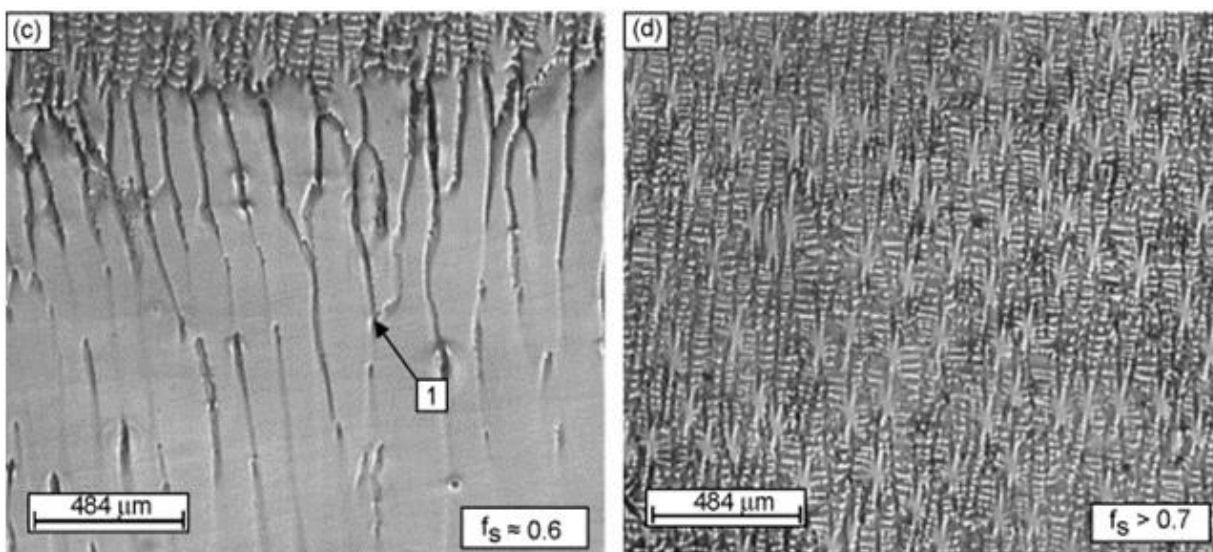


شکل (۳-۸). پروفیل توزیع عناصر آلیاژی بعد از انجماد جهتدار در $V=1.0 \text{ cm/h}$



رشد آستنیت نشاندهنده فصل مشترک مایع/جامد صفحه ای

رشد سلولی



انتقال سلولی/دندریتی

رشد دندریتی

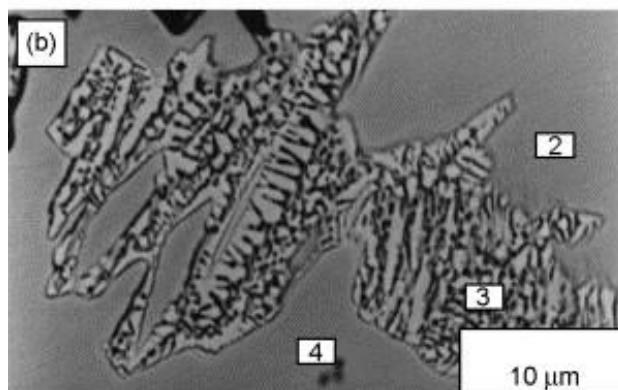
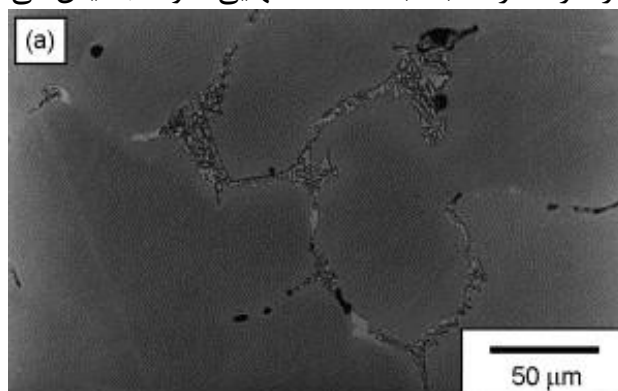
شکل (۳-۹)

جدایش کربن

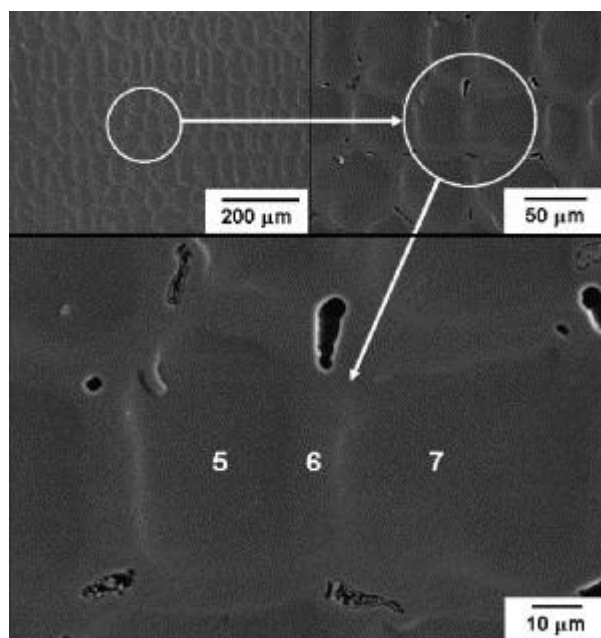
زمانی که انجماد جهتدار اتفاق می افتد کربن درون مایع جدایش نموده و نهایتاً زمانی که مقدار آن به سطح مشخصی برسد، کاربیدها به شکل ساختار یوتکتیکی رسوب می کنند. (در شکل نشان داده شده است).

عناصر آلیاژی که با سرد کردن ماده جامد پس زده شده اند، بطور چشمگیری، ترکیب مایع را افزایش داده تا اینکه باعث ایجاد فوق انجماد ترکیبی می شود. بنابراین، فصل مشترک صاف اولیه مایع/جامد ناپایدار شده و رو به انحطاط می گذارد. مقدار عناصر کابیدزا بطور قابل توجهی از مقدار میانگین در آستنیت، بیشتر است.

سرعت‌های رشد بالاتر مانع جدایش عناصر آلیاژی می شود؛ زیرا زمان کمتری در دسترس است تا اتم‌های جدایش کرده به موقعیتی دور از فصل مشترک مایع/جامد مهاجرت کنند. مثلاً سرعت رشد 5 cm/h ، تقریباً توزیع عناصر آلیاژی را برطرف می کنند. (فسفر استثنای است و حتی در سرعت رشد بالا به قسمت انتهایی نمونه جدایش می کنند).



شکل (۳-۱۰). بزرگنمایی موقعیت ۱ در شکل قبل: (a) کابیده‌های Mo و Cr تشکیل شده در یوتکتیک؛ (b) بزرگنمایی شکل (a) که نواحی خاصی که ترکیبات آنها بوسیله EDS مشخص شده است.



شکل (۳-۱۱). ریزساختار دندریتی منجمد شده بصورت جهت‌دار ($f_s \approx 0.7$) در سرعت رشد 1.0 cm/h (موقعیتهای 5 و 7 هسته‌های بازوی دندریتی، درحالی‌که موقعیت 6 یک ناحیه بین دندریتی را نشان می‌دهد).

جدول (۱-۳). ترکیبات بدست آمده در موقعیتهای نزدیک انتقال صفحه ای/سلولی و در ریزساختار دندریتی

(موقعیتهای ۲ تا ۷ در اشکال قبلی)

Position	Cr	Ni	Mo	Mn	Cu	Si	P
2	17.7	11.3	2.0	3.1	1.3	0.4	0.0
3	30.9	6.0	8.1	4.0	1.0	0.8	0.3
4	18.8	12.1	1.6	3.4	0.9	0.5	0.0
5	16.8	12.7	1.2	1.8	0.6	0.6	0.0
6	18.9	13.3	2.1	2.2	0.9	0.9	0.0
7	16.8	12.4	1.2	1.8	0.8	0.6	0.0

جدایش میکروسکوپی

در هنگام بررسی فرایند ریخته گری و جوشکاری، معمولترین مورفولوژی دندریتی است و رشد هر بازوی منحصربفرد شامل جدایش عناصر آلیاژی می باشد(دقیقاً شبیه فرایند انجماد جهتدار، اگرچه در رنج میکروسکوپی). برای ارزیابی توزیع اجزاء محلول در حالت میکروسکوپی، ترکیبات اطراف بازوی دندریتی رشدیافته با سرعت $V=10 \text{ cm/h}$ آنالیز شده اند. شکل زیر ریزساختار دندریتی ($f_s \approx 0.7$) که برای آنالیز جدایش میکروسکوپی استفاده شده اند را نشان می دهد.

ریزساختار دندریتی منجمد شده به روش جهتدار ($f_s \approx 0.7$) در سرعت رشد 1.0 cm/h (موقعیتهای 5 و 7 هسته های بازوی دندریتی را نشان می دهند، درحالیکه موقعیت 6 یک ناحیه بین دندریتی را نشان می دهد).

ترکیبات شناسایی شده بطور واضح نشان می دهد که جدایش عناصر آلیاژی در حالت میکروسکوپی در طی رشد دندریتی اتفاق می افتد و عناصر آلیاژی Cr, Ni, Mo, Mn, Si, P ضریب جدایش کمتر از یک را نشان می دهند. فسفر و سیلیسیم به شدت جدایش یافته ولی مس دارای ضریب جدایش تقریباً یک می باشد. مس، مسیر پیشرفت مشخصی ندارد، در طول بازوی 5 میزان کمتری نشان می دهد، درحالیکه بازوی شماره 7 میزان Cu بیشتری نشان می دهد که این غیرمنتظره است.

ترکیبهای انجمادی

یکی از مشکلات عمده در ریخته گری فولادهای زنگ نزن آستنیتی بروز ترکیبهای انجمادی در ضمن انجماد آنها می باشد.

معمولاً این ترکیبها در آلیاژهایی با دامنه انجماد طولانی بروز می کند ولی فولادهای زنگ نزن، بغیر از

مواردی که نسبت کربن به سیلیسیم موجود کوچکتر از 0.5 باشد، دارای دامنه انجماد طولانی نبوده و بروز ترکها را می باید در جای دیگر جویا شد.

منشأ چنین ترکهایی تشکیل فیلم هایی با نقطه ذوب پایین است. این فیلم ها غنی از گوگرد و فسفر بوده و در فضای مابین مرزدانه ها رسوب نموده و در زیر حد جامد چنین فولادهایی منجمد می شوند.

حضور فاز فریت دلتا در ریزساختار چنین فولادهایی موجب کاهش تمایل به بروز ترک می گردد که علت آن را بصورت زیر توجیه نموده اند:

۱. حلالیت بالای عناصر مؤثر بر ایجاد ترک مانند: $O, Ta, P, S, Se, As, Nb, B$ در فریت دلتا نسبت به آستنیت.

۲. فولادهای حاوی فاز فریت دلتا دارای انجماد پوخته ای تری نسبت به فولادهای تکفازی (آستینیتی) می باشند.

۳. در آلیاژهای دوفازی، اندازه دانه های آستنیت تقلیل یافته و دانه های کوچکتر موجب انقطاع بیشتر در فیلم های زود ذوب می شوند.

۴. روشی برای کاهش تمایل به ترک و بهبود خواص مکانیکی در دمای بالا، استفاده از منیزیم به میزان 0.25% است که منجر به کروی شدن فیلم زود ذوب شده و تأثیر مضر آن را تقلیل می دهد.

فصل چهارم

ایجاد ساختار نانو در فولادهای زنگ

نزن آستنیتی

تولید فولاد زنگ نزن آستینی ۳۰۱ AISI فوق ریز دانه / نانو

توسط عملیات ترمومکانیکی پیشرفته

فولاد های زنگ نزن آستینی مقاومت به خوردگی و قابلیت شکل پذیری بالا اما نقطه تسلیم نسبتا پایینی دارند. خواص مکانیکی فولادهای زنگ نزن آستینی وابسته به ترکیب شیمیایی و اندازه دانه می باشد. آستنیت در فولادهای زنگ نزن بخصوص گروه ۳۰۰ به صورت نیمه پایدار می باشد و با تغییر فرم پلاستیک زیر دمای M_d ، دو نوع مارتنزیت ϵ (در کاهش ضخامت اولیه) و α' تشکیل می شود. میزان تشکیل مارتنزیت بستگی به عوامل مختلفی مانند ترکیب شیمیایی و انرژی نقص در چیده شدن، دمای تغییر فرم، کرنش، اندازه دانه اولیه، مسیر کرنش و نرخ تغییر شکل دارد.

در میان مکانیزم های استحکام دهی، ریز کردن دانه ها تنها روشی می باشد که منجر به بهبود همزمان استحکام و انعطاف پذیری می شود. چون فولاد های زنگ نزن آستینی دستخوش تغییرات فازی در دماهای آنیل معمولی نمی شوند، تنها بوسیله دو روش تبلور مجدد دینامیکی توسط عملیات نورد داغ و دیگری فرایندهای ترمودینامیکی که شامل تغییر فرم و دگرگونی فازی می باشد می توان آنها را ریز نمود. چنانچه مارتنزیت تشکیل شده ناشی از عملیات تغییر فرم در این فولادها در دمای آنیل قرار بگیرد، بازگشت مارتنزیت به آستنیت بازگشت یافته عبارتند از: چگالی بالا نابعایی ها، اثرات مورفولوژی مارتنزیت α' اولیه و داشتن مرزدانه هایی همانند آستنیت اولیه. برخی از محققان تلاش کرده اند که بلور نانو در ابعاد ۲۰۰-۵۰۰ نانومتر با بکارگیری تغییر فرم شدید و تولید مارتنزیت و سپس عملیات آنیل تولید نمایند.

هدف از این کار استفاده از هر دو مکانیزم ریز کردن دانه ها یعنی تبلور مجدد دینامیکی حین تغییر فرم داغ و عملیات تغییر فرم سرد و آنیل به منظور تولید فولاد زنگ نزن فوق ریز دانه AISI301 می باشد.

شرایط لازم برای رسیدن به ساختار فوق ریز دانه / نانو برای فولاد زنگ نزن آستینی ۳۰۱ AISI به کمک عملیات ترمودینامیکی پیشرفته مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور اصلاح ساختار فولاد ریختگی ۳۰۱ از عملیات همگن سازی در دمای 1200°C و زمان های ۳ تا ۱۳ h و متعاقب آن نورد داغ استفاده شد که اندازه دانه ها تا $35\mu\text{m}$ کاهش یافت. سپس برای انجام استحاله آستنیت به مارتنزیت، عملیات نورد سرد به میزان 90 % کاهش ضخامت انجام می گیرد. به منظور بازگشت مارتنزیت به آستنیت، عملیات آنیل در دمای 600°C و زمان های ۲ تا ۵۰ دقیقه انجام گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که زمان مناسب هموژن سازی برای فولاد زنگ نزن ۳۰۱ ریختگی حدود ۹ ساعت می باشد. همچنین عملیات آنیل به مدت ۵ دقیقه، تاثیر کمی بر روی اندازه دانه داشت، لیکن از این زمان به بعد رشد دانه ها محسوس خواهد شد.

مواد و روش تحقیق

ریخته گری فولاد زنگ نزن ۳۰۱ با استفاده از یک کوره القایی تحت اتمسفر محیط صورت گرفت. ترکیب شیمیایی فولاد در جدول ۱ آمده است. عملیات هموژن سازی شمش ها در دمای 1200°C و زمانهای 3, 5, 7, 9, 11 و 13 ساعت تحت اتمسفر محیط انجام پذیرفت. سپس شمش های هموژن شده به منظور اصلاح ساختار و کاهش اندازه دانه فولاد مطابق شرایط موجود در جدول 2 نورد داغ گردیدند.

جدول (۱-۴). ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن AISI 301 (درصد وزنی).

Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	Co
74.3	0.115	0.671	0.657	6.91	16.2	0.269	0.0062	0.53	0.095
Nb	Ti	V	W	Sn	P	S			
0.0033	0.0191	0.0583	0.0240	0.0461	0.0272	0.008			

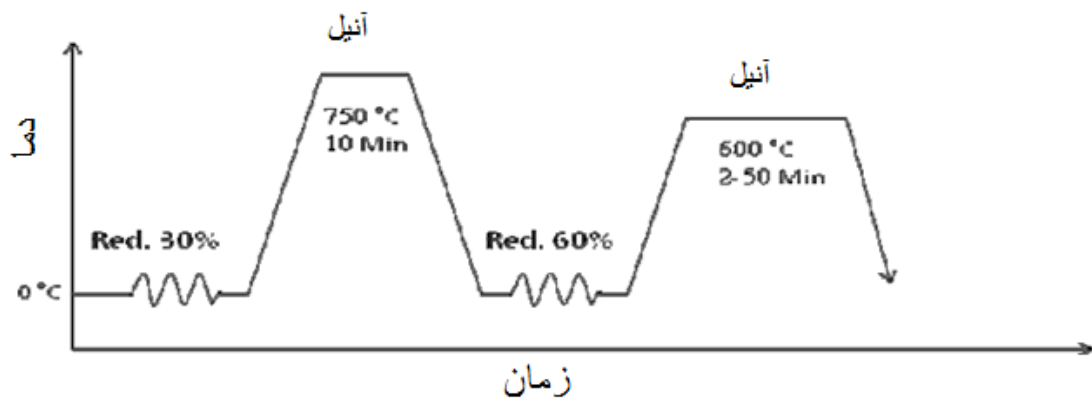
همچنین به منظور تکمیل فولاد تبلور مجدد، توسط عملیات آنیل در دمای 1050°C به مدت 5min بر روی تعدادی از نمونه ها انجام گرفت. سپس برای انجام استحاله آستنیت به مارتنزیت عملیات نورد سرد به میزان 90% کاهش ضخامت انجام پذیرفت (شکل 1).

جدول (۲-۴). شرایط ترم. مکانیکال مورد استفاده در کار حاضر.

شماره پاس	ϵ	$\dot{\epsilon}$ (s^{-1})	دما ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.13	1.2	1200
2	0.13	1.2	1100
3	0.13	1.2	1010
گرمایش مجدد در دمای 1200°C به مدت ۲ دقیقه			
4	0.2	1.2	1200
5	0.2	1.2	1020

در ابتدا 30% کاهش ضخامت داده شد و بعد از آنیل در دمای 750°C به مدت 10min، 60% کاهش ضخامت دیگر داده شد. به منظور بازگشت مارتنزیت به آستنیت، عملیات آنیل در دمای 600°C و زمانهای متفاوت 2 تا 5 دقیقه انجام گرفت. اندازه گیری میزان فازها به کمک دستگاه فریتوسکوپ انجام گردید. بررسی های ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

(SEM) و نرم افزار آنالیز تصویری Clemex انجام شد. سختی سنجی نمونه ها به روش ویکرز با نیروی 10Kg انجام گرفت.

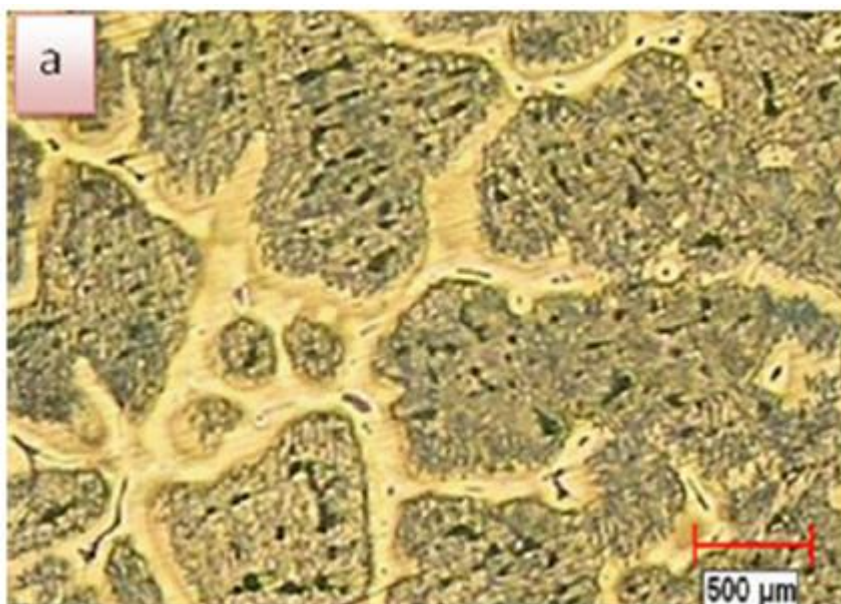


شکل (۴-۱). فرایند ترمومکانیکی اعمال شده جهت دستیابی به ساختار فوق ریزدانه/نانو.

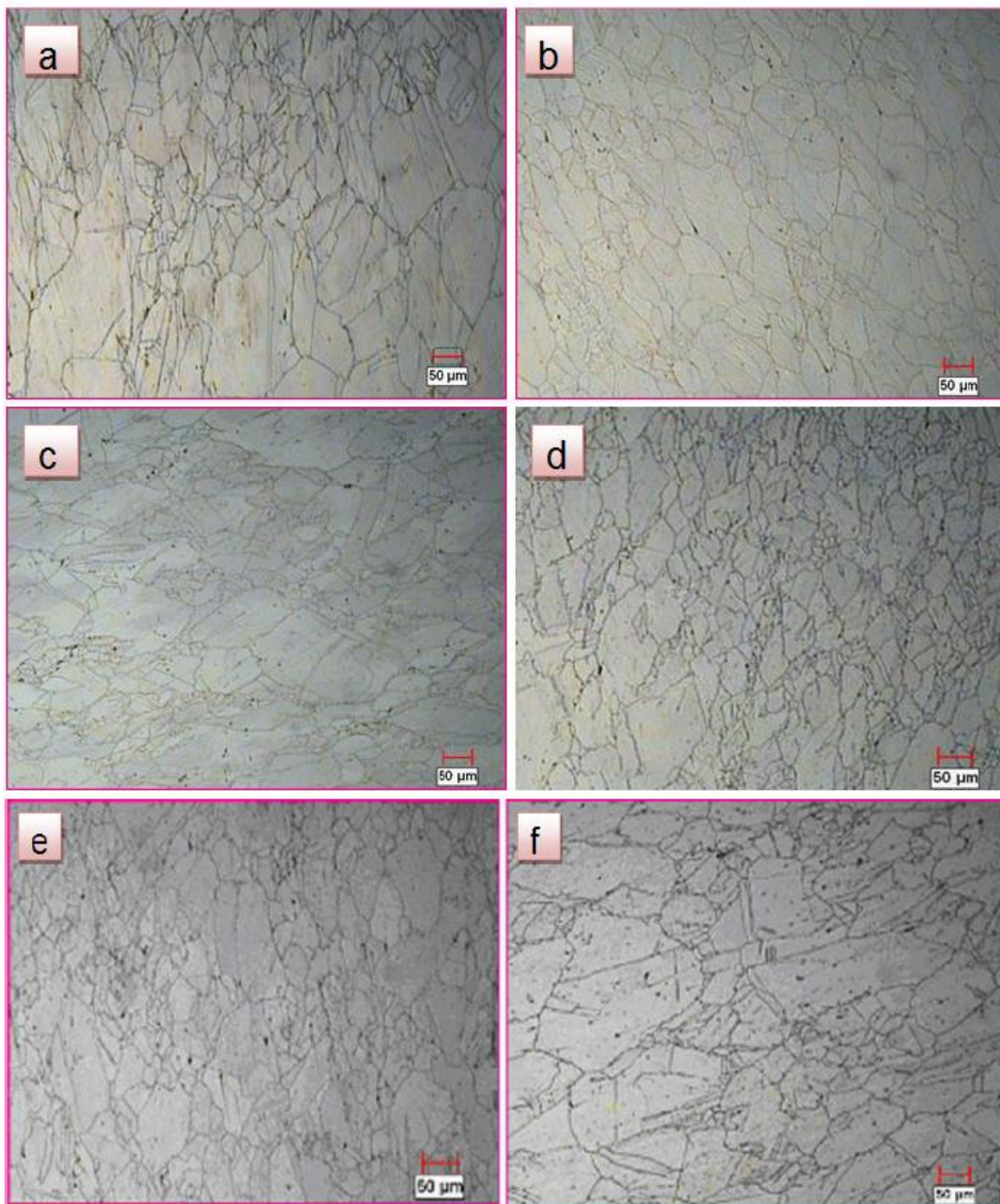
یافته ها

۱. تأثیر زمان هموزن بر اندازه دانه تبلور مجدد بعد از نورد داغ

ریزساختار فولاد ریختگی شامل دو فاز آستنیت و فریت دلتا با اندازه دانه اولیه آستنیت 1017 ± 200 میکرون در شکل زیر آمده است. میزان فریت موجود در حدود 9% می باشد.

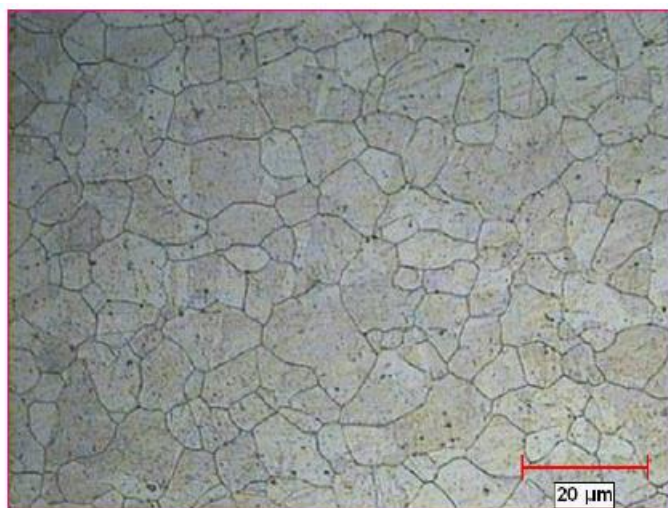


شکل (۲-۴). ریزساختار ریختگی فولاد زنگ نزن AISI 301 حاوی فاز آستنیت و فریت دلتا به همراه رسوبات کاربیدی. ریزساختار نمونه ها بعد از عملیات نورد داغ برای زمانهای متفاوت هموژن در شکل ۳ آمده است. کسر تبلور مجدد دینامیکی به تدریج با افزایش زمان هموژن، افزایش می یابد و در ۹ ساعت هموژن به بیشترین میزان می رسد و بعد از این زمان دانه ها شروع به رشد می کنند. شکل (۳-۴) تغییرات اندازه متوسط دانه ها بعد از نورد داغ به ازای زمانهای متفاوت هموژن را نشان می دهد. همچنین ریزساختار آنیل شده برای نمونه ۹ ساعت هموژن پس از نورد داغ در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. در این حالت اندازه دانه ها تا $17\mu\text{m}$ کاهش یافت.



شکل (۳-۴). ریزساختار نمونه ها بعد از عملیات نورد داغ برای زمانهای متفاوت هموژن

a) 3h, b)5h, c)7h, d)9h, e)11h, f)13h

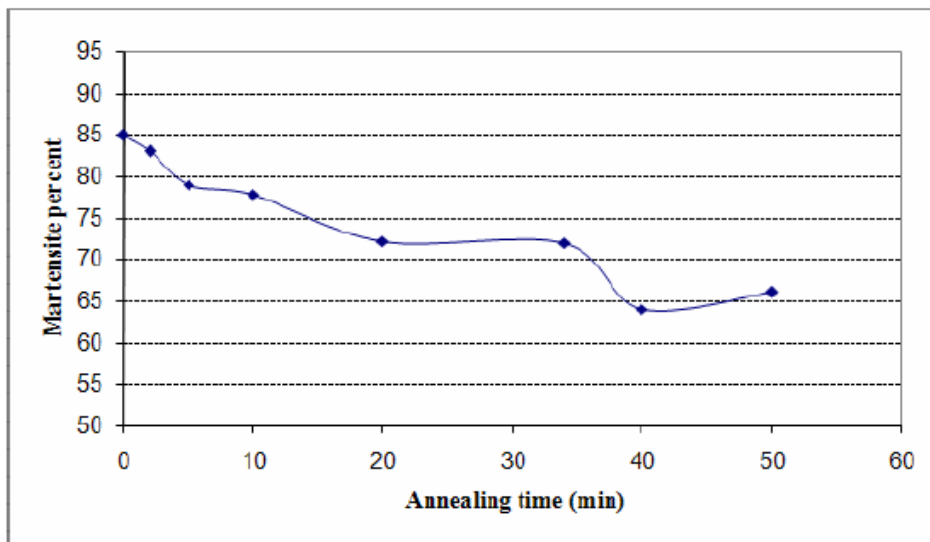


شکل (۴-۴). ریزساختار آنیل شده برای نمونه 9 ساعت هموژن شده بعد از نورد داغ. در این حالت اندازه دانه تا $17\mu\text{m}$

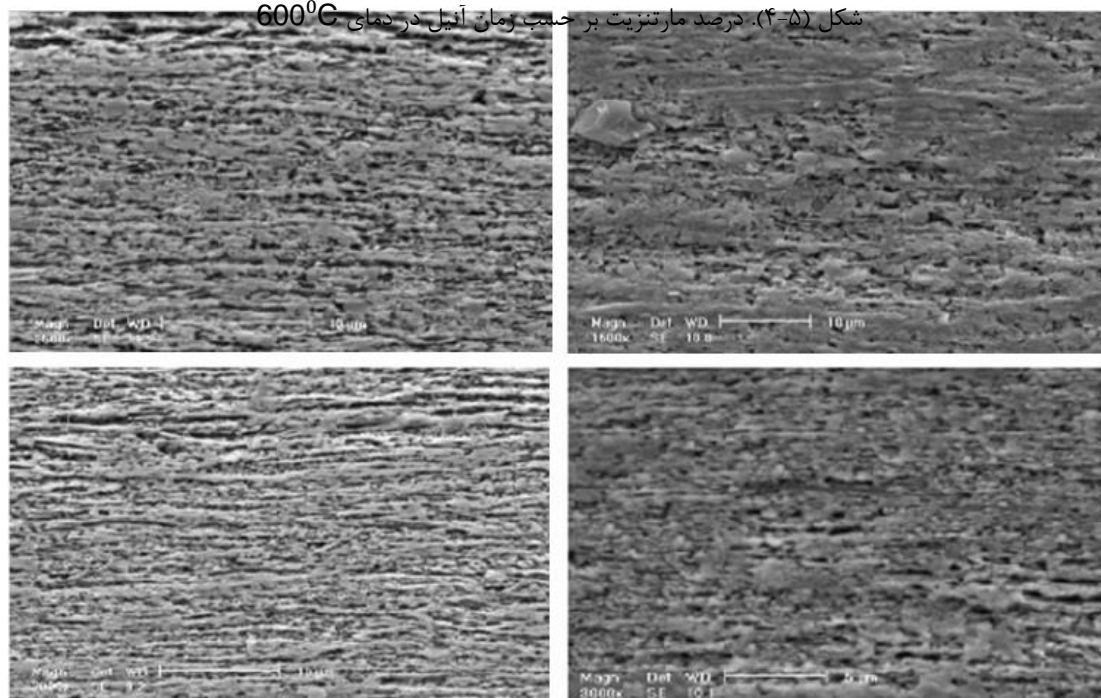
کاهش یافت.

۲. فرایند مارتنزیتی و تولید فولاد فوق ریزدانه

میزان مارتنزیت تولید شده در اثر عملیات نورد سرد به میزان 90% کاهش ضخامت بر روی نمونه هایی با اندازه دانه اولیه $17\mu\text{m}$ توسط دستگاه فریتوسکوپ، ۸۵ بدست آمد. شکل (۴-۵) درصد مارتنزیت را با گذشت زمان آنیل نشان می دهد. با گذشت زمان آنیل میزان کسر آستنیت بازگشت یافته افزایش می یابد و در ادامه ثابت می شود. تصاویر SEM نمونه های آنیل شده در زمانهای متفاوت در شکل زیر آمده است. همانگونه که قابل مشاهده است متوسط اندازه دانه ها برای زمان آنیل ۵ دقیقه در حدود 150-300nm و برای نمونه های آنیل شده ۱۵ و ۲۰ دقیقه در حدود 200-400nm می باشد.



شکل (۴-۵). درصد مارتنزیت بر حسب زمان آئیل در دمای 600°C

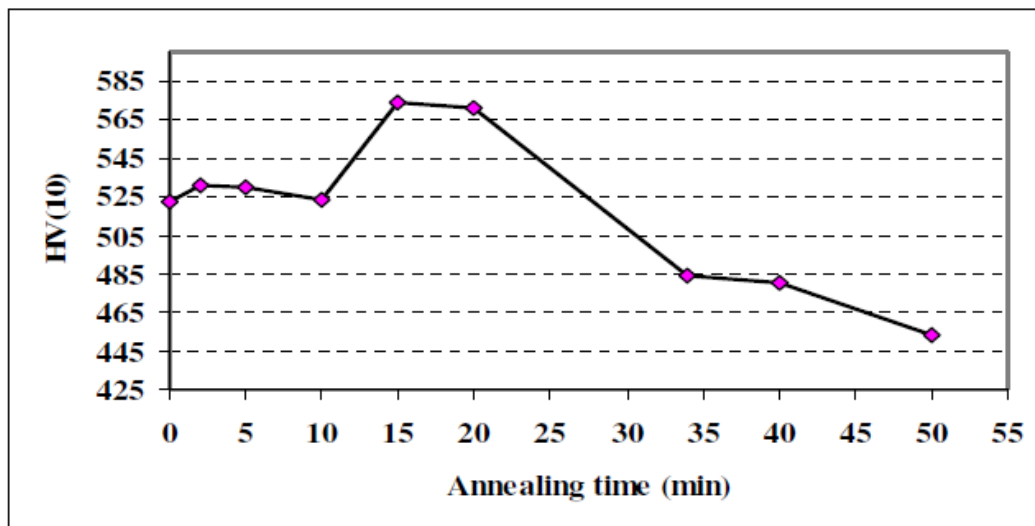


شکل (۴-۶).

ریزساختار نمونه های آئیل شده بدست آمده توسط میکروسکوپ الکترونی SEM: (a) 5 دقیقه، (b) 10 دقیقه، (c) 15 دقیقه، (d) 20 دقیقه.

همچنین نمودار سختی نمونه های آنیل شده در دمای 600°C بر حسب زمان آنیل در شکل (۷-)

(۴) نشان داده شده است.



شکل (۷-۴). تغییرات سختی نمونه های آنیل شده در دمای 600°C بر حسب زمان آنیل

نتیجه گیری

۱. فولادهای زنگ نزن بدلیل خاصیت مقاومت به خوردگی بالا، کاربرد زیادی در صنایع و محیطهای مختلف دارند.

۲. ترکیب شیمیایی آلیاژ، تأثیر مهمی در نحوه انجماد و ریزساختار نهایی دارد.

۳. بطور کلی ریزساختار منجمد شده فولادهای زنگ نزن آستنیتی شامل ساختارهای ترکیبی متنوعی از فریت-آستنیت می باشد.
۴. در میان مکانیزمهای استحکام دهی، ریزکردن دانه ها تنها روشی است که منجر به بهبود همزمان استحکام و انعطاف پذیری می شود. از آنجاییکه فولادهای زنگ نزن آستنیتی، عملیات حرارتی پذیر نمی باشند، از عملیات ترمومکانیکی برای ایجاد ساختار نانو استفاده می کنیم.
۵. زمان مناسب هموژن سازی برای فولاد زنگ نزن ۳۰۱ ریختگی حدود ۹ ساعت می باشد و در این زمان کوچک ترین اندازه دانه بدست آمد.
۶. با افزایش زمان آنیل، کسر آستنیت بازگشتی افزایش می یابد و در ادامه ثابت می گردد.

منابع و مراجع:

- [1] P.L. Ferrandini, C.T. Rios, A.T. Dutra, M.A. Jaime, P.R. Mei, R. Caram, " Solute segregation and microstructure of directionally solidified austenitic stainless steel", *Materials Science and Engineering*, Vol 435–436, pp 139–144, 2006
- [2] A. Hunter , M. Ferry, "Phase formation during solidification of AISI 304 austenitic stainless steel", *Scripta Materialia*, Vol 46, pp 253–258, 2002
- [3] J.C. Ma, Y.S. Yang , *W.H. Tong* , *Y. Fang*, *Y. Yu*, *Z.Q. Hu*, "Microstructural evolution in AISI 304 tainless steel during directional solidification and subsequent solid-state transformation", *Materials Science and Engineering*, Vol 444, pp64–68, 2007
- [4] Yunqing Ma, Jae-Eun Jin, Young-Kook Lee, "A repetitive thermomechanical process to produce nano-crystalline in a metastable austenitic steel", *Scripta Mater*, Vol 52, pp 1311-1315, 2005
- [5] A. DI Schino, I.salvatori, J.M.Kenny, "Effects of martensite formation and austenite reversion on grain refining of AISI 304 stainless steel", *J.Mater. Sci*, Vol 37, PP 4561-4565, 2002
- [6] J.H.Lee, H.C.Kim, C.Y.Jo, S.K.Kim, J.H.Shin, S.Liu, R.Trivedi, "Microstructure evolution in directionally solidified Fe-18Cr stainless steels", *Materials Science and Engineering*, Vol 413-414, pp 306-311, 2005
- [7]. مصطفی اسکندری، «تولید فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 301 فوق ریزدانه/نانو توسط عملیات ترمومکانیکی پیشرفته»، دومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی ایران و جامعه ریخته گران ایران.
- [8]. کتاب «متالورژی و جوشکاری فولادهای زنگ نزن»، مؤلف *Damin J.Kotecki* و *John C. Lippold*. مترجم مهندس امیر خاکزاد، ص. ۱ تا ۴۰ و ص. ۱۰۳ تا ۱۶۳. ۱۳۸۶