

# تأثیر فرآیند VAR بر خواص مکانیکی، اتم‌های گازی و آخال‌های موجود در آلیاژ 18Ni-9Co-5Mo تولید شده به روش VIM

سید رضا علمی حسینی<sup>۱\*</sup> و حسین عربی<sup>۲</sup>

۱- مربی، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

\*Elmi@eng.usb.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۸/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۱۰/۲۰)

## چکیده

فولادهای ماریچینگ گروهی از فولادها هستند که دارای استحکام و چقرمگی شکست بالایی می‌باشند. به منظور پایین نگهداشتن عناصر ناخالصی در این فولادها که برای ایجاد استحکام و چقرمگی بالا ضروری می‌باشد و همچنین به دلیل وجود عناصر آلیاژی فعال در آنها، استفاده از روش‌های ذوب، تصفیه و ریخته‌گری پیشرفته نظیر فرآیندهای تحت خلاء همواره در تولید فولادهای ماریچینگ مورد توجه بوده است. در این تحقیق فرآیند ذوب مجدد قوسی تحت خلاء بر روی دو فولاد ماریچینگ حاوی مقادیر ۰/۶۵ و ۱ درصد وزنی تیتانیم که به روش ذوب القایی تحت خلاء تولید شده بودند، انجام شد. این فرآیند باعث شد علاوه بر کاهش اتم‌های گازی (تا میزان ۱۴٪)، بر میزان داکتیلیته به اندازه ۳۰٪ و بر مقدار مقاومت به ضربه فولاد در حدود ۴۷٪ افزوده شود. همچنین با مقایسه دو فولاد C۳۰۰ حاوی ۰/۶۵ و ۱ درصد وزنی تیتانیم که به روش ذوب دوگانه (VAR + VIM) تولید شده‌اند، مشخص شد که افزایش تیتانیم از ۰/۶۵ به ۱ درصد وزنی باعث افزایش اندکی در مقادیر استحکام و سختی و نیز کاهش ناچیزی در مقادیر انعطاف‌پذیری و مقاومت به ضربه فولاد می‌شود.

## واژه‌های کلیدی:

ذوب مجدد قوسی تحت خلاء، فولاد ماریچینگ C۳۰۰، ذوب القایی تحت خلاء، خواص مکانیکی، آخال، اتم‌های گازی.

## ۱- مقدمه

عناصری چون نیکل، کبالت، تیتانیم، مولیبدن و منگنز از عناصر آلیاژی مهم در این فولادها به حساب می‌آیند. میزان کربن و عناصر ناخالصی در این فولادها بسیار کم می‌باشد. به دلیل مقدار کربن بسیار پایین، ساختار مارتزیتی این فولادها دارای سختی و استحکام پایین تری نسبت به سایر فولادهای مارتزیتی، ولی با

فولادهای ماریچینگ از جمله فولادهای با استحکام بسیار بالا محسوب می‌شوند که مقاومت خوبی در مقابل ضربه دارند. این فولادها داکتیلیته مناسب و نیز قابلیت استفاده تا دماهایی بالاتر از دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد دارند [۱-۳].

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد ماریچینگ C۳۰۰ (wt%) [۲].

نام عنصر	Ni	Mo	Co	Ti	Al	C	Fe
wt%	۱۸	۵/۰	۹/۰	۰/۷	۰/۱	<۰/۰۳	باقیمانده

جدول (۲): خواص مکانیکی فولاد ماریچینگ C۳۰۰ در شرایط پیرسازی شده [۲].

خواص مکانیکی	استحکام کششی نهایی		استحکام تسلیم		درصد ازدیاد طول در ۵۰ میلی متر	درصد کاهش سطح مقطع	تافنس شکست	
	MPa	Ksi	MPa	Ksi			MPa.m <sup>1/2</sup>	Ksi.in <sup>1/2</sup>
مقدار	۲۰۵۰	۲۹۰	۲۰۰۰	۲۹۰	۷	۴۰	۷۳	۸۰

جدول (۳): برخی از واکنش‌های گاززدایی تعادلی در خلاء [۱۴].

واکنش	نسبت تعادلی	واحد h	رابطه K با دما	مقدار h در دمای ۱۶۰۰ °C و فشار ۱ mmHg
$[H] = \frac{1}{2} H_2(g)$	$[h_H] = K_H \cdot P_{H_2}^{1/2}$	ppm	$\log K_H = -\frac{1905}{T} + 2.409$	۰/۷۷
$[N] = \frac{1}{2} N_2(g)$	$[h_N] = K_N \cdot P_{N_2}^{1/2}$	ppm	$\log K_N = -\frac{518}{T} + 2.937$	۱۴/۱
$[C] + [O] = CO(g)$	$[h_C] \cdot [h_O] = K_{CO} \cdot P_{CO}$	wt.%	$\log K_{CO} = -\frac{1160}{T} - 2.00$	$4/7 \times 10^{-Fa}$
		ppm	$\log K_H = -\frac{1160}{T} - 6.00$	۰/۴۷ <sup>a</sup>

توجه:  $1 \text{ mmHg} = 1 \text{ Torr} = 1.315 \times 10^{-3} \text{ atm}$

در حالت a مقدار  $h_c$  معادل با ۰/۰۵ wt.% یا ۵۰۰ ppm می‌باشد.

در بسیاری از صنایع جهت تولید آلیاژهای مرغوب که داشتن ساختار یکنواخت، استحکام خستگی و تافنس بالا مورد توجه می‌باشد، استفاده می‌شود. این فرآیند به دلیل داشتن قالبی آبگرد، ساختار انجمادی جهت‌داری ایجاد می‌کند [۷-۹]. در این روش عامل قوس باعث شکست حرارتی آخال‌های اکسیدی و نیتریدی موجود در فولاد شده و آنها را به طور یکنواخت در زمینه مارتزیتی پخش می‌کند. همچنین قوس می‌تواند بخشی از آخال‌های موجود در فولاد را تجزیه حرارتی کند. در ادامه عامل خلاء باعث خروج اتم‌های گازی محلول و نیز گازهای حاصل از تجزیه حرارتی آخال‌ها می‌گردد [۱۳-۱۰]. در جدول (۳) مهمترین واکنش‌های گاززدایی در خلاء به همراه اطلاعات مربوط به هر واکنش نشان داده شده است [۱۴].

پیرسازی این ساختار مارتزیتی، استحکام و سختی آنها افزایش قابل توجهی می‌یابد. در اثر پیرسختی این فولادها رسوباتی بین فلزی در حد نانومتر و همدوس با زمینه در ساختار مارتزیتی تشکیل می‌شود که موجب افزایش استحکام و سختی این فولادها می‌گردند. مهمترین این رسوبات عبارتند از:  $Ni_3Ti$ ،  $NiMn$  و  $Fe_2Mo$  [۴-۶].

فولاد مورد استفاده در این تحقیق از نوع ماریچینگ ۱۸ درصد نیکل کبالت دار می‌باشد که دارای استحکام تسلیمی معادل 300 Ksi بوده و تحت نام اختصاری C۳۰۰ شناخته می‌شود. در جدول‌های (۱) و (۲) به ترتیب ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی این فولاد ارائه شده است.

فرآیند ذوب مجدد قوسی تحت خلاء (VAR) در ابتدا به عنوان روش ذوب سوپرآلیاژها استفاده می‌شد. ولی امروزه این روش

جدول (۴): مشخصات ذوب‌های انجام شده در این تحقیق.

درصد وزنی عناصر												شرایط ثانویه	شرایط اولیه	درصد تقریبی تیتانیم (wt%)	ردیف
S		C		Co		Mo		Ti		Ni					
قبل از VAR	بعد از VAR	قبل از VAR	بعد از VAR	قبل از VAR	بعد از VAR	قبل از VAR	بعد از VAR	قبل از VAR	بعد از VAR	قبل از VAR	بعد از VAR	ذوب	ذوب		
۰/۰۱۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۸/۴۵	۸/۰۱	۴/۱۳	۴/۱۰	۰/۶۵	۰/۶۱	۱۸/۰۱	۱۶/۹۸	VAR	VIM	۰/۶۵	۱
۰/۰۱۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۸/۸۶	۸/۷۵	۴/۱۹	۴/۰۵	۰/۹۷۸	۰/۹۳۵	۱۷/۰۳	۱۶/۴۵	VAR	VIM	۱	۲



شکل (۱): نمایی از شمش‌های ریخته شده در کوره VAR.

جدول (۵): مشخصات کوره VAR مورد استفاده در این تحقیق.

مدل کوره	حداکثر توان اعمالی	جنس و نوع الکترود	جنس قالب	ظرفیت قالب	فشار خلاء	دمای قوس	فشار گاز آرگن
					(Pa)	(°C)	(Pa)
ALD LK ۶/۴۵	۶۰۰ kW	تنگستن و غیر مصرفی	مسی آبگرد	۴۰۰ گرم	$3 \pm 1 \times 10^{-9}$	$2500 \pm 20$	$1/3 \pm 0.1 \times 10^5$

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا دو شمش در کوره ذوب القایی تحت خلاء (VIM) تولید شده و سپس در کوره VAR ذوب مجدد شدند. مشخصات این دو ذوب در جدول (۴) آورده شده است. این دو ذوب به ترتیب دارای ۰/۶۵ و ۱ درصد وزنی تیتانیم می‌باشند. شمش‌های ریخته شده در کوره VAR به صورت تسمه‌ای با ابعاد  $13/5 \times 2/5 \times 1/5$  cm و وزن تقریبی ۲۹۰ گرم می‌باشند. نمایی از این شمش‌ها در شکل (۱) آورده شده است.

آنچه به عنوان درصد وزنی عناصر در جدول (۴) ذکر شده است، نتیجه انجام آنالیز کوانتومتری قبل و بعد از فرآیند VAR می‌باشد. در این جدول عدد سمت راست آنالیز عنصر بعد از فرآیند VAR و عدد سمت چپ آنالیز عنصر قبل از فرآیند VAR می‌باشد. آنالیز ترکیب شیمیایی نمونه‌ها توسط دستگاه کوانتومتر مدل GNR ساخت ایتالیا که مجهز به فیلمان تنگستنی است انجام

گرفت. ترکیب شیمیایی ارائه شده برای هر نمونه، میانگین حداقل ۳ آنالیز می‌باشد.

در این تحقیق جهت ذوب و آلیاژ سازی فولاد ماربجینگ از یک کوره VAR با مقیاس آزمایشگاهی استفاده شد. مشخصات این کوره در جدول (۵) ارائه شده است. بعد از فرآیند ذوب مراحل ذیل بر روی شمش ریخته شده انجام گردید:

الف- همگن سازی: در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد و به مدت زمان ۲ ساعت به منظور از بین بردن جدایش عناصر آلیاژی، حذف آخال‌ها و نیز بهبود مورفولوژی آنها.

ب- نورد گرم: ۶۰٪ کاهش سطح مقطع به منظور افزایش استحکام و بلافاصله کوئنچ در آب.

ج- آنیل محلولی: در دمای ۸۲۰ درجه سانتی گراد و به مدت زمان یک ساعت به منظور حذف تنش‌های ناشی از نورد گرم.

شده و ذوب گردیدند. از گاز هلیوم جهت انتقال گازهای متصاعد شده به واحد آشکارساز استفاده می‌شود. دستگاه آنالیزگر گاز که قبلاً توسط نمونه‌های استاندارد کالیبره شده است، درصد اکسیژن و نیتروژن را بر حسب ppm ارائه می‌کند. جهت بررسی آماری آخال‌ها از یک میکروسکوپ نوری متصل به نرم‌افزار آنالیز تصویری استفاده شد.

### ۳- نتایج و مباحث

#### ۳-۱- تأثیر فرآیند VAR بر خواص مکانیکی فولاد C۳۰۰

##### تولید شده به روش VIM

جهت بررسی تأثیر فرآیند VAR بر خواص مکانیکی فولاد C۳۰۰ تولید شده به روش VIM آزمون‌های کشش، ضربه و سختی بر روی دو عدد شمش VAR شده (جدول ۴) انجام گرفت. اطلاعات به دست آمده از این آزمون‌ها به همراه اطلاعات قبل از انجام فرآیند VAR بر روی شمش حاوی ۰/۶۵ درصد وزنی تیتانیم در جدول (۶) ارائه شده است. این جدول تأثیر تیتانیم بر خواص مکانیکی فولاد ماریچینگ C۳۰۰ تولید شده به روش VAR + VIM را نیز بیان می‌کند. متأسفانه به دلیل کمبود مواد اولیه از شمش حاوی ۱ wt% Ti، امکان ارائه اطلاعات مربوط به خواص مکانیکی این شمش در حالت VIM موجود نبود.

در جدول (۷) تأثیر فرآیند VAR بر کاهش (↓) یا افزایش (↑) خواص مکانیکی فولاد C۳۰۰ حاوی ۰/۶۵ wt% Ti که با روش VIM تولید شده، ارائه شده است.

منحنی کشش مهندسی فولاد C۳۰۰ حاوی ۰/۶۵ wt% Ti که به روش‌های VIM و ذوب دوگانه (VAR + VIM) تولید شده در شکل (۲) ارائه شده است.

بررسی شماتیک تأثیر فرآیند VAR بر خواص مکانیکی فولاد C۳۰۰ تولید شده به روش VIM در شکل‌های (۳-الف) تا (۳-د) آورده شده است. با توجه به این شکل‌ها و نیز جدول (۷) مشاهده می‌شود که انجام فرآیند VAR باعث تغییرات ذیل بر

د- پیرسازی: در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان ۳ ساعت جهت ایجاد رسوبات ریز در زمینه مارتنزیتی و افزایش استحکام.

با توجه به پائین بودن میزان سختی فولاد ماریچینگ در حالت آنیل محلولی شده، نمونه‌های کشش و ضربه پس از عملیات آنیل محلولی تهیه شدند. آزمون کشش در دمای محیط انجام شده و نمونه‌های آن طبق استاندارد ASTM E8 (نمونه با ابعاد کوچک<sup>۲</sup>) و به صورت صفحه‌ای تهیه شدند. به این منظور از هر شمش آنیل شده تعداد ۳ نمونه کشش تهیه شد. سپس این نمونه‌ها بعد از تراشکاری تحت عملیات پیرسازی قرار گرفتند. در پایان و قبل از انجام آزمایش کشش، سطوح آنها برای حذف لایه‌های اکسیدی و رسیدن به سطحی صاف، پولیش شدند. آزمایش کشش توسط دستگاه کشش تک‌محوری مدل Instron ۸۵۰۲ با ظرفیت ۳۰ تن و با سرعت فک ۲ mm/min انجام گرفت. نمونه‌های ضربه مطابق استاندارد ASTM A ۳۷۰ آماده شدند. به این منظور از هر شمش آنیل شده تعداد ۴ عدد نمونه ضربه تهیه شد که مشابه نمونه‌های کشش پس از عملیات تراشکاری پیرسازی شدند. کلیه آزمایشات ضربه در دمای محیط انجام شد و نتیجه نهائی از میانگین ۴ آزمایش ضربه به دست آمد. جهت تعیین مقاومت به ضربه نمونه‌ها از آزمایش ضربه با روش شارپی استفاده شد. دستگاه ضربه مورد استفاده ساخت شرکت Wolpert آلمان با ظرفیت ۳۰۰ ژول بود. عملیات سختی‌سنجی با استفاده از روش راکولسی انجام گرفت. از هر نمونه ۴ تا ۵ مرتبه سختی‌سنجی انجام گرفت و سپس میانگین این مقادیر به عنوان سختی میانگین نمونه در نظر گرفته شد.

جهت اندازه‌گیری مقدار اکسیژن و نیتروژن موجود در هر شمش، از هر کدام تعداد ۷ عدد نمونه به وزن تقریبی ۱-۰/۵ گرم تهیه شد. سپس با استفاده از دستگاه Rosemount N-O Analyser 5003 میزان گازهای موجود در آن مورد بررسی قرار گرفت. در این دستگاه نمونه‌های کوچک آماده شده در بوته‌های گرافیتی تا دمای ۳۰۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده

جدول (۶): مقادیر خواص مکانیکی فولادهای C۳۰۰ تولید شده با روش‌های VIM و VIM + VAR.

خواص مکانیکی							مقدار تیتانیوم در فولاد (wt%)
درصد کاهش سطح مقطع	سختی (HRC)	مقاومت به ضربه ( $j/cm^2$ )	درصد ازدیاد طول	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	نوع فرآیند	
۳۴/۷۲	۵۵	۲۴/۹۵	۵/۶۲	۲۰۰۰	۲۱۰۰	VIM	۰/۶۵
۶۰/۱۴	۴۸/۳	۴۷/۳۰	۸/۱۴	۱۶۷۹	۱۷۷۰	VIM+VAR	
۴۴/۸۹	۵۰	۴۳/۴۸	۷/۸	۱۷۹۳	۱۸۴۹	VIM+VAR	

جدول (۷): تأثیر فرآیند VAR بر کاهش (↓) یا افزایش (↑) خواص مکانیکی

فولاد C۳۰۰ حاوی ۰/۶۵ wt% Ti تولید شده به روش VIM (%).

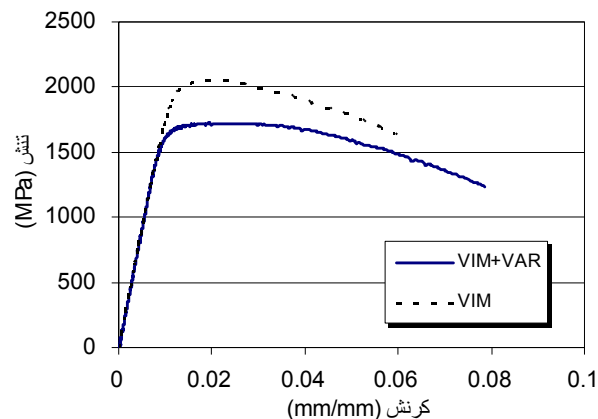
درصد کاهش سطح مقطع	سختی (HRC)	مقاومت به ضربه ( $j/cm^2$ )	درصد ازدیاد طول	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)
۴۲ ↑	۱۲ ↓	۴۷ ↑	۳۰ ↑	۱۶ ↓	۱۵ ↓

در شکل (۴) توزیع آخال‌های موجود در فولاد C۳۰۰ تولید شده با روش‌های VIM و VIM + VAR ارائه شده است. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که در اثر انجام فرآیند ذوب دوگانه از میزان کسر سطحی آخال‌های موجود در فولاد VIM شده کاسته شده است.

علت تغییرات خواص مکانیکی در اثر انجام فرآیند VAR را می‌توان اینگونه بیان کرد:

با توجه به اینکه این فرآیند دارای قالبی آبرگرد است سرعت سردکنندگی بالا باعث ریز شدن دانه‌بندی فولاد و افزایش استحکام می‌شود. در مجموع می‌توان گفت:

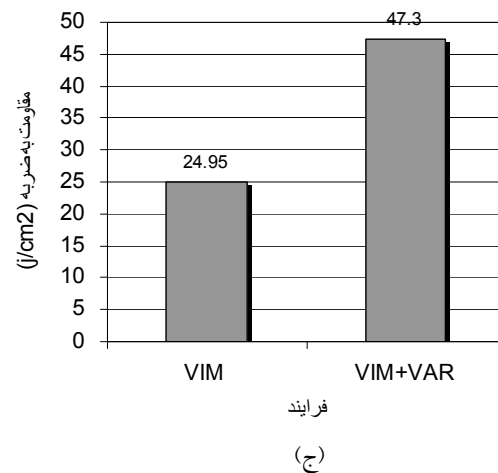
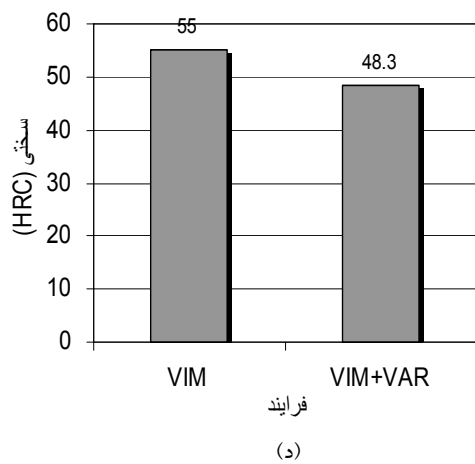
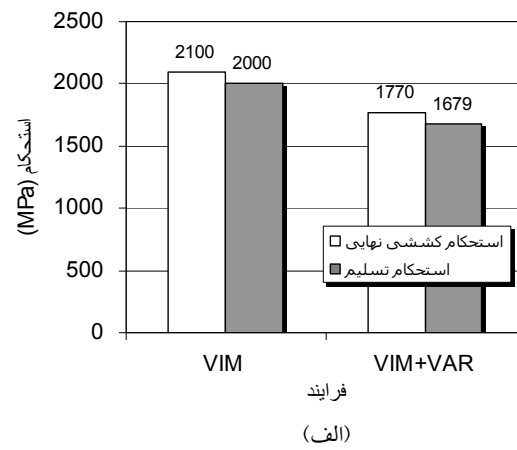
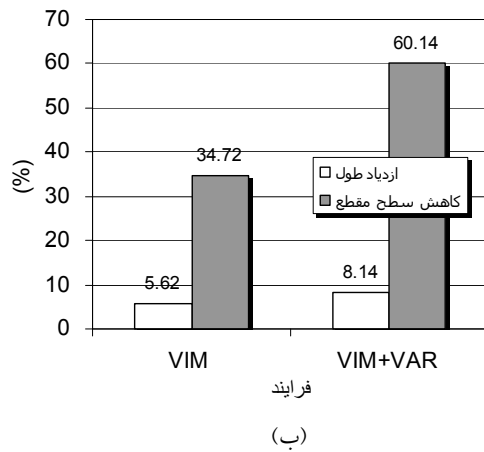
فرآیند VAR با اعمال قوس باعث شکست حرارتی رسوبات و آخال‌ها و اتلاف بخشی از عناصر سازنده آنها (به خصوص تیتانیوم) می‌شود (جدول ۴). علاوه بر این بخشی از آخال‌ها و رسوبات تجزیه حرارتی می‌شوند. کاهش عناصر لازم برای تشکیل رسوبات در حین عملیات حرارتی بعدی می‌تواند میزان این رسوبات را کاهش دهد و بدین وسیله باعث افت استحکام



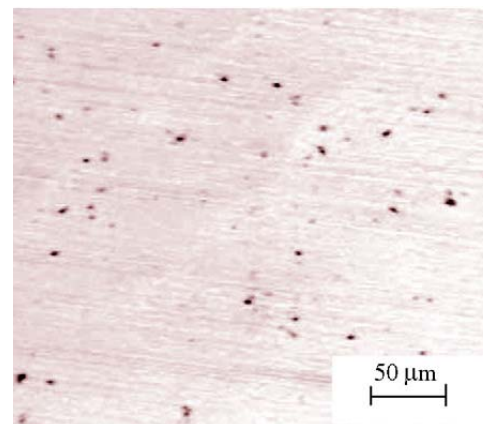
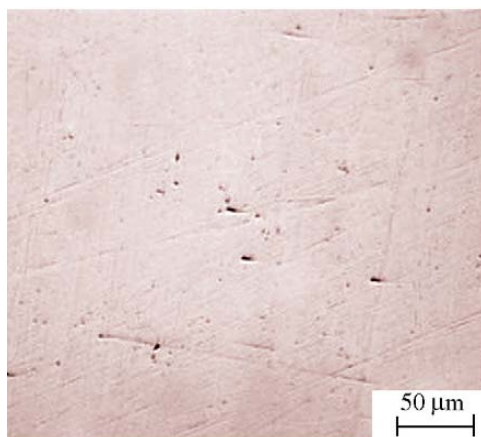
شکل (۲): تأثیر فرآیند VAR بر منحنی کشش فولاد C۳۰۰ حاوی ۰/۶۵ wt% Ti تولید شده به روش VIM.

روی فولاد C۳۰۰ حاوی ۰/۶۵ wt% Ti که به روش VIM تولید شده گردیده است:

- ۱- کاهش ۱۵ درصدی در مقدار استحکام
- ۲- کاهش ۱۲ درصدی در مقدار سختی
- ۳- افزایش ۳۰ درصدی در مقدار انعطاف‌پذیری
- ۴- افزایش ۴۷ درصدی در مقدار مقاومت به ضربه



شکل (۳): تأثیر فرآیند VAR بر (الف) استحکام، (ب) انعطاف‌پذیری، (ج) مقاومت به ضربه و (د) سختی فولاد C۳۰۰ حاوی ۰/۶۵ درصد وزنی تیتانیم تولید شده به روش VIM.



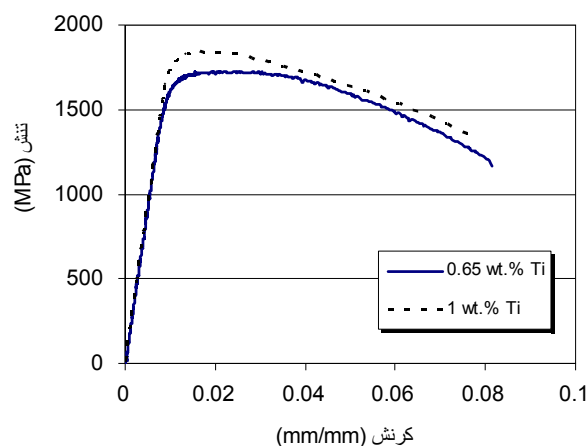
شکل (۴): شمایی از مقدار، اندازه و توزیع آخال‌های موجود در شمش ریخته‌گری شده با روش‌های (الف) VIM و (ب) VIM+VAR.

### ۳-۲- تأثیر افزایش تیتانیوم بر خواص مکانیکی فولاد C۳۰۰

#### تولید شده به روش VIM + VAR

منحنی کشش مهندسی فولاد C۳۰۰ حاوی مقادیر ۰/۶۵ و ۱ درصد وزنی تیتانیوم که به روش ذوب دوگانه (VIM + VAR) تولید شده‌اند در شکل (۵) آورده شده است. در شکل‌های (۶-الف) تا (۶-د) مقایسه دقیقی تری از استحکام کششی، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول، درصد کاهش سطح مقطع، مقاومت به ضربه و سختی این دو فولاد ارائه شده است. در جدول (۸) تأثیر افزایش مقدار تیتانیوم از ۰/۶۵ تا ۱ درصد وزنی بر درصد کاهش (↓) یا افزایش (↑) خواص مکانیکی فولاد C۳۰۰ تولید شده به روش VIM + VAR نشان داده شده است. علت تغییرات خواص مکانیکی با افزودن مقدار تیتانیوم را اینگونه می‌توان توجیه کرد:

افزایش تیتانیوم در فولاد باعث افزایش کسر حجمی رسوبات  $Ni_3Ti$  شده به گونه‌ای که مقاومت در برابر حرکت نابجایی‌های خطی بیشتر می‌شود. در نتیجه استحکام این آلیاژ افزایش می‌یابد. افزایش تیتانیوم همانگونه که استحکام فولاد را زیاد می‌کند باعث کاهش انعطاف‌پذیری آن هم می‌شود. با افزایش تیتانیوم مقاومت به ضربه فولاد مورد استفاده در این تحقیق کاهش یافته است. زیرا رسوبات  $Ni_3Ti$  و آخال‌های تیتانیوم‌دار به عنوان فازهای ترد در فولاد ماریجینگ شناخته شده‌اند [۱۵ و ۱۶] که باعث کاهش مقاومت به ضربه فولاد می‌شوند. علاوه بر این تشکیل رسوبات  $Ni_3Ti$  باعث کاهش مقدار نیکل موجود در زمینه می‌شود. در نتیجه از این نظر نیز مقاومت به ضربه کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه افزایش تیتانیوم باعث تشکیل فازهای سختی چون رسوبات و آخال‌ها می‌شود می‌توان انتظار داشت که سختی فولاد هم زیاد شود. در پایان بایستی اشاره کرد که افزایش تیتانیوم از ۰/۶۵ به ۱ درصد وزنی باعث تغییرات اندکی در خواص مکانیکی این فولاد شده است.

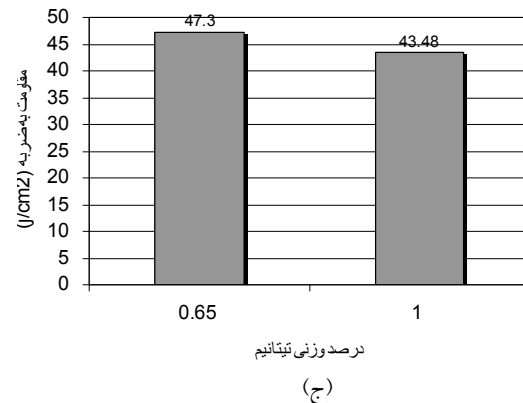
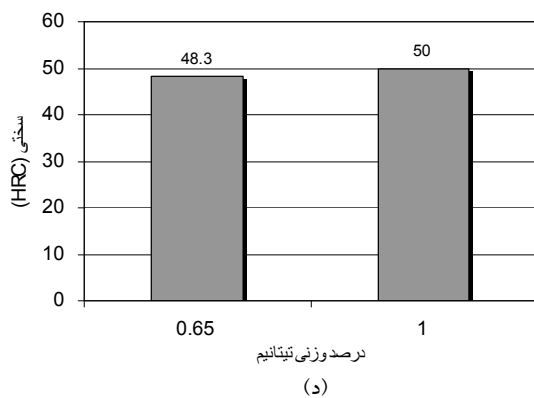
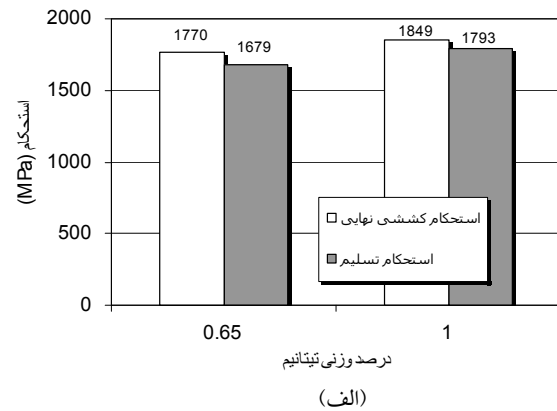
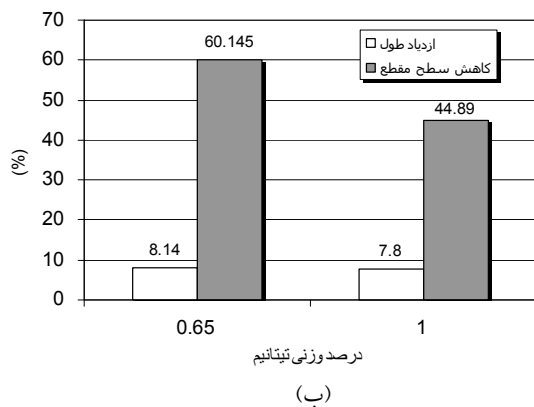


شکل (۵): تأثیر افزایش تیتانیوم بر منحنی کشش فولاد C۳۰۰ تولید شده به روش VIM + VAR.

ناشی از رسوب سختی شود. از طرفی بعد از شکست حرارتی رسوبات و افزایش تعداد رسوبات انتظار می‌رود استحکام اندکی افزایش یابد. ضمناً تجزیه حرارتی کامل آخال‌ها و آزادسازی تمام گازهای موجود در آنها به علت خلاء پایین مورد استفاده امکان‌پذیر نیست. لذا به نظر می‌رسد که تأثیر اتلاف عناصر و تشکیل تعداد کمتری از رسوبات در حین عملیات حرارتی بعدی علت اصلی کاهش اندک استحکام بوده است.

فرآیند VAR باعث اصلاح آخال‌ها شده (شکل ۴) که در نتیجه آن داکتیلیته فولاد تا ۳۰٪ بالا رفته است.

این فرآیند علاوه بر شکست حرارتی آخال‌ها و رسوبات باعث مقداری تجزیه حرارتی و نیز اتلاف عناصر سازنده موجود در آنها می‌شود. همچنین این فرآیند با تجزیه حرارتی تعدادی از آخال‌ها از تعداد آنها کاسته است. بنابراین بعد از فرآیند VAR از مقدار فازهای ترد موجود در فولاد کاسته شده و مقاومت به ضربه فولاد در حدود ۴۷٪ نسبت به حالت VIM شده افزایش یافته است. از آنجائیکه رسوبات و آخال‌ها به عنوان فازهای سخت به حساب می‌آیند، بعد از فرآیند VAR سختی فولاد به اندازه ۱۲٪ کم شده است.



شکل (۶): مقایسه (الف) استحکام، (ب) انعطاف پذیری، (ج) مقاومت به ضربه و (د) سختی دو فولاد C۳۰۰ حاوی ۰/۶۵ و ۱ درصد وزنی تیتانیوم تولید شده به روش VIM + VAR.

جدول (۸): تأثیر افزایش مقدار تیتانیوم از ۰/۶۵ تا ۱ درصد وزنی بر درصد کاهش (↓) یا افزایش (↑) خواص مکانیکی فولاد C۳۰۰ تولید شده به روش VIM+VAR.

درصد کاهش سطح مقطع	سختی (HRC)	مقاومت به ضربه (j/cm <sup>2</sup> )	درصد ازدیاد طول	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)
۲۵/۳۶ ↑	۳/۴ ↓	۸ ↑	۴/۱ ↑	۶/۳ ↓	۴/۲ ↓

فرآیندهای VIM و VAR از نظر عامل "خلاء" به یکدیگر شبیه بوده ولی از نظر عامل گرمایش با یکدیگر تفاوت دارند. در فرآیند VAR عامل ایجاد گرما، قوس است در حالیکه در فرآیند VIM عامل ایجاد کننده گرما، القا است. قوس به مراتب حرارت لحظه‌ای بیشتری نسبت به القا ایجاد می‌کند. اعمال قوس باعث شکست حرارتی آخال‌های موجود در فولاد شده و اندازه آنها را کاهش می‌دهد. علاوه بر شکست حرارتی، بخشی از آخال‌ها

### ۳-۳- تأثیر فرآیند VAR بر کاهش اتم‌های گازی موجود

#### در فولاد C۳۰۰ تولید شده به روش VIM

در شکل (۷) تأثیر فرآیند VAR بر کاهش اتم‌های اکسیژن و نیتروژن موجود در فولاد C۳۰۰ حاوی ۰/۶۵ wt% Ti که به روش VIM تولید شده، ارائه گردیده است. بر اساس این شکل فرآیند VAR باعث کاهش ۱۴ درصدی در مجموع محتوای اکسیژن و نیتروژن فولاد C۳۰۰ تولیدی به روش VIM شده است.



۴- فرآیند VAR با ایجاد "قوس" و "خلأ" باعث کاهش ۱۴ درصدی در مقدار اتم‌های گازی موجود در شمش تولیدی به روش VIM شده است.

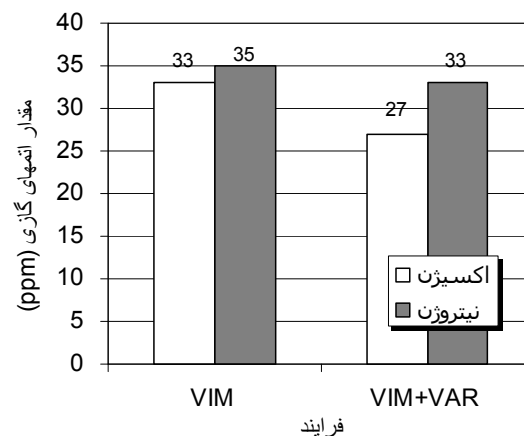
## ۵- مراجع

[۱] س. ر. علمی حسینی، ح. عربی، ح. رضوی زاده، "بررسی تأثیر مقدار تیتانیم بر خواص مکانیکی و رفتار آخال‌های موجود در فولاد مارینینگ رده C۳۰۰ تولید شده به روش VAR"، دهمین کنگره سالانه انجمن مهندسين متالورژی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۵.

- [2] R. F. Decker, "Source Book on Maraging Steel", ASM International, 1978.
- [3] ASM Metals Handbook, 10th ed., Vol. 1, ASM International, pp. 793-800, 1991.
- [4] P. Warzinger, R. Rabitch, "Production of Maraging Steel Grades and the Influence of Specified and Nonspecified Elements for Special Applications", Journal of Materials Science, pp. 7295-7302, 2004.
- [5] E. Nes, G. Thomas, "Precipitation of TiC in Thermally Embrittled Maraging Steels", Metall. Trans. A, Vol. 7, pp. 974-977, 1976.
- [6] R. F. Decker, J. T. Each, "18% Nickel Maraging Steel", Trans. Of ASM, Vol. 55, pp. 58-76, 1962.

[۷] س. ر. علمی حسینی، ح. عربی، ح. رضوی زاده، "بررسی نحوه تولید آلیاژهایی با قابلیت عملکرد بالا به روش ذوب مجدد قوسی تحت خلأ"، مجله مهندسی متالورژی، سال نهم، شماره ۲۴، بهار و تابستان ۱۳۸۵.

- [8] Mathew J. Donachie, Stephen J. Donachie, "Superalloys-A Technical Guide", 2002.
- [9] A. Choudhury, "Vacuum Arc Remelting", ASM Handbook, Vol. 15, 1992.
- [10] V. P. Kosukha, A. A. Pigenko, A. G. Papush, "Effect of Vacuum Arc Remelting (VAR) on the Quality of Cast and Wrought Maraging Steel", Stal, pp. 606-608, 1975.
- [11] R. J. Andreini, "Kinetics of Solute Removal During Electron Beam & Vacuum Arc Melting", J. Vac. Sci. Technol., pp. 1055-1059, 1974.
- [12] O. Winkler, R. Bakish, "Vacuum Metallurgy", Elsevier Publishing Company, 1971.
- [13] A. Choudhury, "Vacuum Metallurgy", ASM International, Warrendale, PA, 1990.



شکل (۷): تأثیر فرآیند VAR بر کاهش مقدار اتم‌های اکسیژن و نیتروژن موجود در فولاد C۳۰۰ حاوی ۰/۶۵ wt% Ti تولید شده به روش VIM.

تجزیه شده و اتم‌های گازی موجود در آنها آزاد می‌شوند. اتم‌های اکسیژن و نیتروژن حاصل به صورت مونواکسید کربن و ازت (جدول ۳) به بالای سطح مذاب می‌آیند. سپس این گازها همراه با گازهای حاصل از اتم‌های گازی محلول در زمینه توسط عامل "خلأ" به بیرون از محیط ذوب هدایت می‌شوند.

## ۴- نتیجه‌گیری

۱- مهمترین دلایل استفاده از فرآیند VAR به عنوان یک فرآیند ذوب مجدد اصلاح آخال‌ها به همراه ایجاد یک ساختار انجماد جهت‌دار است.

۲- بیشترین تأثیر مشاهده شده از فرآیند VAR بر روی خواص مکانیکی فولاد C۳۰۰ حاوی ۰/۶۵ wt% Ti که به روش VIM تولید شده است را می‌توان در افزایش ۳۰ درصدی داکتیلیته و ۴۷ درصدی مقاومت به ضربه آن برشمرد. در حالیکه تأثیر این فرآیند بر کاهش استحکام و سختی، چندان زیاد نیست.

۳- با افزایش تیتانیم از ۰/۶۵ به ۱ درصد وزنی مقادیر استحکام و سختی فولاد C۳۰۰ افزایش یافته ولی از انعطاف‌پذیری و مقاومت به ضربه آن کاسته شده است که این تغییرات چندان زیاد نیست.

### ۶- پی نوشت

- 1- Vacuum Arc Remelting
- 2- Vacuum Induction Melting
- 3- Subsize

- [14] G. Ghosh, "Secondary Steelmaking", ASM International, 2001.
- [15] V. K. Vasudevan, S. J. Kim, "Precipitation Reactions and Strengthening Behavior in 18% Nickel Maraging Steel", Metall. Trans. A, Vol. 21, pp. 2665-2668, 1990.
- [16] P. P. Sinha, K. T. Tharian, "Effect of aging on Microstructure and Mechanical Properties of Cobalt Free 250 Grade Maraging Steel", Material Science & Technology, Vol. 14, pp. 1-9, 1988.