

## مطالعه رفتار مکانیکی و گاززدایی از یک فولاد با چقرمگی بالا در حین انجام فرایند ذوب دوگانه

سیدرضا علمی حسینی مربی، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان

حسین عربی استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

فولادهای ماریجینگ 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 ماریجینگ مورد توجه بوده است. در این تحقیق فرآیند ذوب مجدد قوسی تحت خلاء بر روی دو فولاد ماریجینگ حاوی مقادیر ۰/۶۵ و ۱ درصد وزنی تیتانیوم 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 نرمی 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 تیتانیوم که به روش ذوب دوگانه (VIM + VAR) تولید شده‌اند، مشخص شد که افزایش تیتانیوم 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.

کلمات کلیدی: ذوب مجدد قوسی تحت خلاء، فولاد ماریجینگ C۳۰۰، ذوب القایی تحت خلاء، خواص مکانیکی، آخال، اتم‌های گازی.

## Study of mechanical behaviours and degassing of a high toughness steel during a double melting process

S. R. Elmi Hosseini Lecturer, Department of Materials Science and Engineering, University of Sistan & Baluchestan

H. Arabi Professor, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science & Technology

### Abstract

Maraging Steels are a group of steels having high strength and toughness. Presence of inclusions in these steels are harmful for their strength and toughness. Also, there are some active elements within these steels. Therefore, application of advanced melting, refining and casting processes such as vacuum processes are used greatly in production of maraging steels. In this research two C300 maraging steel with 0.65 and 1 wt% Ti were casted firstly in VIM furnace. Then samples subjected to VAR process in order to study the effects of this process on mechanical properties, inclusions content and gas atoms within the steel. The results show that during VAR process of the bars casted in VIM furnace, the total N and O gases reduced to 14%, ductility and resistance to impact increased up to 30% and 47% , respectively. Comparison of these two steels that produced by VIM+VAR showed that increasing of titanium from 0.65 to 1 wt% causes marginal increasing in strength and hardness and marginal decreasing in ductility and resistance to impact of steel.

**Keywords:** Vacuum Arc Remelting (VAR), C300 Maraging Steel, Vacuum Induction Melting (VIM), Mechanical Properties, Inclusion, Gas Atoms

۱- مقدمه

فولادهای ماریچینگ از جمله فولادهای با استحکام بسیار بالا محسوب می‌شوند که مقاومت خوبی در مقابل ضربه دارند. این فولادها نرمی مناسب و نیز قابلیت استفاده تا دماهایی بالاتر از دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد دارند. عناصری چون نیکل، کبالت، تیتانیوم، 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 مارتنزیتی این فولادها دارای سختی و استحکام پایین-تری نسبت به سایر فولادهای مارتنزیتی، ولی با پیرسازی این ساختار مارتنزیتی، استحکام و سختی آنها افزایش قابل توجهی می‌یابد [۱-۳].

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

نام عنصر	Fe	C	Al	Ti	Co	Mo	Ni
wt%	باقیمانده	<۰.۰۳	۰.۱	۰.۷	۹.۰	۵.۰	۱۸

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

فولاد مورد استفاده در این تحقیق از نوع ماریچینگ ۱۸ درصد نیکل کبالت‌دار 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 در بسیاری از صنایع جهت تولید آلیاژهای مرغوب که داشتن ساختار یکنواخت، استحکام خستگی و چقرمگی بالا مورد توجه می‌باشد، استفاده می‌شود. این فرآیند به دلیل داشتن قالبی آبرگرد، ساختار انجمادی جهت‌داری ایجاد می‌کند [۹-۷]. در این روش عامل قوس باعث شکست حرارتی آخال‌های اکسیدی و نبتزیدی موجود در فولاد شده و آنها را به طور یکنواخت در زمینه مارتنزیتی 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].

آخالها حاصل واکنش عناصری همچون اکسیژن، نیتروژن، گوگرد و کربن با عناصر فعال موجود در فولاد همچون تیتانیوم و آلومینیوم می‌باشد.

جدول ۲- خواص مکانیکی فولاد ماریچینگ C۳۰۰ در شرایط پیرسازی شده [۲].

چقرمگی شکست		درصد کاهش سطح مقطع		درصد ازدیاد طول در ۵۰ میلی‌متر		استحکام تسلیم		استحکام کششی نهایی		خواص مکانیکی
MPa.m <sup>1/2</sup>	Ksi.in <sup>1/2</sup>	مقطع	درصد	میلی‌متر	درصد	MPa	Ksi	MPa	Ksi	
۸۰	۷۳	۴۰	۷	۲۰۰۰	۲۹۰	۲۰۵۰	۲۹۷	مقدار		

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. %	$\log K_{CO} = -\frac{1160}{T} - 2.00$	$4.7 \times 10^{-4}$
		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 50% wt.% یا 500 ppm می‌باشد.

همانطور که در شکل ۱ مشخص است فرایند VAR باعث افزایش قابل ملاحظه ای در چقرمگی شکست فولاد ماریجینگ ذوب شده در هوا دارد. علاوه بر این چقرمگی شکست فولاد ماریجینگ ذوب شده در شرایط VIM+VAR بیشتر از تافنس شکست فولاد ذوب شده در شرایط Air Melting+VAR می-باشد [۱۵].

تحقیقات انجام شده بر روی خواص مکانیکی فولاد ماریجینگ ۱۸ درصد نیکل در دو حالت VAR و VIM+VAR نشان می دهد که انجام فرایند VAR بعد از VIM باعث افزایش تقریباً دو برابری درصد ازدیاد طول، درصد کاهش سطح مقطع و نیز استحکام ضربه در فولاد ماریجینگ نسبت به حالت VAR می شود. این مقایسه در جدول ۶ آورده شده است [۱۶].

جدول ۶- مقایسه خواص مکانیکی فولاد ماریجینگ ۱۸ درصد نیکل در دو حالت VAR و VIM+VAR [۱۶]

Material	0.2% Proof-stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	U.T.S. (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation on 4√A (%)	Reduction of area (%)	Izod mkg
Single vacuum arc melted (mean of 10 casts)	172	182	5.5	12.9	0.78
Double vacuum melted (vacuum induction-vacuum arc) (mean of 42 casts)	172	183	9.2	30.7	1.83

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا دو شمش در کوره ذوب القایی تحت خلاء تولید شده و سپس در کوره VAR ذوب مجدد شدند. مشخصات این دو ذوب در جدول ۷ آورده شده است. این دو ذوب به ترتیب دارای 0.65 و 1 درصد وزنی تیتانیوم می باشند. شمش های ریخته شده در کوره VAR به صورت تسمه ای با ابعاد 1.5×2.5×13.5 cm و وزن تقریبی ۲۹۰ گرم می باشد. نمایی از این شمش ها در شکل ۲ آورده شده است.

آنچه به عنوان درصد وزنی عناصر در جدول ۷ ذکر شده است، نتیجه انجام آنالیز کوانتومتری قبل و بعد از فرایند VAR می باشد. در این جدول عدد سمت راست آنالیز عنصر بعد از فرایند VAR و عدد سمت چپ آنالیز عنصر قبل از فرایند می-باشد.

مهمترین آخالهای موجود در فولادهای ماریجینگ عبارتند از: آخالهای کاربید، نیتريد، کربونیتريد و سولفید تیتانیوم، AIN، ZrN و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به طور کلی آخال های غیر فلزی کشیده به عنوان مخرب ترین نوع آخال در فولادها به شمار می روند، چون با داشتن گوشه هایی تیز محل مناسبی برای جوانه زنی ترک بوده و باعث کاهش استحکام و چقرمگی فولاد می شوند. در فولادهای ماریجینگ و در میان آخال های اکسیدی، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> مهم ترین آخال اکسیدی می باشد [۸]. در جدول ۴ روند کاهش مقدار عناصر مضر کربن، گوگرد، نیتروژن و اکسیژن موجود در فولادهای ماریجینگ در اثر استفاده از فرآیندهای ذوب تحت خلاء و ذوب اتمسفری نشان داده شده است [۱۵].

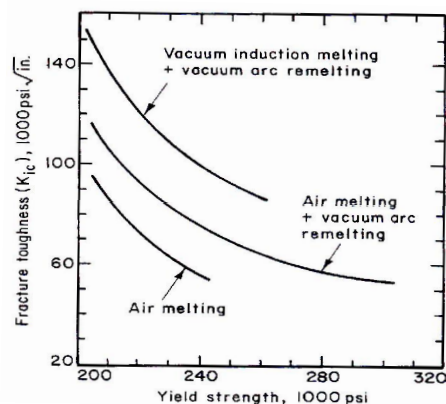
جدول ۴- مقایسه عناصر مضر موجود در فولادهای ماریجینگ با استفاده از روشهای ذوب در هوا و ذوب در خلاء [۱۵]

مقدار عنصر در فرایندهای ذوب مختلف (ppm)	عناصر ناخالصی مضر	
	ذوب اتمسفری	روشهای ذوب در خلاء
کربن	۳۰۰	۲۰
گوگرد	۱۳۰	۳۰
اکسیژن	۱۰۰	۲۰
نیتروژن	۱۰۰	۲۰

در ابتدا با استفاده از روش ذوب در هوا اندازه بزرگترین آخال اکسیدی در فولاد ماریجینگ ۲۶۰ میکرون بود که با استفاده از روشهای ذوب و تصفیه پیشرفته تر این اندازه کاهش یافت (جدول ۵) [۱۵].

جدول ۵- مقایسه ابعاد آخال های اکسیدی در فولادهای ماریجینگ با استفاده از فرایندهای جدید ذوب [۱۵]

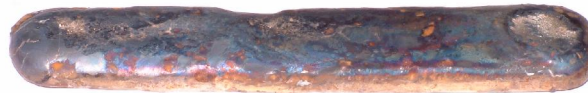
روش ذوب	اندازه بزرگترین آخال اکسیدی (μm)
VIM+VAR	۱۶۳
VIM+ESR	۱۰۲
VIM+EB	۲۳



شکل ۱- تأثیر فرآیندهای VAR و VIM بر بهبود چقرمگی شکست فولادهای ماریجینگ [۱۵]

جدول ۷- مشخصات ذوب‌های انجام شده در این تحقیق

درصد وزنی عناصر												شرایط	شرایط	درصد	ردیف
S		C		Co		Mo		Ti		Ni		ثانویه	اولیه	تقریبی	
قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	قبل از	بعد از	ذوب	ذوب	تیتانیوم	
VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VAR	VIM	(wt%)	
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 ۲- نمایی از شمش‌های ریخته شده در کوره VAR

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، صیقلی شدند. آزمایش کشش توسط دستگاه کشش تک‌محوری مدل Instron 8502 با ظرفیت 30 تن و با سرعت فک 2 mm/min انجام گرفت. نمونه‌های ضربه مطابق استاندارد ASTM A 370 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 نهایی 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 300 ژول بود. عملیات سختی‌سنجی با استفاده از روش راکول-سی 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 1-0.5 گرم تهیه شد. سپس با استفاده از دستگاه Rosemount N-O Analyser 5003 میزان گازهای موجود در آن مورد بررسی قرار گرفت.

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 3 آنالیز می‌باشد.

در این تحقیق جهت ذوب و آلیاژ سازی فولاد ماریچینگ از یک کوره VAR با مقیاس آزمایشگاهی استفاده شد. مشخصات این کوره در جدول ۸ ارائه شده است.

بعد از فرآیند ذوب مراحل ذیل بر روی شمش ریخته شده انجام گردید:

الف- همگن‌سازی: در دمای 12000 درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان ۲ ساعت به منظور از بین بردن جدایش عناصر آلیاژی، حذف آخال‌ها و نیز بهبود مورفولوژی آنها.

ب- نورد گرم: 60% کاهش سطح مقطع به منظور افزایش استحکام و بلافاصله کوئنچ در آب.

ج- آنیل محلولی: در دمای 820 درجه سانتی‌گراد و به مدت زمان یک ساعت به منظور حذف تنش‌های ناشی از نورد گرم.

د- پیرسازی: در دمای 500 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 ۳) و به صورت صفحه‌ای تهیه شدند. به این منظور از

جدول ۸- مشخصات کوره VAR مورد استفاده در این تحقیق

مدل کوره	حداکثر توان اعمالی	جنس و نوع الکترود	جنس قالب	ظرفیت قالب	فشار خلاء (Pa)	دمای قوس (°C)	فشار گاز آرگن (Pa)
ALD LK ۶/۴۵	۶۰۰ kW	تنگستن و غیر مصرفی	مسی آبگرد	۴۰۰ گرم	$۱ \times 10^1 \pm ۳$	$۲۰ \pm ۲۵۰۰$	$۱۰^۵ \times ۰.۱ \pm ۱.۳$

مواد اولیه از شمش حاوی 1 wt% Ti، امکان ارائه اطلاعات مربوط به خواص مکانیکی این شمش در حالت VIM موجود نبود.

در جدول ۱۰ تأثیر فرآیند VAR بر کاهش (↓) یا افزایش (↑) خواص مکانیکی فولاد C<sub>300</sub> حاوی 0.65 wt% Ti که با روش VIM تولید شده، ارائه شده است.

منحنی کشش مهندسی فولاد C<sub>300</sub> حاوی 0.65 wt% Ti که به روش‌های VIM و دوگانه (VIM + VAR) تولید شده در شکل ۳ ارائه شده است.

بررسی تأثیر فرآیند VAR بر خواص مکانیکی فولاد C<sub>300</sub> تولید شده به روش VIM در شکل‌های ۴-الف تا ۴-د آورده شده است. با توجه به این شکل‌ها و نیز جدول ۱۰ مشاهده می‌شود که انجام فرآیند VAR باعث تغییرات ذیل بر روی فولاد C<sub>300</sub> حاوی 0.65 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

در این دستگاه نمونه‌های کوچک آماده شده در بوته‌های گرافیتی تا دمای 3000 درجه سانتی‌گراد حرارت داده 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 C<sub>300</sub> تولید شده به روش VIM

جهت بررسی تأثیر فرآیند VAR بر خواص مکانیکی فولاد C<sub>300</sub> تولید شده به روش VIM آزمون‌های کشش، ضربه و سختی بر روی دو عدد شمش VAR شده جدول ۷ انجام گرفت. اطلاعات به دست آمده از این آزمون‌ها به همراه اطلاعات قبل از انجام فرآیند VAR بر روی شمش حاوی 0.65 درصد وزنی تیتانیوم در جدول ۹ ارائه شده است. این جدول تأثیر تیتانیوم بر خواص مکانیکی فولاد ماریچینگ C<sub>300</sub> تولید شده به روش VIM + VAR را نیز بیان می‌کند. متأسفانه به دلیل کمبود

جدول ۹- مقادیر خواص مکانیکی فولادهای C<sub>300</sub> 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 <sup>2</sup> )	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	۱

جدول ۱۰- تأثیر فرآیند VAR بر کاهش (↓) یا افزایش (↑) خواص مکانیکی فولاد C<sub>300</sub> حاوی 0.65 wt% Ti تولید شده به روش

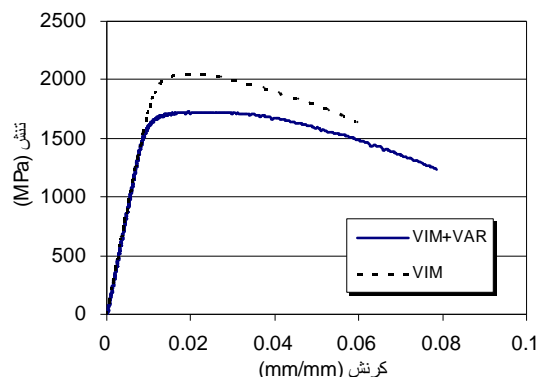
#### VIM (%)

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

با توجه به اینکه این فرآیند دارای قالبی آبگرد 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 ۷). 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 بدین‌وسیله باعث افت استحکام 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.

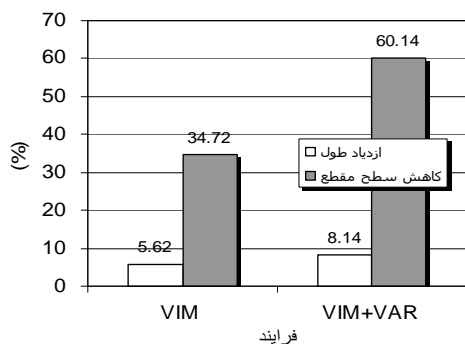
فرآیند VAR باعث اصلاح آخال‌ها شده (شکل ۵) که در نتیجه آن داکتیلیته فولاد تا 30% بالا رفته است.



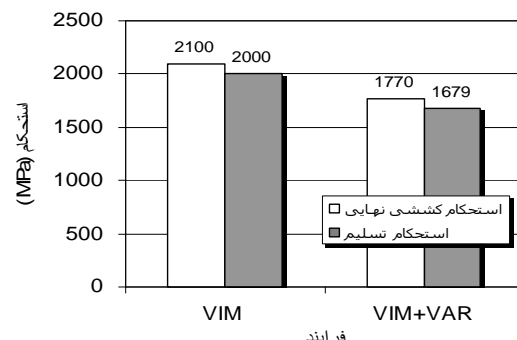
شکل ۳- تأثیر فرآیند VAR بر منحنی کشش فولاد C<sub>300</sub> حاوی 0.65 wt% Ti تولید شده به روش VIM

در شکل ۵ توزیع آخال‌های موجود در فولاد C<sub>300</sub> 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.

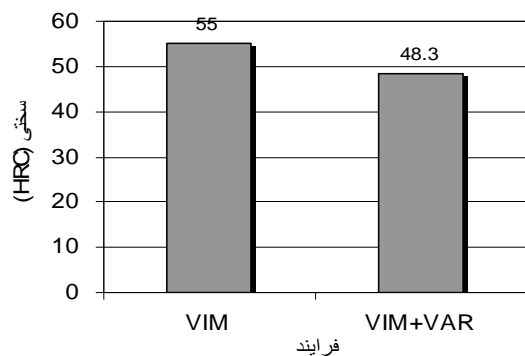
علت تغییرات خواص مکانیکی در اثر انجام فرآیند VAR را می‌توان اینگونه بیان کرد:



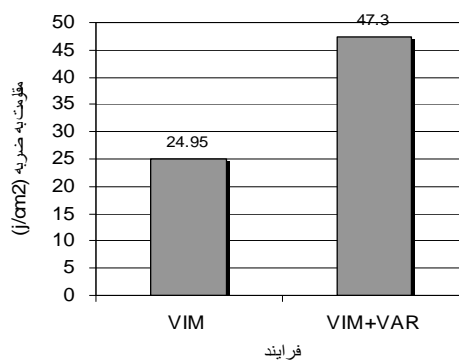
(ب)



(الف)

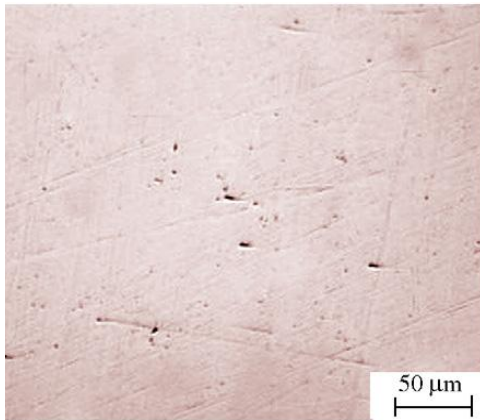


(د)

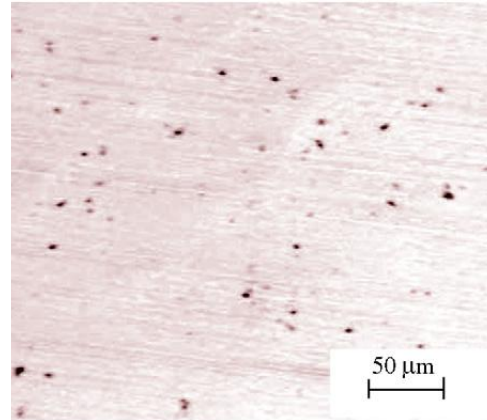


(ج)

شکل ۴- تأثیر فرآیند VAR بر (الف) استحکام، (ب) انعطاف‌پذیری، (ج) مقاومت به ضربه و (د) سختی فولاد C<sub>300</sub> حاوی 0.65 درصد وزنی تیتانیوم تولید شده به روش VIM



(ب)



(الف)

شکل ۵- شمایی از مقدار، اندازه و توزیع آخال‌های موجود در شمش ریخته‌گری شده با روش‌های (الف) VIM و (ب) VIM + VAR

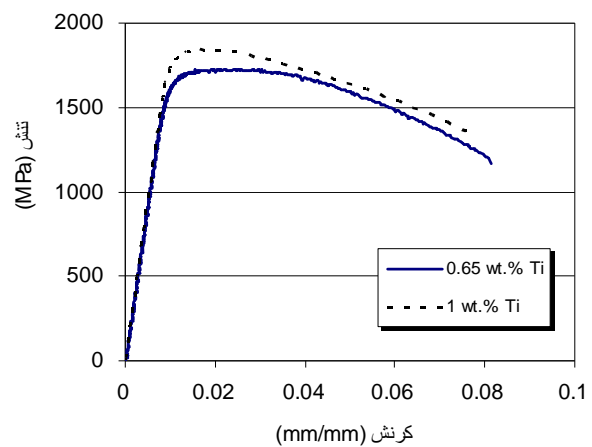
تسلیم، درصد ازدیاد طول، درصد کاهش سطح مقطع، مقاومت به ضربه و سختی این دو فولاد ارائه شده است. در جدول ۱۱ تأثیر افزایش مقدار تیتانیوم از 0.65 تا 1 درصد وزنی بر درصد کاهش (↓) یا افزایش (↑) خواص مکانیکی فولاد C۳۰۰ تولید شده به روش VIM + VAR نشان داده شده است. علت تغییرات خواص مکانیکی با افزودن مقدار تیتانیوم 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 ماریچینگ 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 0.65 به 1 درصد وزنی باعث تغییرات اندکی در خواص مکانیکی این فولاد شده است.

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

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

در شکل ۸ تأثیر فرآیند VAR بر کاهش اتم‌های اکسیژن و نیتروژن موجود در فولاد C۳۰۰ حاوی 0.65 wt% Ti که به روش VIM تولید شده، ارائه گردیده است. بر اساس این شکل



شکل ۶- تأثیر افزایش تیتانیوم بر منحنی کشش فولاد C۳۰۰ تولید شده به روش VIM + VAR

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 47% 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 12% کم شده است.

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

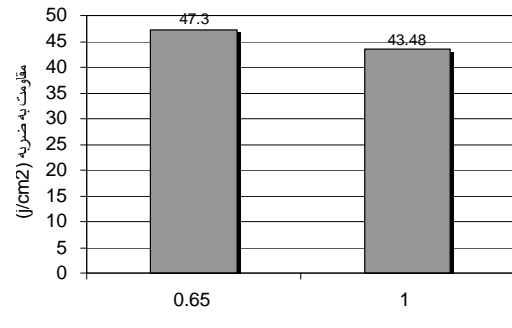
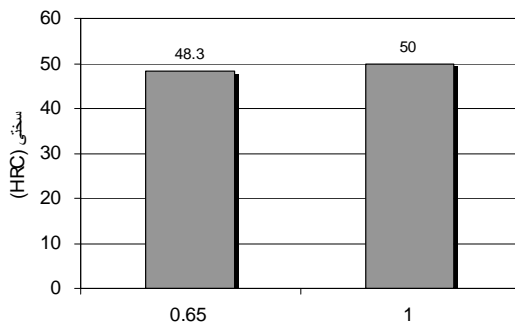
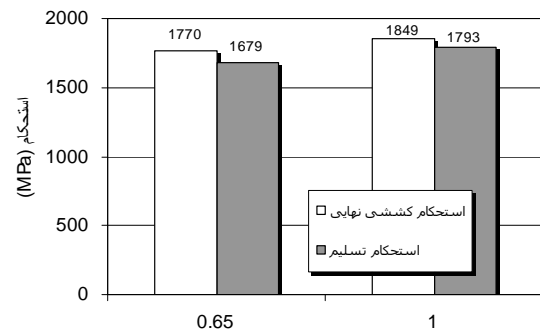
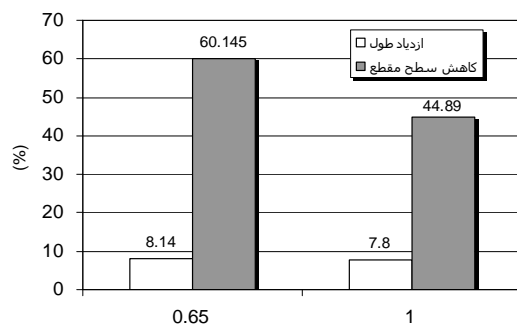
#### C۳۰۰ تولید شده به روش VIM + VAR

منحنی کشش مهندسی فولاد C۳۰۰ حاوی مقادیر 0.65 و 1 درصد وزنی تیتانیوم که به روش ذوب دوگانه (VIM + VAR) تولید شده‌اند در شکل ۶ آورده شده است. در شکل‌های ۷- الف تا ۷- د مقایسه دقیق‌تری از استحکام کششی، استحکام

قوس باعث شکست حرارتی آخال‌های موجود در فولاد شده و اندازه آنها را کاهش می‌دهد. علاوه بر شکست حرارتی، بخشی از آخال‌ها 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 "خلاء" به بیرون از محیط ذوب هدایت می‌شوند.

فرآیند VAR باعث کاهش ۱۴ درصدی در مجموع محتوای اکسیژن و نیتروژن فولاد C<sub>300</sub> تولیدی به روش VIM شده است.

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 ایجادکننده گرما، القا است. قوس به مراتب حرارت لحظه‌ای بیشتری نسبت به القا ایجاد می‌کند. اعمال



شکل ۷- مقایسه (الف) استحکام، (ب) انعطاف‌پذیری، (ج) مقاومت به ضربه و (د) سختی دو فولاد C<sub>300</sub> حاوی 0.65، 1 درصد وزنی تیتانیوم تولید شده به روش VIM + VAR

جدول ۱۱- تأثیر افزایش مقدار تیتانیوم از 0.65 تا 1 درصد وزنی بر درصد کاهش (↓) یا افزایش (↑) خواص مکانیکی فولاد C<sub>300</sub> 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 ↓



[3] S.R. Elmi Hosseini, H. Arabi, "Change in Mechanical Properties by Titanium Addition in Aged Martensitic 18Ni-9Co-5Mo Alloy", ISIJ International, Vol. 52, No.1, Jan. 2012, PP. 154-157.

[۴] سید رضا علمی حسینی، حسین عربی، "ارتباط بین مقدار تیتانیوم و کاهش اتمهای گازی موجود در فولاد-18Ni-9Co-5Mo تولید شده به روش ذوب مجدد قوسی تحت خلاء"،

سمپوزیوم فولاد، شرکت سهامی ذوب آهن اصفهان، ۱۳۸۹

[5] R. F. Decker, "Source Book on Maraging Steel", ASM International, 1978.

[6] ASM Metals Handbook, 10th ed., Vol. 1, ASM International, pp. 793-800, 1991.

[7] S. Floreen and A.M. Bayer, "Development and Commercialization of Cobalt Free Maraging Steel, Proc. of Conf. on Maraging Steel, 1988, PP.39-54.

[8] 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.

[9] E. Nes, G. Thomas, "Precipitation of TiC in Thermally Embrittled Maraging Steels", Metall. Trans. A, Vol. 7, pp. 974-977, 1976.

[10] R. F. Decker, J. T. Each, "18% Nickel Maraging Steel", Trans. Of ASM, Vol. 55, pp. 58-76, 1962.

[11] W. M. Garrison, "Mraging steels: Structure toughness relationship", Proc. of conf. on maraging stee, 1988, PP. 177-211.

[12] 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.

[13] 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.

[۱۴] س. ر. علمی حسینی، ح. عربی، ح. رضوی زاده، "بررسی

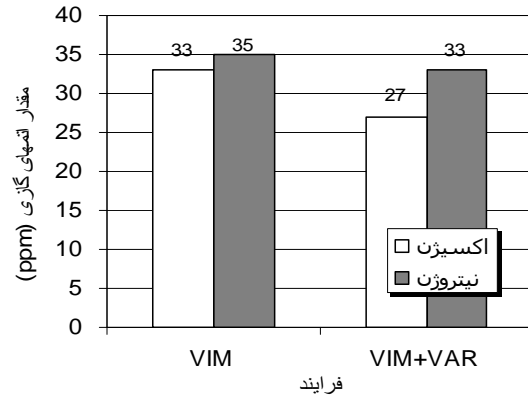
نحوه تولید آلیاژهایی با قابلیت عملکرد بالا به روش ذوب مجدد قوسی تحت خلاء"، مجله مهندسی متالورژی، سال نهم، شماره ۲۴، بهار و تابستان ۱۳۸۵.

[15] R.F.Decker and S. Floreen, "Maraging Steels-The first 30 years", Proc. of conf. on Maraging steel, 1998, PP.1-30

[16] O. Winkler, R. Bakish, "Vacuum Metallurgy", Elsevier Publishing Company, 1971.

#### بی نوشت

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



شکل ۸- تأثیر فرآیند VAR بر کاهش مقدار اتمهای اکسیژن و نیتروژن موجود در فولاد C<sub>300</sub> حاوی 0.65 wt% Ti تولید شده به روش VIM

#### ۴- نتیجه گیری

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

۲- بیشترین تأثیر مشاهده شده از فرآیند VAR بر روی خواص مکانیکی فولاد C<sub>300</sub> حاوی 0.65 wt% Ti که به روش VIM تولید شده است را می توان 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 تیتانیوم از 0.65 به 1 درصد وزنی مقادیر استحکام و سختی فولاد C<sub>300</sub> افزایش یافته ولی از انعطاف پذیری و مقاومت به ضربه آن کاسته شده است که این تغییرات چندان زیاد نیست.

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

#### مراجع

[۱] س. ر. علمی حسینی، ح. عربی، ح. رضوی زاده، "بررسی تأثیر مقدار تیتانیوم بر خواص مکانیکی و رفتار آخالهای موجود در فولاد ماریچینگ رده C<sub>300</sub> تولید شده به روش VAR"، دهمین کنگره سالانه انجمن مهندسی متالورژی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۵.

[۲] س. ر. علمی حسینی، ح. عربی، "مقایسه خواص مکانیکی یک فولاد فوق مستحکم تولید شده به دو روش ذوب دوگانه"، چهارمین کنفرانس مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و انجمن علمی ریخته گری ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران،