

## تأثیر تیتانیوم بر خواص مکانیکی فولاد میکروآلیاژی پر استحکام

اسدالله حرانی<sup>۱</sup> - سید خطیب الاسلام صدرنژاد<sup>۲</sup>

۱ - دفتر تحقیق و توسعه شرکت فولاد خوزستان ۲ - دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف

### چکیده

به منظور بررسی تأثیر تیتانیوم (تا ۰/۲۵٪)، بر اندازه دانه‌ها و خواص مکانیکی در جهات موازی و عمود بر راستای نورد، در فولاد کم کربن پر استحکام، نمونه‌های فولاد میکروآلیاژی، به دو روش پرتابی و تریپتی ساخته شده و مورد بررسیهای متالوگرافی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی اسکینینگ (SEM) و میکروآنالیز با اشعه ایکس قرار گرفت. مشاهده شد که رشد دما-بالای دانه‌ها، در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم کمتر از فولادهای ساده کربنی است. ذرات رسوب نیتريد و کربونیتريد تیتانیوم در زمینه فریت در تمام حالات ریخته شده، عملیات حرارتی شده و نورد شده مشاهده گردید. این ذرات بعنوان مسبب اصلی ریز شدن دانه، رسوب - سختی فاز فریت، بالا رفتن استحکام کششی، افزایش حد تسلیم، افزایش سختی و کاهش درصد ازدیاد طول نسبی معرفی شدند. مطالعات میکروسکوپ الکترونی، همچنین نشانگر جایگزینی ذرات کروم و سرب کربوسولفید تیتانیوم  $[(Ti,Fe,Mn)_4C_2S_2]$  بجای ذرات شکل - پذیر سولفید منگنز بود که باعث یکنواخت تر شدن خواص، در جهات مختلف، بویژه در هنگام نورد می‌شد.

## مقدمه

بهبود قابل توجه خواص مکانیکی فولاد ساده کربنی در اثر افزایش تیتانیوم، کاربرد این فولاد را در دهه‌های اخیر توسعه داده است [۱-۴]. استحکام تسلیم کافی (۳۵۰ تا ۷۵۰ مگاپاسکال)، مقاومت در برابر شکست ترد، شکل‌پذیری سرد و جوش‌پذیری خوب، به علت ریزش‌دهی دانه‌های فریت و فرایند رسوب‌سختی طی عملیات نورد کنترل شده [۵-۷]، در اثر حضور تیتانیوم [۸-۱۱]، سبب ورود این فولاد به صنایع خودرو، نفت، ساختمان و دریا شده است [۱۲-۱۴].

تحقیقات قبلی نشان داده است که استفاده از فولاد کم‌آلیاژی تیتانیوم‌دار در خودروهایی سنگین [۱۵، ۱۶] و سبک [۱۷]، سبب کاسته شدن از وزن و صرفه‌جویی در سوخت می‌شود. از این فولاد همچنین می‌توان برای ساخت پل، ریل، کشتی، ساختمان، کامیون، دکل، محور، میل‌لنگ، میل‌فرمان، میل‌گاردان، شاسی، دیسک، چرخ‌دنده، لوکوموتیو، مخزن، لوله، دیگ‌بخار و سازه‌های ساحلی استفاده کرد [۱۶-۲۰]. مشکل اساسی در تولید فولاد میکروآلیاژی تیتانیوم‌دار، بازدهی جذب کوچک همراه با اتلاف تیتانیوم است. اتلاف تیتانیوم عمدتاً به نحوه افزودن آن بستگی دارد. یک روش مناسب، قرار دادن تیتانیوم در قوطیهای فولادی و غوطه‌ور ساختن قوطیها در فلز مذاب است [۲۱، ۲۲]. برای افزایش بازدهی، قوطیها را می‌توان درون مذاب چرخاند یا آنکه مذاب را بهم زد. روش دیگر پرتاب قطعات تیتانیوم‌دار بداخل فلز مذاب است. از روشهای ابتکاری دیگری همچون تزریق سیم و شلیک گلوله نیز برای افزودن تیتانیوم می‌توان استفاده کرد که شرح برخی از آنها در مراجع علمی آمده است [۱۴، ۲۱، ۲۲].

در این تحقیق، فلز حاوی تیتانیوم به دو شیوه پرتابی و تزریقی به فولاد مذاب اضافه گردید و بازدهی جذب اندازه گرفته شد. مشاهده شد که علاوه بر روش افزودن، عوامل دیگری همچون زمان، فرکانس و مشخصات ماده تیتانیوم‌دار نیز بر بازدهی جذب تأثیر دارند. میزان این تأثیرات در این مقاله بررسی می‌شود.

## روش تحقیق

فولاد ساده کربنی، دارای ۰/۰۷-۰/۰۵۵٪ کربن، ۰/۰۰۳٪ سیلیسیوم، ۰/۰۴٪ گوگرد، ۰/۰۴۵٪ فسفر و ۰/۵۴۵٪ منگنز، بعنوان بار اولیه برای ساخت فولاد میکروآلیاژی تیتانیوم‌دار، در یک بوته سرامیکی ذوب شد. سپس دمای فلز مذاب، تا  $1650^{\circ}\text{C}$  افزوده شد. مقدار مشخصی فروتیتانیوم ۸۰ درصد، لای فویل نازک آلومینیوم پیچیده شده و در لوله‌ای به قطر ۶ میلیمتر، قرار داده شد. دو طرف لوله، از طریق کوبش بنحوی بسته شد که هوا نتواند وارد لوله شود. سپس لوله به دو عدد گیره بلبرینگ‌دار بصورت عمودی محکم

گردیده و وارد فلز مذاب شد. در روش دوم، قطعات فروتیتانیوم ۸۰ درصد، بطور دستی به سطح مذاب پرتاب شدند.

فولاد مذاب، پس از تکمیل فرایند تزریق یا پرتاب، در قالب فلزی پیش گرم شده ریخته گری شده و منجمد شد. حداقل چهار نقطه متفاوت روی سطح هر نمونه انتخاب و توسط کوآتومتر آنالیز شد. میانگین ارقام بدست آمده، بعنوان ترکیب شیمیایی هر نمونه گزارش شد. ترکیب شیمیایی نمونه‌ها، از یکنواختی خوبی برخوردار بوده و حداکثر یک صدم درصد اختلاف در ترکیب آنها دیده وجود داشت [۲۳]. برای اندازه گیری نیتروژن حل شده در هر نمونه، از «گازکروماتوگرافی» و روش «هسته‌ای» استفاده شد. نتایج تجزیه شیمیایی در جدول ۱ داده شده است.

### نتایج و بحث

تأثیر شرایط آزمایش بر بازدهی جذب تیتانیوم، در جدول ۲ داده شده است. محدوده تغییر پارامترهای مؤثر در این جدول فهرست شده‌اند. یکی از این عوامل، زمان آلیاژ سازی است که با افزایش آن، مقدار جذب کاهش می‌یابد. علت این موضوع، میل ترکیبی شدید تیتانیوم با اکسیژن است که سبب اکسید شدن تیتانیوم و خروج آن از فلز می‌شود. از مقایسه آزمایشهای ۱۵، ۱۶، ۹ و ۶ می‌توان تأثیر افزایش زمان آلیاژ سازی را بر مقدار جذب تیتانیوم مشاهده کرد. در آزمایش شماره ۱۵، با زمان آلیاژ سازی ۳۵ ثانیه، میزان جذب به صد درصد می‌رسد؛ ولی در آزمایش شماره ۱۶، با افزایش این زمان به ۵۰ ثانیه، میزان جذب به ۹۰ درصد کاهش می‌یابد. در آزمایشهای شماره ۹ و ۶، با زمانهای آلیاژ سازی ۲ و ۳ دقیقه، میزان جذب به ترتیب تا ۸۲ درصد و ۶۵ درصد تقلیل می‌یابد. مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که بازدهی جذب، به علت میل ترکیبی شدید تیتانیوم با اکسیژن، بشدت تابع زمان آلیاژ سازی است. اثر افزایش زمان آلیاژ سازی بر میزان جذب تیتانیوم، در شکل ۱ نشان داده شده است.

از پارامترهای مهم دیگر، فرکانس دوران لوله محتوی ماده میکروآلیاژ است. برای مثال، بازدهی جذب تیتانیوم در آزمایش شماره ۹، که بدون دوران لوله محتوی ماده میکروآلیاژ انجام شده، ۸۲/۴۵٪ است. در حالیکه با انجام دوران با فرکانس ۱۲ دور در دقیقه، در آزمایش شماره ۸، بازدهی جذب، به ۹۱٪ و با افزایش فرکانس به ۱۵ دور در دقیقه، در آزمایش شماره ۱۴، این میزان به ماکزیمم مقدار خود یعنی ۹۳٪ می‌رسد. با افزایش بیشتر دوران در آزمایشهای شماره ۱۳ و ۱۲، میزان جذب مجدداً کاهش می‌یابد. این تغییرات در شکل ۲ نشان داده شده است. توجه کنید که زمان دوران در تمام آزمایشها، ۲ دقیقه بوده است. برای توجیه علت کاهش میزان جذب، در اثر افزایش فرکانس دوران، از رابطه ۱ می‌توان کمک گرفت

[۲۴،۲۳]:

$$Z - Z_0 = C \omega_0^2 \quad (1)$$

$\omega_0$ : سرعت زاویه‌ای لوله محتوی ماده میکروآلیاژ،

C: ثابت،

Z: ارتفاع مذاب در بوته بدون دوران مذاب و

$Z_0$ : فاصله کف بوته تا ته گردابه حاصل از دوران لوله محتوی ماده میکروآلیاژ.

رابطه فوق نشان می‌دهد که با افزایش  $\omega_0$ ،  $Z - Z_0$  افزایش پیدا می‌کند. یعنی عمق گردابه تشکیل شده در سطح مذاب بیشتر شده و سطح آزاد مذاب با هوا افزایش می‌یابد که باعث اکسید شدن بیشتر تیتانیوم و کاهش بازدهی جذب می‌شود. افزایش بازدهی جذب تیتانیوم در فرکانسهای پایین، به سبب سریعتر حل شدن فروآلیاژ در اثر افزایش سرعت انتقال جرم و نفوذ ماده حل شدنی در فاز مذاب است.

مقایسه میزان جذب در آزمایشهای انجام شده با تیتانیوم ۹۹/۱۹۶٪ (آزمایشهای ۱ و ۲) و فروتیتانیوم ۸۰٪ (آزمایشهای ۴ و ۶ تا ۱۶)، نشان می‌دهد که میزان جذب در آزمایشهای نوع دوم بمراتب بیشتر است. علت این موضوع، میل ترکیبی شدید تیتانیوم با اکسیژن است که سبب اکسید شدن تیتانیوم حین آلیاژسازی می‌شود. لذا برای جلوگیری از اکسید شدن تیتانیوم، در آزمایشهای ۲ و ۱۰، از اتمسفر کنترل شده بوسیله گاز آرگون بادی ۳/۳ لیتر بر دقیقه استفاده شد. اما نه تنها میزان جذب افزایش نیافت، بلکه کاهش شدیدی را نیز بعضاً نشان داد (۱/۷٪ در آزمایش ۲) که بنظر می‌رسد به علت خالص نبودن گاز آرگون مورد استفاده بوده است. بنابراین نتیجه گرفته شد که تحت شرایط عادی، برای ساختن فولاد تیتانیوم دار، بهتر است بجای استفاده از تیتانیوم خالص، از فروتیتانیوم استفاده شود.

نحوه اضافه کردن تیتانیوم به فلز مذاب نیز از پارامترهای مهمی بود که بر بازدهی جذب تیتانیوم تأثیر داشت. برای بررسی این تأثیر، نتایج حاصل از اجرای دو روش تزریقی (آزمایش شماره ۹) و پرتابی (آزمایش شماره ۱۱) را با یکدیگر مقایسه کردیم. در آزمایش شماره ۹، با زمان آلیاژسازی دو دقیقه و تزریق فروتیتانیوم توسط لوله، بازدهی جذب ۸۲/۴۵٪ بود، در صورتیکه در آزمایش شماره ۱۱، با شرایط و زمان آلیاژسازی مشابه، بازدهی جذب ۶۴/۶٪ درصد بود (جدول ۲).

### جمع بندی

- ۱- با افزایش زمان آلیاژسازی، بازدهی جذب تیتانیوم به شدت کاهش می‌یابد.
- ۲- افزودن فروتیتانیوم بجای تیتانیوم خالص، باعث افزایش بازدهی جذب می‌شود.

۳- به لحاظ محافظت بهتر هنگام تزریق توسط لوله، روش تزریقی، نتایج بهتری از روش پرتابی بدست می‌دهد.

۴- افزایش فرکانس دوران تا ۱۶ دور در دقیقه، باعث افزایش بازدهی جذب می‌شود؛ درحالیکه بیشتر شدن فرکانس، بازدهی جذب را کاهش می‌دهد.

۵- فشار جزئی اکسیژن، تأثیر بسزایی بر بازدهی جذب تیتانیوم دارد؛ اما استفاده از آرگون تصفیه نشده، به سبب ناخالصیهای موجود در آن، سبب افزایش اکسیداسیون و کاهش بازدهی می‌شود.

### تشکر و قدردانی

بدینوسیله از کادر فنی آزمایشگاه متالورژی استخراجی، آزمایشگاه شکل دادن فلزات و کارگاه پروژه دانشکده مهندسی متالورژی دانشگاه صنعتی شریف به خاطر همکاری در تهیه و ساخت نمونه‌های آزمایشی و از مسئول آزمایشگاه جهاد خودکفائی سپاه، به سبب تجزیه شیمیایی نمونه‌ها به روش کوانتومتری و از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف به لحاظ تأمین امکانات مالی تحقیق سپاسگزاری می‌شود.

### مراجع

1. K. Sadrnezhaad, "Effect of Inoculation on Microstructure and Properties of C-Mn and Low Alloy Steels": *Journal of Engineering, I. R. of Iran*, Vol. 4, Nos. 1&2, (1991), pp 65 - 72.
- ۲ - صدرنژاد، "بررسی خواص و روش ساخت فولادهای میکروآلیاژی": کارنامه پژوهشی شریف، (۱۳۷۱)، صص ۴۶۰ - ۴۶۴.
3. S. Devaraj, Y. Dake and T. Chandra, "Effect of Copper on Austenite Recrystallisation in Ti and Ti-Nb Microalloyed Steels", *Recrystallization' 90*, TMS, (1990), pp 237-244.
4. J. Lessells, "Use of Microalloying Elements to Improve Mechanical Properties in Plates", *Proc. of Inter. Conf. on HSLA Steels' 85*, 4-8, Nov. 1985, Beijing, pp 613-626.
5. R. B. G. Yeo, A. G. Melville, "Properties and Control of Hot-rolled Steels", *J. Metals*, (June 1968), pp 33-43.
6. L. Hyspecka and K. Mazanec, "Strengthening Structural Steels by

Thermomechanical Treatment", *Proc. of Third Inter. Conf. on the Strength of Metals and Alloys*, Vol. 1, Cambridge, 20-25 August 1973, pp 375-379.

7. B. Dogan, L. E. Collins and J. D. Boyed, "Effects of Thermomechanical Processing on the Microstructure and Mechanical Properties of Ti-V-N Steel", *Metall. Transactions*, Vol. 19A, (May. 1988), pp 1221-1234.

8. A. T. Davenport, L. C. Brossard and R. E. Miner, "Precipitation in Microalloyed HSLA Steels", *J. Metals*, (June 1975), pp 21-27.

9. K. J. Irvine and F. B. Pickering, "Low-carbon Steels with Ferrite-pearlite Structures", *JISI*, (Nov. 1963), pp 944-959.

10. K. J. Irvine, F. B. Pickering and T. Gladman, "Grain-refined C-Mn Steels", *JISI*, (February 1967), pp 161-182.

11. F. B. Pickering, "The Spectrum of Microalloyed High Strength Low Alloy (HSLA) Steels", *Proc. of Inter. Conf. on Technology and Applications of HSLA Steels*, (3-6 October 1983), Philadelphia, pp 1-31.

12. L. F. Porter and P. E. Repas, "The Evolution of HSLA Steels", *J. Metals*, (April 1982), pp 14-21.

13. I. Kozasu, "Recent Development of Microalloyed Steel Plate", *Proc. of Inter. Conf. on Technology and Application of HSLA Steels*, (3-6 October 1983), Philadelphia, pp 593-607.

14. H. Stuart and B. L. Jones, "A Perspective on Microalloyed Steels", *J. Metals*, (April 1983), pp 17-20.

15. H. Yong-Kang, "Development and Production of Titanium Steels", *Proc. of Inter. Conf. on HSLA Steels' 85*, (4-8, Nov. 1985), Beijing, pp 627-631.

16. L. Meyer, "Effects and Present Applications of the Microalloying Elements Nb, V, Ti, Zr and B in HSLA Steels", *Proc. of Inter. Conf. on HSLA Steels' 85*, (4-8, Nov. 1985), Beijing, pp 29-44.

17. J. G. Williams, "Titanium Microalloyed Hot Rolled Strip Steels - Production,

Properties and Applications", *Proc. of Inter. Conf. on Technology and Application of HSLA Steels*, (3-6, October 1983), Philadelphia, pp 261-275.

18. C. L. Magee, R. G. Davies and P. Beardmore, "Factors Influencing Automotive Application of HSLA Steels", *J. Metlas*, (Nov. 1980), pp 28-35.

19. A. P. Coldren and T. G. Oakwood, "A New Economical X-70 Line Pipe Steel", *J. Metals*, (April 1983), pp 28-34.

20. N. J. Kim, "The Physical Metallurgy of HSLA Line Pipe Steels - A Review", *J. Metlas*, (April 1983), pp 21-27.

21. J. S. Yu and J. Z. Chen, "Recent Progress of Rare Earth Treated Steel in China", *J. Metals*, (March 1985), pp 55-58.

۲۲. س. خ. صدرنژاد، س. ف. کاشانی بزرگ و س. حشمتی منش، "تولید فولاد میکروآلیاژی وانادیوم دار و نیوبیوم دار به روش غوطه‌ور سازی و بررسی خواص آن"، نشریه دانشکده فنی، (۱۳۶۸)، صص ۴۵ - ۶۰.  
 ۲۳. ا. حراتی، "بررسی روش ساخت و خواص فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار"، تز کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۷۳).

24. R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lightfoot, "Transport Phenomena", 7th Ed., (Nov. 1966), pp 85-98.

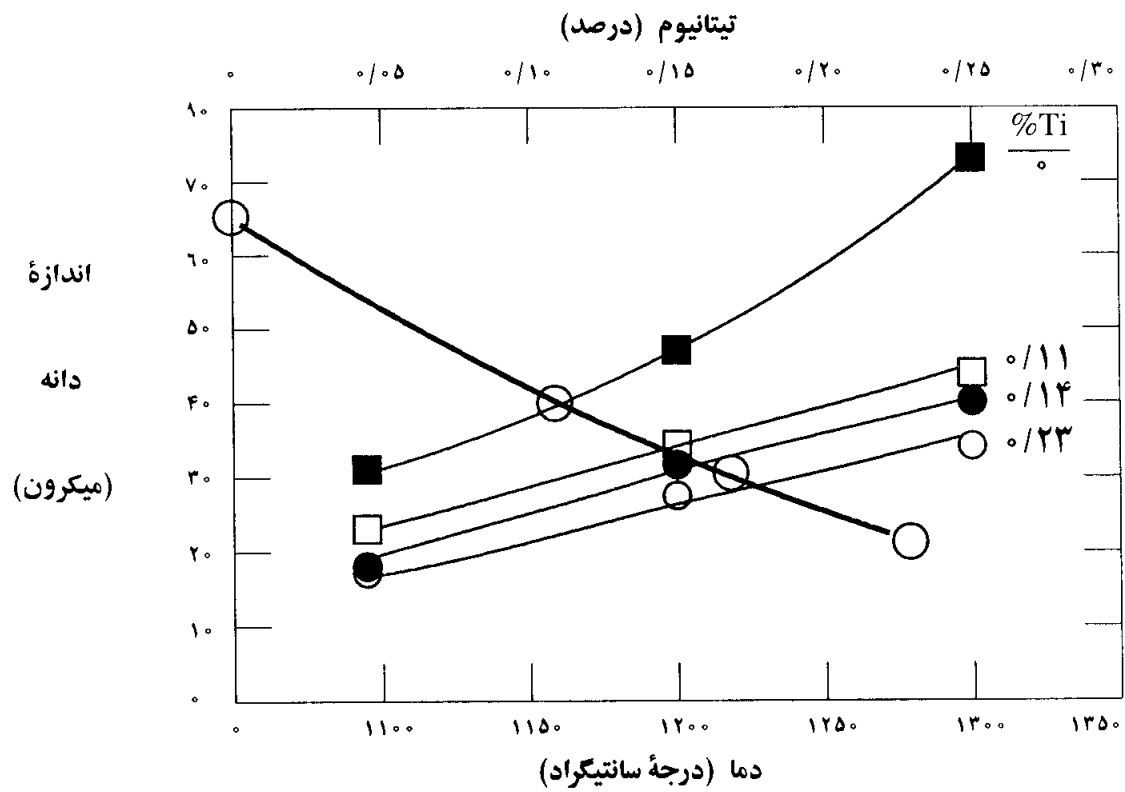
جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولادهای میکروآلیاژی ساخته شده در این تحقیق.

درصد وزنی								شماره آزمایش
C	Si	S	P	Mn	Al	Ti	N (ppm)	
۰/۰۵۳	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۲۴	۰/۰۲	۰/۰۰۹۸	--	۱
۰/۰۵۹	۰/۰۰۴	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۰/۱۵۲	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۱۶	--	۲
۰/۰۴۴	۰/۰۰۳	۰/۰۶۶	۰/۰۶۵	۰/۳۰	۰/۰۱	--	--	۳
۰/۰۱۳	۰/۰۰۳	۰/۰۳۸	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳۶	--	۴
۰/۰۲۶	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱۸۷	۰/۰۸	--	۷۵	۵
۰/۰۷	۰/۲۳	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۲۶	۰/۰۹	۰/۱۰۴	--	۶
۰/۰۶	۰/۲۷	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۲۶	۰/۱۱	۰/۱۳۸	--	۷
۰/۰۷	۰/۲۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۶	۰/۰۸	۰/۱۴۴	--	۸
۰/۰۴۵	۰/۱۰	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۲۳۵	۱۶۳	۹
۰/۰۷۵	۰/۰۶۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۸	۰/۰۵	۰/۱۳۱	۹۷	۱۰
۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۳۰	۰/۱۱	۰/۱۰۲	--	۱۱
۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۳۹	۰/۰۹	۰/۱۰۹	۱۰۴	۱۲
۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۴۶	۰/۰۸	۰/۱۱۳	--	۱۳
۰/۰۹۸	۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۴۰	۰/۱۰	۰/۱۴۷	۱۰۸	۱۴
۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۳۴	۰/۱۳	۰/۰۹۴	۶۰	۱۵
۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۳۴	۰/۰۶	۰/۱۱	۱۳۰	۱۶

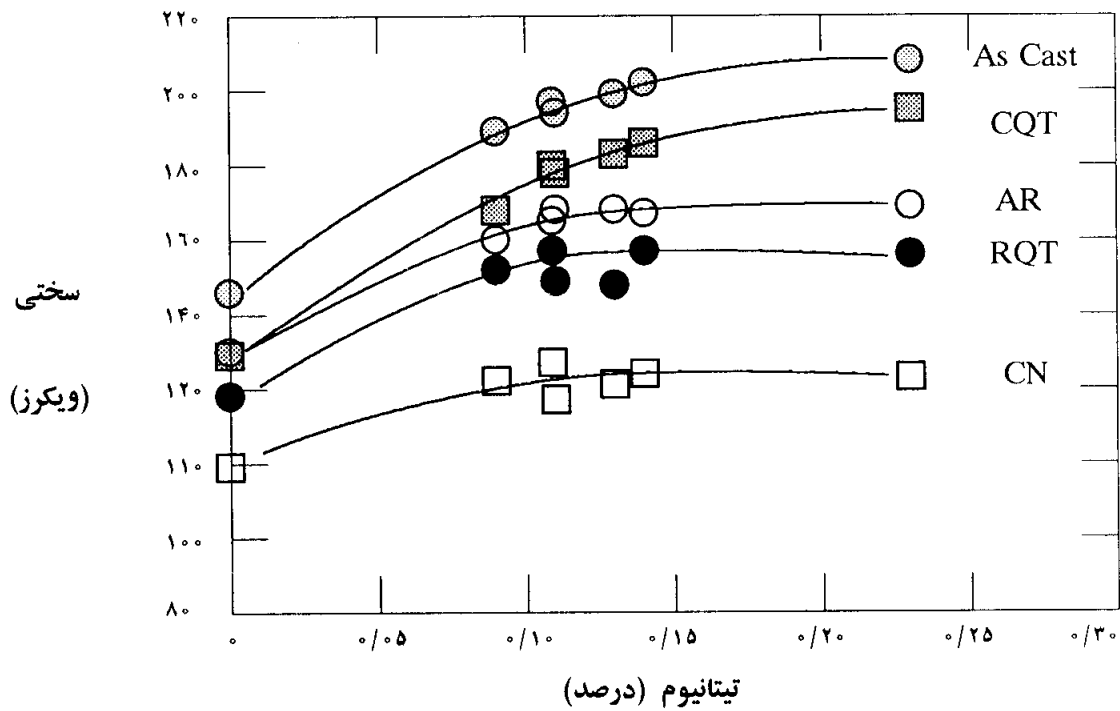


جدول ۲. تأثیر عوامل مختلف بر بازدهی جذب تیتانیوم.

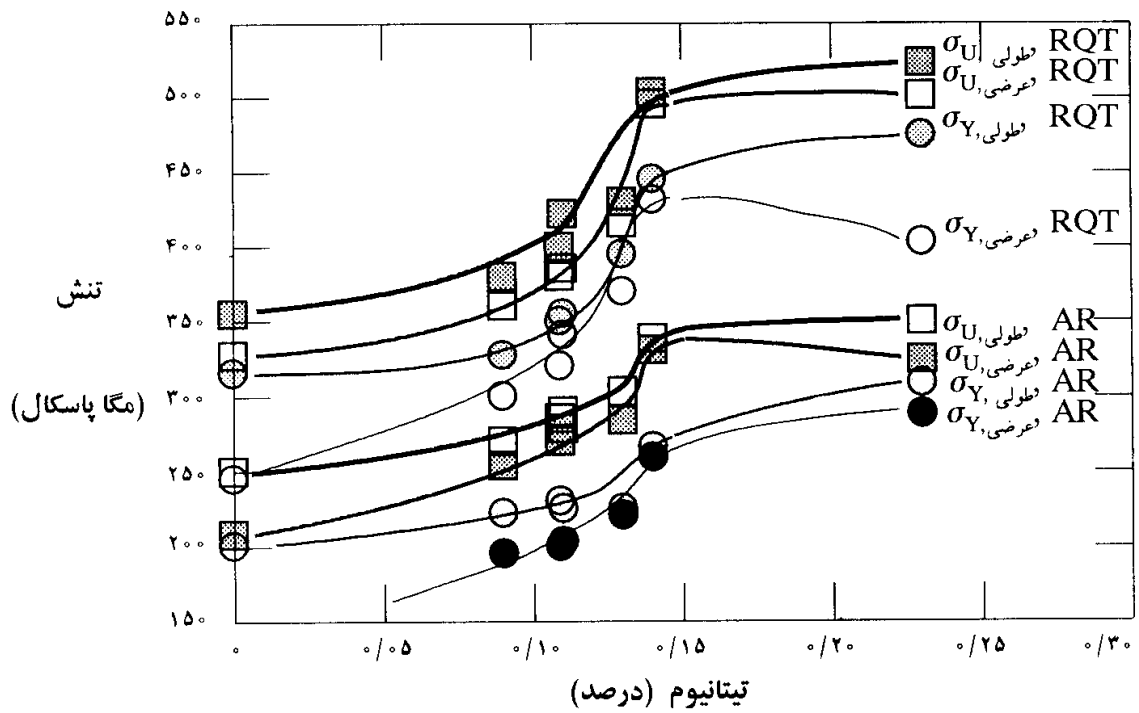
شماره آزمایش	وزن فولاد ذوب شده (گرم)	تیتانیوم اضافه شده (گرم)	تیتانیوم اضافه شده (درصد)	تیتانیوم جذب شده (درصد)	بازدهی جذب تیتانیوم	زمان آلیاژسازی (ثانیه)	فرکانس دوران (RPM)	خلوص تیتانیوم اضافه شده	فرایند	دمش آرگون
۱	۲۸۵	۰/۳۴	۰/۰۸۷	۰/۰۰۹۸	۱۱/۳	۱۸۰	-	%۹۹	تزریقی	-
۲	۳۸۵	۰/۳۷	۰/۰۹۵	۰/۰۰۱۶	۱/۷	۱۸۰	-	%۹۹	تزریقی	دارد
۳	۴۰۰	--	--	--	-	-	-	-	-	-
۴	۴۸۰	۰/۵۰	۰/۰۸۲	۰/۰۰۳۶	۲/۳	در کوره سرد شده	-	%۸۰	پرتابی	-
۵	۴۸۰	--	--	--	-	-	-	-	-	-
۶	۵۶۰	۱/۱۲	۰/۱۶۰	۰/۱۰۴	۶۵	۱۸۰	-	%۸۰	تزریقی	-
۷	۵۶۰	۱/۱۱	۰/۱۵۸	۰/۱۳۸	۸۷	۱۲۰	۰/۳۳	%۸۰	تزریقی	-
۸	۵۶۰	۱/۱۱	۰/۱۵۸	۰/۱۴۴	۹۱	۱۲۰	۰/۲۰	%۸۰	تزریقی	-
۹	۵۶۰	۲	۰/۲۸۵	۰/۲۳۵	۸۲/۵	۱۲۰	-	%۸۰	تزریقی	-
۱۰	۵۶۰	۲/۵۰	۰/۲۵۷	۰/۱۳۱	۳۷	۱۸۰	-	%۸۰	تزریقی	دارد
۱۱	۵۶۰	۱/۱۱	۰/۱۵۸	۰/۱۰۳	۶۴/۶	۱۲۰	-	%۸۰	پرتابی	-
۱۲	۵۶۰	۱/۱۱	۰/۱۵۸	۰/۱۰۹	۶۹	۱۲۰	۱	%۸۰	تزریقی	-
۱۳	۵۶۰	۱/۱۱	۰/۱۵۸	۰/۱۱۳	۷۱/۵	۱۲۰	۰/۵۰	%۸۰	تزریقی	-
۱۴	۵۶۰	۱/۱۱	۰/۱۵۸	۰/۱۴۷	۹۳	۱۲۰	۰/۲۵	%۸۰	تزریقی	-
۱۵	۵۶۰	۰/۶۱	۰/۰۸۷۴	۰/۰۹۴	۱۰۰	۳۵	-	%۸۰	تزریقی	-
۱۶	۵۶۰	۰/۸۵	۰/۱۲۱	۰/۱۱۰	۹۰	۵۰	-	%۸۰	تزریقی	-



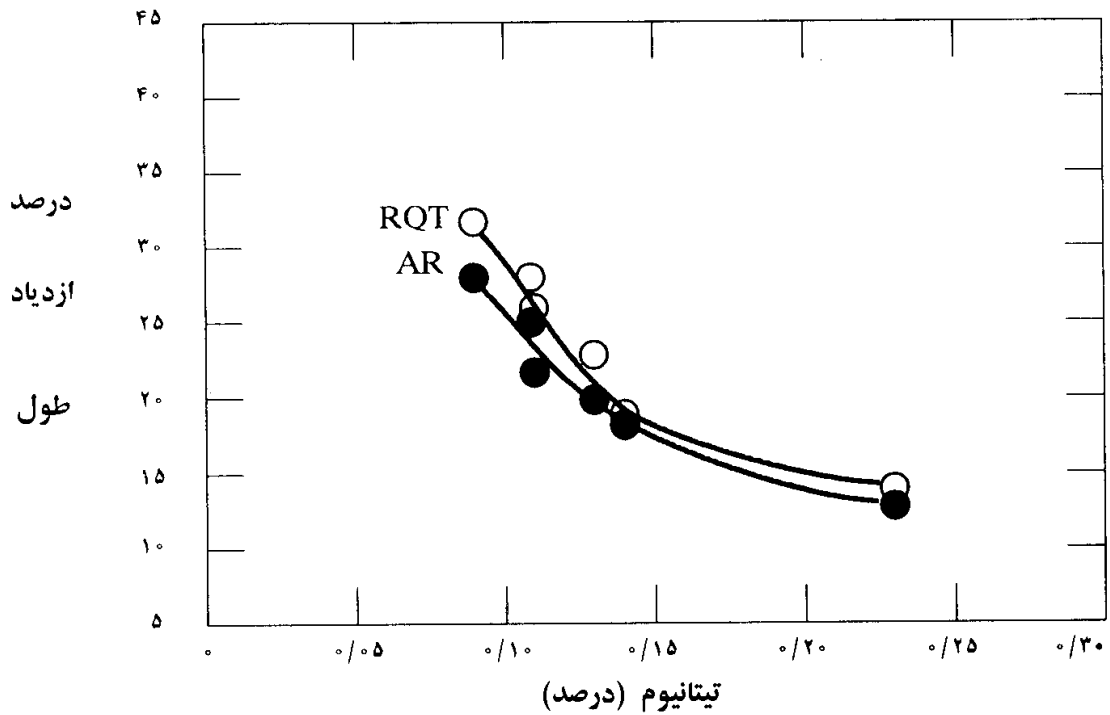
شکل ۲. تأثیر دما (افزاینده) و تیتانیوم (کاهنده) بر بازدهی جذب تیتانیوم.



شکل ۲. تأثیر تیتانیوم و عملیات ترمومکانیکی بر سختی فولاد. توجه کنید که دیاگرام AC به میزان +۳۰ و دیاگرام CQT به میزان +۴۰ ویکرز جابجا رسم شده‌اند.



شکل ۳. تأثیر تیتانیوم و عملیات ترمومکانیکی بر تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی. توجه کنید که دیاگرامهای  $\sigma_{Y, \text{طولی}}$  AR و  $\sigma_{Y, \text{عرضی}}$  AR به میزان ۱۰۰ - مگاپاسکال جابجا رسم شده‌اند.



شکل ۴. تأثیر تیتانیوم و عملیات ترمومکانیکی بر درصد ازدیاد طول.