

## مقایسه روشهای پرتابی و تزریقی برای ساخت میکروآلیاژ Fe-C-Ti

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

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

### چکیده

در این تحقیق، میکروآلیاژ Fe-C-Ti حاوی ۰/۰۹-۰/۲۳ درصد وزنی Ti به دو روش پرتابی و تزریقی ساخته شد. نتایج آزمایشی نشان داد که روش تزریقی از روش پرتابی مطلوبتر است؛ زیرا به سبب سطح مشترک بزرگتر بین فازهای جامد و مایع، بازدهی جذب تیتانیوم افزونتر بوده و هزینه و زمان آلیاژسازی محدودتر است. آزمایشها نشان دادند که دوران لوله محتوی ماده تیتانیوم دار، تا فرکانس ۱۶ دور در دقیقه، باعث افزایش بازدهی جذب و پس از آن، باعث کاهش بازیابی جذب می شود. ملاحظه شد که در بهترین حالت، وقتی فروتیتانیوم محافظت شده، بصورت محبوس در غلاف استوانه‌ای شکل، با فرکانس بهینه در داخل مذاب چرخانده می شود، بازدهی جذب به ۹۳ درصد می رسد.

## مقدمه

فولادهای کم آلیاژی استحکام بالا، معمولاً عملیات حرارتی پذیر بوده و دارای مقاومت خوردگی بیشتری نسبت به فولادهای ساده کربنی هستند. با افزودن نیکل یا مولیبدن، استحکام تسلیمشان می‌تواند حتی بیشتر از ۶۹۰ مگاپاسکال شود. اما افزایش کربن، از قابلیت چقرمگی و جوش پذیری آنها می‌کاهد؛ لذا بهتر است از طریق نورد کنترل شده [۱]، بر ریزی دانه آنها افزوده [۲] و با بهره‌گیری از مکانیزمهای رسوب سختی [۳]، بدون افزایش کربن، بر استحکام تسلیم آنها افزود. از جمله مهمترین عناصر میکروآلیاژی، نیویوم، وانادیوم و تیتانیوم را می‌توان نام برد [۴، ۵] که به کارگیریشان، باعث کاهش وزن، کاهش هزینه، افزایش نرخ تولید و سودآورتر شدن واحد تولیدی می‌شود [۶].

مهمترین کاربرد فولاد میکروآلیاژی تیتانیوم‌دار در صنایع اتومبیل، بدنه کشتی، سازه‌های ساحلی، خطوط راه آهن، خطوط لوله برای انتقال نفت و گاز، ساخت پلها، اجزاء یاتاقان و شاسی کامیونها، بدنه، قالب و پایه‌های موتور، دیسکهای چرخ و چرخ دنده‌ها، محورهای لوکوموتیوهای برقی، میل فرمانها و میل لنگها و میل گاردان کامیونها، رینگها، مخازن تصفیه و تحت فشار، دیگهای بخار، بدنه کامیونهای بزرگ و دکلهای برق می‌باشد [۷-۱۰].

در این مقاله، تأثیر تیتانیوم بر ساختار میکروسکوپی، اندازه دانه و خواص مکانیکی فولاد کم آلیاژ استحکام بالا پس از عملیات حرارتی و نورد کنترل شده ارزیابی شده و شرایط لازم برای دستیابی به خصوصیات بهینه مورد مطالعه قرار گرفته است.

## روش تحقیق

با استفاده از کوره مقاومتی با بوتۀ سرامیکی، ۱۶ نمونه فولاد میکروآلیاژی ساخته و سپس توسط آلومینیوم، اکسیژن زدایی کردیم. فروتیتانیوم با خلوص ۸۰٪ را بوسیله لوله، به بار مذاب تزریق نموده [۱۱] و فولاد حاصل را بوسیله کوانتومتر تجزیه شیمیایی کردیم. نتیجه، در جدول ۱ آورده شده است.

نمونه‌ها را به مدت ۵/ ساعت در  $1000^{\circ}\text{C}$  نرمالیزه کرده و سپس در هوا سرد نمودیم. برای عملیات آبدهی، نمونه‌ها را در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  به مدت ۵/ ساعت نگهداشته و سپس در آب سرد کردیم. برای بازگشت، نمونه‌ها را به مدت ۱ ساعت، در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  نگهداشته و سپس سرد نمودیم. به منظور نورد کنترل شده، ابتدا تمامی نمونه‌ها در  $1200^{\circ}\text{C}$  به مدت ۵/ ساعت در کوره آستنیت شده سپس نورد شدند. برای جلوگیری از افت دما، غلطکهای نورد، تا حدود  $100^{\circ}\text{C}$  پیش گرم شدند. دمای پایان نورد در حدود  $800^{\circ}\text{C}$  ثابت نگه داشته شد. نرخ افت دما، حدود ۱۰ درجه بر ثانیه بود. زمان تلف شده بین دو پاس متوالی

نورد، ۲ الی ۳ ثانیه بود. پس از اتمام نورد، نمونه‌ها در هوا سرد شده و عملیات حرارتی آبدهی و بازگشت بر تعدادی از آنها انجام شد. سپس نمونه‌های کششی در جهات طولی و عرضی تهیه شد. برای بررسی شکل و ترکیب ذرات رسوب در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم، از روشهای SEM و EDS استفاده شد. برای بررسی رشد دانه‌ها، نمونه‌ها در دماهای ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰°C، به مدت ۵/ ساعت آستینیت شده و سپس در آب کوئنچ شدند. برای اندازه‌گیری اندازه دانه‌ها از استاندارد E112-85 ASTM استفاده شد. برای بررسی اثر تیتانیوم بر کنترل شکل سولفید و تأثیر آن بر خواص مکانیکی در جهات طولی و عرضی، نمونه‌های کششی در این جهات ساخته شد و آزمایش کشش روی آنها انجام گرفت.

### نتایج و بحث

بررسیهای SEM و EDS، نشان دهنده تشکیل رسوب مکعبی شکل نیتريد تیتانیوم در نمونه‌های حاوی ۰/۰۹۴ تا ۰/۲۳۵ درصد تیتانیوم با اندازه تقریبی از ۱/۳۱ تا ۲/۷۵ میکرون در زمینه فولاد است [۱۲]. رسوبهای سولفید تیتانیوم، کاربوسولفید تیتانیوم و کاربونیتريد تیتانیوم نیز در سطح مقطع میکروسکوپی نمونه حاوی ۰/۲۳۵ درصد تیتانیوم دیده می‌شود که احتمالاً به علت افزایش اکتیویته تیتانیوم در نتیجه اضافه شدن غلظت تیتانیوم بوجود می‌آیند.

رسوبات حاوی تیتانیوم، برخلاف سولفید منگنز، غالباً بسیار سخت بوده و باعث افزایش انرژی شکست، چقرمگی و شکل‌پذیری سرد در جهت عرضی در هنگام نورد می‌شوند [۱۳-۱۵]. لذا اضافه کردن تیتانیوم برای کنترل شکل سولفید و ریز کردن دانه‌ها مفید و مؤثر است [۱۴-۱۶]. اما افزایش بیش از حد تیتانیوم نیز چندان مفید نیست؛ زیرا باعث تشکیل رسوبات نرمتر و کاهش فواید فوق می‌شود.

مقایسه استحکام کششی نمونه نورد شده (A.R) با نورد/آبداده/بازگشت داده شده (R.Q.T)، نشان می‌دهد که در ۰/۱۴ درصد تیتانیوم، اختلاف بین استحکام کششی در جهت طولی و عرضی به کمترین مقدار خود رسیده است. درحالی‌که اختلاف بین استحکام کششی در جهات طولی و عرضی، در مقادیر بیشتر تیتانیوم (مثلاً ۰/۲۳٪) احتمالاً به علت نبودن کنترل کافی بر شکل سولفید و تشکیل سولفیدهای نرم [۱۷] حاوی تیتانیوم است. لذا بنظر میرسد که مقدار بهینه تیتانیوم، برای فولادهای کم آلیاژی این تحقیق، ۰/۱۴٪ باشد.

شکل ۱ نشان می‌دهد که فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم، دانه‌های ظریفتری نسبت به فولادهای میکروآلیاژ نشده دارند. ریزساختار این نمونه‌ها نشان داده است که کوچکترین اندازه دانه مربوط به حالت نورد/آبداده/بازگشت داده شده است [۱۱]. علت ریزتر بودن دانه‌ها در این حالت را میتوان به حل شدن

کاربرد و کربونیتريدهای تیتانیوم در آستنیت در هنگام حرارت دادن نمونه‌ها برای نورد و عملیات حرارتی و رسوب کردن آنها در فصل مشترک فریت - آستنیت در هنگام نورد دانست.

علاوه بر این، رسوبات ناشی از کرنش آستنیت نیز می‌توانند سبب قفل شدن مرزهای فرعی و جلوگیری از تبلور مجدد و ریز شدن دانه‌ها شوند [۱۸، ۱۹]. در شکل ۱، تأثیر دما بر اندازه دانه فولادهای ساده و میکروآلیاژی نیز با یکدیگر مقایسه شده است. سرعت کمتر رشد دانه، در فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار، به سبب رسوبات زیاد و ریز اما پایدار نیتريد تیتانیوم (TiN) است که حتی در دماهای بالا، از رشد دانه‌ها جلوگیری می‌کنند.

تأثیر افزایش مقدار تیتانیوم و عملیات حرارتی و مکانیکی بر سختی فولاد در شکل ۲ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش مقدار تیتانیوم، نه تنها آلیاژ سخت‌تر می‌شود، بلکه تأثیر عملیات ترمومکانیکی بر میزان سختی نیز افزون‌تر می‌شود. فولاد ساده کربنی به علت داشتن دانه‌های بزرگتر و نداشتن رسوب سختی، دارای کمترین میزان سختی و استحکام کششی است؛ درحالی‌که فولاد میکروآلیاژی به علت وجود رسوبات بسیار ریز و پراکنده که باعث سختی رسوبی فریت می‌شود و همچنین به علت اندازه دانه بسیار ریز، دارای بیشترین سختی و استحکام کششی می‌باشد.

در فولاد کربن منگنزی به علت تشکیل رسوب پیوسته نیتريد آلومینیوم (AlN) در مرز دانه‌ها و تشکیل سولفید منگنز که خیلی بزرگتر از نیتريد آلومینیوم است، رشد ترک در مرز دانه‌ها در هنگام نورد بسیار شدید است [۲۰]. اما در فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار، رسوبات کربونیتريد و نیتريد تیتانیوم بصورت اتفاقی در زمینه توزیع شده و ایجاد رسوبات مرزدانه‌ای را نیز تقلیل می‌دهد.

توزیع بسیار مناسب رسوبات ریز در فولادهای میکروآلیاژ شده با ۱۴٪ تیتانیوم، باعث افزایش استحکام و چقرمگی نسبت به فولاد ساده کربنی شده و خصوصیات مکانیکی در جهات طولی و عرضی را به یکدیگر نزدیک می‌کند (شکل ۲). از آنجا که در نمونه‌های نورد/آبداده/بازگشت داده شده، ساختار ریزتری بدست می‌آید، لذا افزایش بیشتر استحکام تسلیم و استحکام کششی دیده می‌شود. اندازه‌گیری درصد ازدیاد طول نسبی این فولادها، نشان داده است که با افزایش مقدار تیتانیوم، درصد ازدیاد طول نسبی کاهش می‌یابد. این پدیده اگر چه تأثیر مخربی بر خواص فولاد می‌گذارد، اما امکان کنترل آن تا میزان قابل قبول وجود دارد [۱۱].

## جمع‌بندی

۱ - در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم، بواسطه وجود ذرات ریز نیتريد و کربونیتريد تیتانیوم، دانه‌ها ریز

می‌شوند. این رسوبات، در کنترل رشد دانه‌ها در مرحله حرارت دادن مجدد در دماهای بالا نیز بسیار مؤثر واقع می‌شوند.

۲- به علت ریز شدن دانه‌ها و ایجاد رسوب سختی، استحکام کششی و استحکام تسلیم، با افزایش مقدار تیتانیوم، افزایش می‌یابد.

۳- در نمونه‌های نورد شده و نمونه‌های نورد/آبداده/بازگشت داده شده دارای ۰/۱۴٪ تیتانیوم، اختلاف بین استحکام کششی و تسلیم در جهات طولی و عرضی به حد اقل خود می‌رسد؛ لذا این نمونه‌ها می‌توانند بدون عملیات حرارتی مورد استفاده قرار گیرند.

۴- بر اساس مطالعات قبلی با میکروسکوپ الکترونی اسکینینگ SEM و آنالیز اشعه ایکس EDX، رسوب مکعبی نیتريد تیتانیوم (TiN) و همچنین رسوبات سولفید تیتانیوم (TiS و  $Ti_2S$ )، کربوسولفید تیتانیوم ( $Ti_4C_2S_2$ ) و کربونیتريد تیتانیوم [Ti(C,N)] بسته به ترکیب شیمیایی فولاد و مقدار تیتانیوم اضافه شده در آلیاژ بوجود می‌آیند.

۵- در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم، رسوب سخت و کرووی کربوسولفید تیتانیوم [ $(Ti,Fe,Mn)_4C_2S_2$ ] می‌تواند بجای رسوب شکل پذیر و نرم سولفید منگنز بوجود آمده و اشکالات ناشی از تغییر شکل یا ازدیاد طول رسوب در مرز دانه‌ها را مرتفع سازد.

۶- تحقیق حاضر نشان می‌دهد که مقدار بهینه تیتانیوم برای کنترل شکل سولفید، ریز کردن دانه‌ها و بهبود خواص مکانیکی در جهات طولی و عرضی، حدود ۰/۱۴ درصد است.

## تشکر و قدردانی

جا دارد از تکسینهای آزمایشگاههای استخراجی، شکل دادن و عملیات حرارتی دانشکده مهندسی متالورژی دانشگاه صنعتی شریف برای همکاری در تهیه و ساخت نمونه‌ها و از اپراتور میکروسکوپ الکترونی اسکینینگ مرکز تحقیقات جهاد سازندگی از بابت تهیه تصاویر میکروسکوپی و آنالیز کیفی رسوبات و از مسئول آزمایشگاه جهاد خودکفائی سپاه بخاطر انجام آزمایشهای کوانتومتری سپاسگزاری شود. از تأمین هزینه‌های مالی طرح توسط معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف نیز بدینوسیله قدردانی می‌شود.

## مراجع

1. R. B. G. Yeo and A. G. Melville, "Properties and Control of Hot-rolled Steels", *J. Metals*, (June 196)8, pp 33-43.

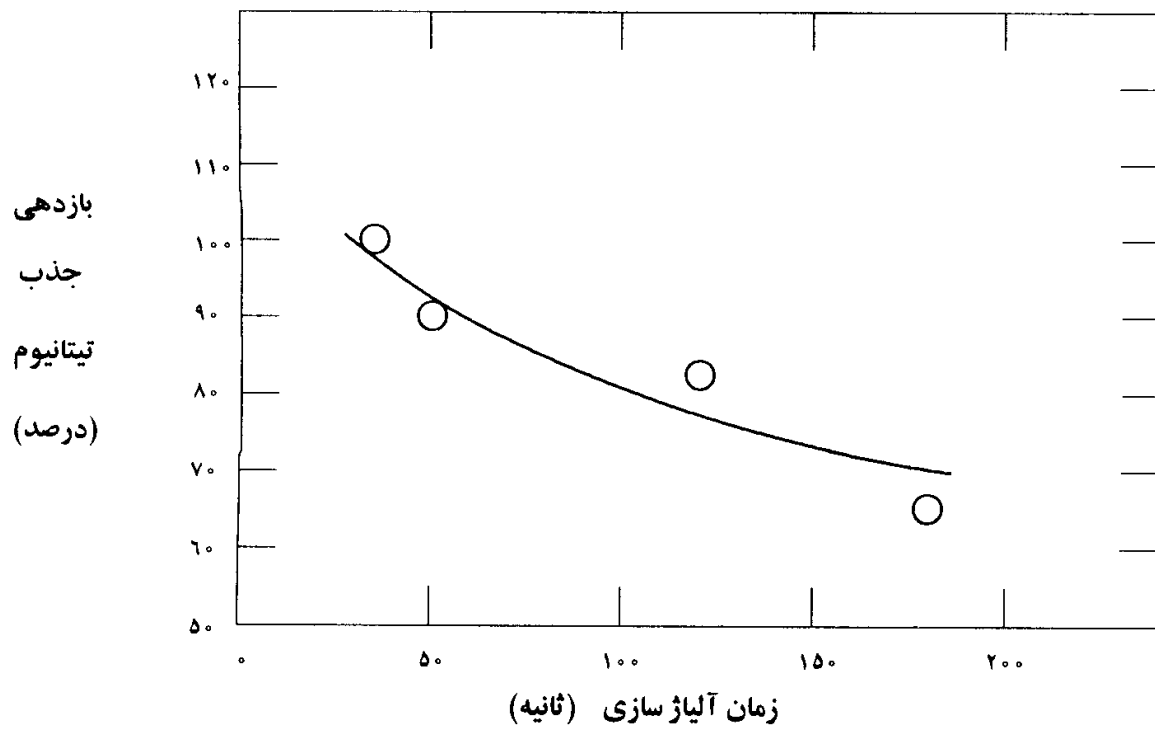
2. K. J. Irvine, F. B. Pickering and T. Gladman, "Grain-refined C-Mn Steels", *JISI*, (February 1967), pp 161-182.
3. R. W. K. Hoenycombe, "Fundamental Aspects of Precipitation in Microalloyed Steels", *Proc. of Inter. Conf. on HSLA Steels' 85*, (4-8, Nov. 1985), Beijing, pp 243-250.
4. H. Stuart and B. L. Jones, "A Perspective on Microalloyed Steels", *J. Metals*, (April 1983), pp 17-20.
5. A. T. Davenport, L. C. Brosard and R. E. Miner, "Precipitation in Microalloyed HSLA Steels", *J. Metals*, (June 1975), pp 21-27.
6. L. Meyer, "Effect and Present Application of the Microalloying Elements Nb, V, Ti, Zr and B in HSLA Steels", *Proc. of Inter. Conf. on HSLA Steels' 85*, (Nov. 1985), Beijing, pp 29-44.
7. L. Ying and Y. Zheng, "Production, Microstructure and Properties of Microalloyed High Strength 355 MN/m<sup>2</sup> Grade Ship Plate", *Proc. of Inter. Conf. on HSLA Steels' 85*, (4-8, Nov. 1985), Beijing, pp 605-611.
8. C. L. Magee, R. G. Davies and P. Beardmore, "Factors Influencing Automotive Application of HSLA Steels", *J. Metals*, (Nov. 1980), pp 28-35.
9. 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.
10. A. P. Coldren and T. G. Oakwood, "A New Economical X-70 Line Pipe Steel", *J. Metals*, (April 1983), pp 28-34.
۱۱. س.خ. صدرنژاد و ا. حراتی، "مقایسه روشهای پرتابی و تزریقی برای ساخت میکروآلیاژ Fe-C-Ti"، تهیه شده برای ارائه در سمپوزیوم فولاد ۷۸.
۱۲. س.خ. صدرنژاد و ا. حراتی، "تأثیر رسوب نیتريدی، کربونیتريدی و کربوسولفیدی تیتانیوم بر خواص فولادهای کم آلیاژی"، نشریه دانشکده فنی، شماره ۵۸، (آذر ۱۳۷۵)، صص ۳۸-۵۶.
13. L. Luyckx and J. R. Bell, "Sulfide Shape Control in High Strength Low Alloy

- (HSLA) Steels", *Metall. Trans*, Vol. 1, (December 1970), pp 3341-3340.
14. W. G. Wilson, D. A. R. Kay and A. Vahed, "The Use of Thermodynamics and Phase Equilibria to Predict the Behavior of the Rare Earth Elements in Steels", *J. Metals*, (May 1974), pp 14-23.
15. W. G. Wilson and R. G. Wells, "Identifying Inclusions in Rare Earth Treated Steels", *Metal Progress*, (Dec. 1973), pp 75-77.
16. S. K. Saxena, "Improving Inclusion Morphology, Cleanness, and Mechanical Properties on Al-Killed Steel by Injection of Lime-based Powder", *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 2, No. 2, (1982), pp 50-57.
17. C. J. Ball, "X-ray Powder Diffraction Patterns of Titanium Carbosulphide and Titanium Sulphide", *Metal. Science*, Vol. 18, (Dec. 1984), pp 577-579.
18. H. Gorss and H. Krebs, "Investigation of the Titanium Addition to the Base Material on Toughness Properties of the HAZ", *Steel Reaserch*, 63, (1992), No. 12, pp 554-557.
19. J. Kunze, "Solubility Product of Titanium Nitride in  $\gamma$ -Iron", *Metal Science*, Vol. 16, (April 1982), pp 217-218.
۲۰. س.خ. صدرنژاد، "نوع، شکل و تأثیر ترکیبات گوگرد در فولاد"، نشریه علمی و فنی وزارت معادن و فلزات، (۱۳۶۷)، صص ۲۶-۳۳.

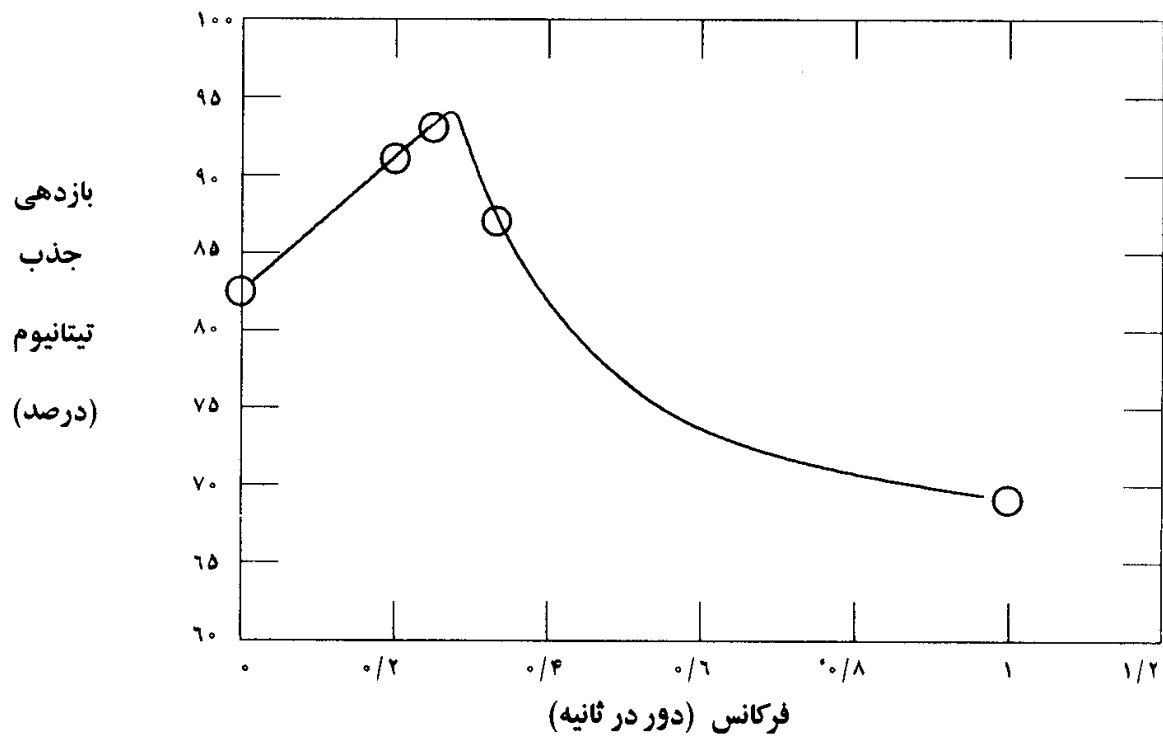
جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولادهای میکروآلیاژی ساخته شده در این تحقیق.

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	۰/۱۵۳	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	۰/۳۶	۰/۰۹	۰/۱۰۴	-	۶
۰/۰۶	۰/۲۷	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۳۶	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





شکل ۱. تأثیر زمان آلیاژسازی بر بازدهی جذب تیتانیوم.



شکل ۲. تأثیر فرکانس دوران بر بازدهی جذب تیتانیوم.