

مروری بر چالش‌های تحقیقاتی در فولاد زنگ‌زن ۳۱۶L مورد استفاده در کاربردهای پزشکی

فرزاد پنهان^۱ و *، فرید نعیمی^۲

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

^۲ استادیار گروه مهندسی پزشکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

*مسئول مکاتبات: f.pahneh67@mail.com

چکیده

واژگان کلیدی

فولاد زنگ‌زن ۳۱۶L
مقاومت به خوردگی
خواص مکانیکی
زیست‌سازگاری
سمیت نیکل

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۶/۳۰
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۳/۰۷

بیومتریال‌های فلزی بخش عمده‌ای از مواد مورد استفاده در کاربردهای پزشکی و جراحی را تشکیل می‌دهند. در تحقیق حاضر، نخست مقاومت به خوردگی و زیست‌سازگاری فولاد زنگ‌زن ۳۱۶L در کاربردهای پزشکی مورد بررسی قرار گرفته است. غلظت بالای عناصر آلیاژی در بدن ایجاد سمیت کرده و برای سلامت بدن مضر هست که یکی از دلایل افزایش غلظت عناصر فلزی در بدن، استفاده از ایمپلنت‌های فلزی است. همچنین ویژگی‌های مکانیکی این آلیاژ و روش‌های نوین ارتقاء خواص آن جهت استفاده در کاشتنی‌های ارتوپدی و دندانپزشکی مورد مطالعه قرار داده شد. طی آزمایش‌های انجام شده از ادرار و خون بیماران استفاده کننده از ایمپلنت‌های پزشکی، غلظت عناصر نیکل و کروم نسبت به افراد سالم بیشتر است که برای سلامت افراد بسیار مضر و سرطان‌زا است. با افزایش خواص سطح، مقاومت به خوردگی و سایش ایمپلنت‌ها می‌توان از آزاد شدن ذرات مضر فلزی کاسته و زیست‌سازگاری ایمپلنت‌ها را بالا برد. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که جایگزین کردن نیتروژن بجای نیکل، می‌توان هم ساختار آستنیتی آلیاژ را حفظ نمود و همچنین باعث افزایش مقاومت به خوردگی، زیست‌سازگاری بهتر و خواص سایش مناسب‌تر و در نتیجه افزایش خواص مکانیکی را بدنبال خواهد داشت.

۱ مقدمه

در ساخت کاشتنی‌های ارتوپدی، فلزات نقش انکار نشدنی دارند. در این میان فولادهای زنگ‌زن بدلیل تاریخچه مصرف طولانی و در نتیجه رفتار شناخته شده و همچنین هزینه به نسبت کمتر در مقایسه با دیگر بیومتریال‌های فلزی و در عین حال زیست‌سازگاری مناسب در کاربردهای کوتاه‌مدت، موقعیت خود را در بین بیومتریال‌های فلزی تثبیت کرده‌اند [۱]. اولین مواد فلزی که به طور موثر در زمینه پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است، فولاد زنگ‌زن است. فولاد زنگ‌زن یک نام مرسوم برای برخی از فولادهای مقاوم به خوردگی است. فولاد زنگ‌زن برای کاربردی گسترده‌ای به دلیل هزینه‌های پایین‌تر، دسترسی آسان، خواص مکانیکی عالی، شکل‌پذیری مناسب، زیست‌سازگاری مناسب و استحکام بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیومواد فلزی در مقایسه با بیومواد سرامیکی و پلیمری، خواص قابل توجهی مانند تحمل بیشتر تنش‌های کششی را دارند که در مورد آلیاژهای آن‌ها، این کمیت بسیار زیاد خواهد بود [۲]. از موارد مصرف این مواد تحت بارهای زیاد مانند: لگن، زانو، پیچ، کاشت‌های دندان‌های دندانی خواهد بود. ترکیب آهن و کربن کمتر از حدود ۰.۲٪ را فولاد می‌نامند. آهن در دمای معمولی مغناطیسی است، ولی با افزایش دما از ۵۲۳ درجه به دلیل تغییر جهت نیروی اسپین خاصیت مغناطیسی آهن نیز از بین می‌رود. به جهت تأثیر مخرب خاصیت مغناطیسی فولادهای فریتی کاشته شده درون بدن بر روی MRI، استفاده‌ی آن‌ها درون بدن بسیار کم است. فولاد پرمصرف‌ترین آلیاژ فلزی مورد استفاده به عنوان بیومتریال است [۳، ۴].

در علم متالورژی فولاد زنگ‌زن، تحت عنوان آلیاژ آهنی با حداقل ۱۰ درصد کروم تعریف می‌شود. این نام از این جهت قرار داد شده است که فولاد زنگ‌زن، تغییر رنگ نمی‌یابد و خورده نمی‌شود. فولادهای زنگ‌زن در بسیاری از محیط‌ها، مقاومت بالایی نسبت به خوردگی و اکسید شدن دارند، با این حال انتخاب نوع صحیح فولاد برای کاربرد خاص از اهمیت زیادی برخوردار است. فراوانی، شکل‌پذیری، قیمت مناسب، راحتی کار و استحکام خوب از جمله خصوصیات بارز کاشتنی‌هایی از جنس فولاد زنگ‌زن است [۵].

مقاومت در برابر اکسید شدن در هوا در دمای محیط با افزودن حدود ۱۳ درصد کروم و در محیط‌های سخت و خورنده حد ۲۶ درصد می‌تواند مناسب باشد. در حال حاضر بیش از ۱۵۰ نوع مختلف فولاد زنگ‌زن معرفی شده است. افزودن نیکل باعث پایدار شدن ساختار آستنیتی آهن می‌شود. در نتیجه فولادی غیر مغناطیسی بدست می‌آید که در دماهای کم نیز مقاومت به شکنندگی بالایی دارد. برای دستیابی به استحکام و سختی بیشتر به آن می‌توان کربن اضافه نمود [۶].

نکته‌ی مهم تشکیل لایه‌ی غیرفعال اکسید کروم است که بر روی سطح فولاد تشکیل شده و آنرا در برابر خوردگی محافظت می‌کند. علاوه بر قسمت‌های اساسی و اصلی تجهیزات بیمارستانی از فولاد ضد زنگ در پیچ‌ها، میخ‌ها، سیم‌ها و صفحات شکسته‌بندی، سیم‌ها و گیره‌های ارتوپدی و کاشتنی‌های دندانی، استنت قلبی، کاتترها، سوزن‌ها، قیچی‌های جراحی و

است. فولاد زنگ نزن ۳۱۶L به طور گسترده‌ای در کاربردهای موقت در بدن استفاده می‌شود، مانند صفحات شکستگی، پیچ‌ها، مفصل ران، و همچنین در کاربردهای دائمی، مانند جایگزین‌های کامل استخوان ران استفاده می‌شوند. همانطور که گفته شد، فولاد زنگ دارای مقادیر مختلف کروم و نیکل است. کروم دارای میل بسیار زیادی برای ترکیب شدن با اکسیژن را دارد، که یک فیلم اکسیدی غنی از کروم به ضخامت ۲ نانومتر روی سطح ایجاد می‌کند. این لایه سطحی، چسبنده است و باعث جلوگیری از خوردگی در محیط‌های حاوی اکسیژن می‌شود [۱۰، ۱۱].

وجود نیکل در آلیاژ باعث افزایش مقاومت به خوردگی و همچنین باعث بهبود خواص مکانیکی می‌گردد. نیکل اصلی‌ترین عنصر آلیاژی است که باعث تشکیل آستنیت در آهن می‌شود، به طور کلی پایدارکننده آستنیت در فولاد زنگ‌نزن است. با تشکیل فیلم‌های اکسیدی محافظ روی سطح آلیاژ، باعث افزایش مقاومت خوردگی می‌شود. با توجه به مطالعات انجام‌شده عنصر نیکل برای بدن انسان بسیار سمی است [۱۲، ۱۳]. اضافه کردن عناصر آلیاژی دیگر می‌تواند مقاومت به خوردگی، خواص فیزیکی و مکانیکی را افزایش دهد. در فولادهای زنگ نزن معمولاً دو نوع خوردگی اتفاق می‌افتد:

۱. خوردگی حفره ای^۲
۲. خوردگی شیاری^۳

۱.۲.۲ خوردگی حفره‌ای

خوردگی حفره ای یک نوع خوردگی موضعی است که از به وجود آمده سوراخ و خراش روی سطح ایجاد می‌شود. دلیل ترمودینامیکی برای خوردگی حفره‌ای، ایجاد یک منطقه کوچک روی سطح که فاقد لایه اکسید سطحی (پسیو شده) است، آند شده در حالی که منطقه وسیع دیگر کاتد شده است. در این منطقه که فاقد لایه اکسیدی است، خوردگی گالوانیک موضعی رخ می‌دهد. علت ایجاد خوردگی حفره‌ای در فولادهای زنگ‌نزن، وجود کربن در آلیاژ است. کروم تمایل زیادی به واکنش با کربن دارد و کاربید کروم (Cr_7C_3 ، Cr_23C_6 ، Cr_7C_3) در منطقه غنی از کربن تشکیل دهد.

به طور معمول در مرز دانه تشکیل می‌شود. رسوب کروم و تشکیل کاربید کروم باعث کاهش کروم در اطراف مرز دانه شده و بنابراین وقتی خراش یا حفره‌ای روی سطح ایجاد شود. کروم لازم برای تشکیل لایه مقاوم به خوردگی (اکسید کروم) وجود ندارد و این منطقه فقیر از کروم شده و باعث خوردگی حفره‌ای می‌شود. پس در نتیجه مقاومت به خوردگی در اطراف و مرز دانه به دلیل تشکیل کاربید کروم، کاهش می‌یابد.

برای جلوگیری از خوردگی حفره‌ای در فولاد زنگ‌نزن می‌توان مولیبدن به آلیاژ اضافه نمود. مولیبدن میل زیادی به ترکیب شدن با کربن را دارد و باعث تشکیل کاربید مولیبدن می‌کند، بنابراین موجب کاهش کاربید کروم می‌شود. همچنین برای افزایش مقاومت به خوردگی حفره‌ای باید مقدار کربن کم باشد. اگرچه کربن موجب افزایش استحکام می‌شود اما مقدار کربن در فولادهای زنگ‌نزن نباید از ۰/۰۳ درصد بیشتر باشد. محتوای کربن پایین احتمال تشکیل

... استفاده می‌گردد [۷]. بیشترین استفاده از فولادهای زنگ‌نزن، نوع ۳۱۶ و ۳۱۶L است. نوع ۳۱۶L توسط انجمن تست مواد امریکا (ASTM) برای ساخت کاشتنی‌ها توصیه می‌شود [۸].

هدف از این تحقیق این است که با مشکلات فولاد زنگ‌نزن مورد استفاده در کاربردهای پزشکی آشنا شده و در صدد برطرف نمودن این مشکلات اعم از مقاومت به سایش کم، مقاومت به خوردگی کم در محیط بدن، مدول الاستیک بالا (در حدود ۲۰۰ گیگا پاسکال- حدود ۱۰ برابر استخوان)، تنش ایجاد شده در محل کاشتنی و استخوان (Stress Shielding)، سمیت عناصر آلیاژی تلاش شود.

۲ روش‌های بررسی

جهت یافتن مستندات مرتبط با موضوع پژوهش از مقالات مروری و کتب چاپ شده در سال‌های گذشته و حال استفاده گردیده است. در ابتدا به شناسایی فولاد زنگ‌نزن مزایا و معایب آن در کاربردهای پزشکی پرداخته شده است.

۱.۲ فولادهای زنگ‌نزن

فولاد زنگ‌نزن نام عمومی برای برخی از فولادها است. آلیاژهای حاوی درصد بالای (۱۱ تا ۳۰ درصد وزنی) کروم و مقادیر مختلف نیکل را فولاد زنگ‌نزن می‌گویند. فولادهای زنگ نزن براساس ترکیب شیمیایی به دو دسته تقسیم شود: فولادهای کروم دار و فولادهای کروم-نیکل دارد [۹]. فولادهای زنگ‌نزن بر اساس ریزساختار به چهار دسته تقسیم می‌شوند:

در جدول ۱، بجز فولادهای دوبلکس، هر یک از سه گروه دیگر از فولادهای زنگ‌نزن در کاربردها و دستگاه‌های پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سختی فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۹۷HRB است که برای ابزارهای دندانپزشکی و جراحی مناسب هستند. فولاد زنگ نزن فریتی برای ابزارهای پزشکی استفاده می‌شود. فولاد زنگ آستنیتی در کاربردهای مختلف پزشکی مانند: مواردی که به مقاومت به خوردگی بالا، استحکام متوسط مورد نیاز است، استفاده می‌شود. در این کاربردها اغلب به یک ماده نیاز است که به راحتی به شکل‌های پیچیده درآید. با این حال، فقط فولاد زنگ‌نزن آستنیتی برای کاشتنی‌ها استفاده می‌شود [۹]. از این رو، در این بخش به فولاد زنگ‌نزن مورد استفاده برای کاشتنی‌های پزشکی، از جمله نوع ۳۱۶L و انواع آن اختصاص داده شده است.

۲.۲ مقاومت به خوردگی فولاد زنگ‌نزن در کاربردهای پزشکی

حداقل درصد کروم در فولاد زنگ نزن ۱۱٪ وزنی است، مقدار مورد نیاز برای جلوگیری از زنگ‌زدگی در اتمسفر محیط است [۹]. لیست ترکیبات فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L و انواع آن (ASMT F138) در جدول ۲ آمده

^۱ فولاد زنگ‌نزن آستنیتی کم‌کربن

^۲ pitting corrosion

^۳ Crevice corrosion

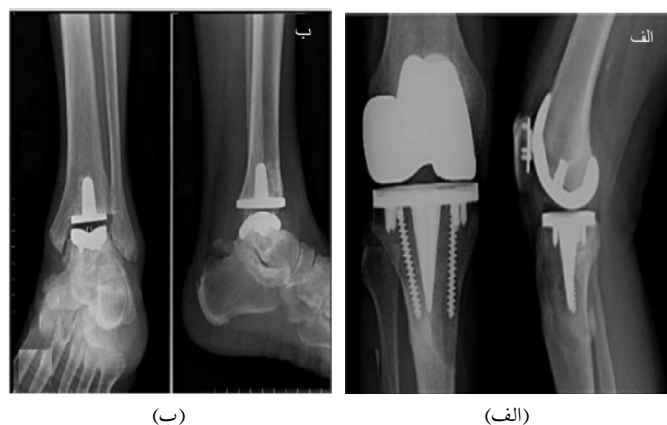
جدول ۱: انواع فولادهای زنگ نزن مورد استفاده در کاربردهای پزشکی بر اساس ریز ساختار [۹]

نوع فولاد زنگ نزن	کاربرد	مثال
مارتنزیتی	دندان پزشکی، وسایل جراحی	لوازم جراحی و دندان پزشکی، مته‌های دندانی
فریتی	به طور محدود در وسایل جراحی	پین، گیره‌ها
آستنیتی	کاشتنی‌ها، انواع کاشتنی در مدت زمان کوتاه، مفصل و گوی ران	پین، پیچ، سوزن، دستگاه‌های ضد عفونی‌کننده، قفسه سینه، صفحه شکسته‌بند، جایگزین مفصل ران
دوبلکس (دو فازی)	در کاربردهای پزشکی هنوز استفاده نشده است	-

جدول ۲: ترکیبات فولاد زنگ نزن ۳۱۶L (ASTM F138) [۹]

کد ASTM	کروم	نیکل	مولیبدن	منگنز	سیلیسیوم	مس	نیتروژن	کربن	فسفر	گوگرد
F138/S316 ۷۳	۱۹ - ۱۷	۱۵ - ۱۳	۲ - ۳	۲	۰/۷۵	۰/۵	۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱
F1314/S20 ۹۱۰	۲۴ - ۲۰	۱۳ - ۱۱	۴ - ۶	۲ - ۳	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲ - ۰/۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱
F1586/S31 ۶۷۵ (Orthinox)	۲۲ - ۱۸	۱۱ - ۹	۲ - ۴	۲ - ۳	۰/۷۵	۰/۲۵	۰/۵ - ۰/۲۵	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۱
F2229/S29 ۱۰۸	۲۳ - ۱۹	۰/۱	۲۴ - ۲۱	۰/۵ - ۱/۵	۰/۷۵	۰/۲۵	۰/۸	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۱

در این حالت موجب کاهش درصد اکسیژن در شیار می‌شود. در حالی که واکنش آندی در شیار ادامه پیدا می‌کند، غلظت اکسیژن درون شیار افزایش نمی‌یابد. در همین حال یون‌های کوچک کلر به درون شکاف مهاجرت کرده و با یون‌های فلزی موجود واکنش داده و در این منطقه شیار باعث کاهش pH به دلیل اکسیداسیون خواهد شد [۱۸]. برای جلوگیری از خوردگی شیار می‌توان نیتروژن به آلیاژ اضافه نمود. نیتروژن یکی دیگر از عناصر موجود در فولاد زنگ‌نزن است که باعث تثبیت ساختار آستنیتی این فولاد گردد.

**شکل ۱:** الف) مفصل مصنوعی زانو ب) مفصل مصنوعی مچ پا از جنس ۳۱۶L [۱۹]

استفاده از نیتروژن منجر به افزایش خواص مکانیکی و همچنین افزایش مقاومت به خوردگی حفره‌ای و شیار و فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L شود. فولادهای زنگ‌نزن نیکل‌دار با درصد بالای نیتروژن (ASTM F2229) برای کاربردهای پزشکی مناسب است. در سال ۱۹۹۸ میلادی، طبق استاندارد ASTM 1586 فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L با درصد بالای نیتروژن به عنوان

کاربرد کروم را کاهش می‌دهد. به طور معمول این مکانیزم، باعث خوردگی درون دانه‌ها می‌شود. کاهش مقدار کربن در فولادهای زنگ‌نزن ۳۱۶L، باعث افزایش مقاومت به خوردگی در محلول‌های کلریدی به عنوان مثال: محیط نمکی فیزیولوژیک در سیستم بدن، می‌شود [۸]. از سوی دیگر، فولاد زنگ‌نزن در برابر خوردگی توسط یون‌های کلریدی آسیب‌پذیر است. و ترکیبات گوگرد را کاهش می‌دهد [۱۴].

وجود ریزجاندارهای زیستی بر روی سطح فلز معمولاً منجر به آسیب‌های شدید بر روی سطح فلز در غلظت‌های مختلف pH و اکسیژن و ترکیبات الکترولیتی می‌شود [۱۵]. تحقیقات انجام شده بر روی رفتار الکتروشیمیایی و خوردگی فولاد زنگ نزن ۳۱۶L در باکتری‌های کاهشیافته سولفاتی (SRB) و باکتری‌های اکسیدشده هوایی (IOB) نشان داده است که روابط بین سطح فولاد زنگ‌نزن و سلول‌های باکتریایی، محصولات متابولیکی و این محصولات باعث افزایش آسیب خوردگی و منجر به خوردگی حفره می‌شود [۱۶]. بیش از ۹۰٪ شکست کاشتنی‌های ساخته شده از فولاد زنگ نزن ۳۱۶L ناشی از خوردگی شیار و حفره‌ای با توجه به مطالعات اکاشتنی‌های بازیابی شده است [۱۶]. برای جلوگیری از خوردگی و حملات یون‌های فلزی به کاشتنی، می‌توان با روش‌های اصلاح سطح و تغییر آلیاژ ماده، موجب بهبود مقاومت به خوردگی فولاد زنگ ۳۱۶L شد [۱۷].

۲.۲.۲ خوردگی شیار

این نوع خوردگی به دلیل حضور مایعات بدن که حاوی مقادیر قابل توجهی محلول‌های کلریدی است، در داخل شکاف‌ها رخ می‌دهد. این محل‌ها مناطق بسیار حساسی جهت پدیده خوردگی شیار هستند. خوردگی شیار معمولاً در محل بسته شدن پیچ استخوان‌بند و صفحه استخوان مشاهده می‌گردد.

جایگزینی کامل مفصل ران استفاده شد [۲۰].

همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، عناصر اصلی موجود در فولادهای زنگ‌نزن ۳۱۶L (ASTM F138) و انواع آن عبارت است از: آهن، کروم، نیکل، مولیبدن و منگنز، که بررسی سمیت هر یک از این عناصر حائز اهمیت است. در این بخش، تمرکز بر عملکرد بیولوژیکی سه عنصر غالب: آهن، کروم و نیکل، با بیولوژیک مربوط به انتشار عناصر به عنوان یون‌های محلول یا ذرات نامحلول است [۲۸].

۱.۱.۳ آهن

۱.۱.۱.۳ بررسی سمیت عنصر آهن در بدن

از عصر آهن در حدود ۱۲۰۰ سال قبل از میلاد، ظروف ساخته شده از آهن در تهیه و نگه داشتن غذا استفاده می‌شد. این نشان‌دهنده غیر سمی بودن آهن در طول تاریخ در بدن انسان است. اخیراً مطالعه سمیت فلز یونی فلز آهن انجام شده است [۲۹]. سمیت فلزات مختلف در محیط بدن به ترتیب به شرح زیر: کبالت، وانادیوم، نیکل، کروم، تیتانیوم و آهن است [۹].

فلز کبالت سمیت بالایی نسبت به دیگر فلزات مورد استفاده در کاربردهای پزشکی دارد. و فلز آهن از کمترین سمیت برخوردار است. عنصر آهن در انواع بافت موجودات زنده وجود دارد. آهن در تمامی سلول‌های بدن انسان یافت می‌شود و یکی از عوامل اصلی حیات به شمار می‌آید. اصولاً عنصر آهن به عنوان عنصر مفید و ارزشمند در بدن انسان و موجودات زنده به شمار می‌رود. بسیاری از آنزیم‌ها مانند: کاتالاز^۴، لیپواکسیژناز^۵ و سیتوکروم^۶ (عامل تولید انرژی در بدن) حاوی آهن هستند [۳۰].

آهن موجود در خون وظیفه انتقال اکسیژن از طریق ریه به بافت‌های مختلف بدن را بر عهده دارد، همچنین جزء اصلی هموگلوبین خون است. جذب آهن از طریق خوردن مواد غذایی است که کمبود آن یکی از شایع‌ترین بیماری‌ها است، که به عنوان بیماری فقر آهن شناخته می‌شود که می‌تواند منجر به مرگ بیمار شود [۳۰]. مقادیر زیادی از عنصر آهن می‌تواند از طریق کاشتنی‌های (ایمپلنت‌ها) فلزی به جریان خون اضافه گردد. وجود مقادیر زیاد آهن منجر به ایجاد رادیکال‌های آزاد و در نهایت صدمه زدن به DNA و پروتئین‌ها، چربی‌ها و دیگر اجزا سلول‌ها گردد. وجود آهن اضافه در بدن منجر به آسیب رساندن به قلب و کبد شده و سبب عوارضی همچون از کار افتادن کبد، سندروم تنفسی، کما، شک و در نهایت در دراز مدت باعث مرگ می‌شود [۳۱-۳۳].

تصاویر MRI نشان داده که در بیماران آلزایمری و پارکینسون، تجمع ذرات آهن در مغز مشاهده شده است [۳۴]. مقدار مجاز آهن در بدن ۲۰ میلی‌گرم در هر کیلوگرم وزن انسان است [۳۴].

۲.۱.۳ کروم

۱.۲.۱.۳ بررسی سمیت عنصر کروم در بدن

عنصر کروم جزء گروه ۶ فلزات هادی است و دارای سطح انرژی $4s^1 3d^5$ است. کروم وظیفه تنظیم سطح قند خون در بدن را دارد. کمبود کروم در بدن باعث پدیده قند خون بالا^۷ و پدیده دفع گلوکز از ادرار^۸ می‌گردد. اندازه‌گیری غلظت کروم در پلاسما خون و یا ادرار یکی از روش‌های تعیین سلامت بدن

علاوه بر ترکیب شیمیایی آلیاژ، فرآیندهای تولید نقش اساسی و ویژه‌ایی دارند. روش‌های مانند ریخته‌گری تحت خلاء [۲۱]، مجدداً ذوب کردن خلاء (VAR) یا تصفیه سرباره الکتریکی [۲۲] برای تولید کاشتنی‌های فولاد زنگ‌نزن مورد نیاز است.

روش ریخته‌گری تحت خلاء آلودگی‌های مذاب را کاهش می‌دهد، به طوری که مقدار و اندازه ذرات غیر فلزات را به حداقل می‌رساند و حداکثر مقاومت به خوردگی و شیار و حفره‌های را ایجاد می‌کند. نوع ۳۱۶L ($18Cr - 14Ni - 2Mo$) تولید شده به روش ریخته‌گری تحت خلاء یکی از بهترین نوع فولاد زنگ‌نزن برای کاربردهای پزشکی است. در نهایت برای افزایش بیش از پیش مقاومت به خوردگی و افزایش خواص مکانیکی، کاشتنی‌های فولاد زنگ‌نزن را با عبور دادن اسید نیتریک از سطح و پسیو نمودن سطح می‌توان این خواص را افزایش داد. سپس کاشتنی‌ها را ضد عفونی کرده و برای تحویل به یک مرکز پزشکی بسته‌بندی می‌شود.

به طور کلی مقاومت به خوردگی فولاد زنگ‌نزن با کنترل ترکیب شیمیایی و فرایندهای متالورژیکی بهبود یافته است، اما نمی‌تواند با استفاده از این روش‌ها مانع ترک خوردگی تنش^۱ (SCC) شد. ترک خوردگی تنش فولادهای زنگ‌نزن، در محل‌هایی رخ می‌دهد که غنی از کلرید است و توسط اثر ترکیب تنش کششی و محیط خورنده ایجاد می‌شود. این شرایط می‌تواند به شکست ناگهانی ورق معمولی فلزات که تحت تنش کششی قرار دارند منجر شود. نشان داده شده است که ترک خوردگی تنش تحت تنش بسیار پایین تر از استحکام کششی (UTS) رخ می‌دهد، که ممکن است حتی در کاشتنی‌ها با تنش‌های باقی مانده رخ دهد.

به طور خلاصه، اگر چه موفقیت فولاد زنگ‌نزن باعث می‌شود که این آلیاژها به طور گسترده‌ای پذیرفته شوند، اما این فولادها به طور کامل "زنگ‌نزن" نیستند. این به دلیل مایع بدن انسان است که بسیار خورنده است. در واقع، فولاد ضد زنگ ۳۱۶ L مقاوم به خوردگی کافی برای استفاده دراز مدت به عنوان مواد کاشتنی نیست و کاربرد آن‌ها در حال حاضر به ابزارهای موقت محدود می‌شود، مانند لوازم تثبیت داخلی یا کششی. در این کاربردها لوازم و تجهیزات پس از بهبودی حذف و خارج می‌شوند [۲۳]. در حال حاضر فولاد ضد زنگ با نیتروژن بالا، مورد استفاده در پروتزهای لگن در کاربردهای پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۴].

۳ نتایج و بحث

۱.۳ زیست‌سازگاری عناصر آلیاژی موجود در فولاد زنگ‌نزن

استفاده از فولاد زنگ‌نزن در کاشتنی‌های پزشکی از سال ۱۹۳۰ آغاز شد. زمانی که استانداردهای ارزیابی سمیت وجود نداشت، تقریباً هیچ گزارش آزمایشگاهی^۲ و درون بافتی^۳ از سمیت عناصر موجود در فولاد زنگ‌نزن وجود نداشته و همواره به عنوان یک فلز زیست‌سازگار شناخته می‌شد. زیست‌سازگاری نسبتاً خوب این آلیاژ در دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ به عنوان جایگزین مفصل در بیماران بالینی مورد استفاده قرار گرفت [۲۵-۲۷].

¹stress corrosion cracking ²in vitro ³in vivo ⁴Catalase ⁵lipoxigenases ⁶cytochromes ⁷hyperglycemia ⁸glucosuria

۲.۳ خواص مکانیکی کاشتنی‌ها از جنس فولاد زنگ‌زن

۱.۲.۳ خواص مکانیکی عمومی

خواصی همچون استحکام تسلیم، استحکام خستگی، استحکام کششی و میزان ازدیاد طول متأثر از ترکیب شیمیایی و روش تولید این گروه از فولادها است [۴۷]. مدول الاستیسیته استثناء بوده زیرا مقدار آن وابسته به ساختار است. فولادهای زنگ‌زن مورد استفاده در مواد کاشتنی، معمولاً به صورت کار شده است (استفاده از فرآیندهای فورج و ماشین کاری). با وجود استحکام مناسب فولاد زنگ‌زن ۳۱۶ نسبت به استحکام استخوان، اما تمایل به استفاده از فولادهای زنگ‌زن به عنوان ماده کاشتنی بسیار کم است. علت آن کار مکانیکی صورت پذیرفته در داخل بدن است که شرایط را بسیار پیچیده می‌کند. یکی از مشکلات اساسی در فولادهای زنگ‌زن قرار داشتن در معرض پدیده‌های خستگی (خوردگی خستگی، فرسایش خستگی) است [۴۸].

۲.۲.۳ خواص خستگی

با توجه به خستگی، مواد زیست پزشکی تحت کشش و فشار شدید و بارگذاری سیکلی قرار دارند، که این امر منجر به کاهش خواص کاشتنی می‌شود [۴۹]. به علت سایش دو سطح بر همدیگر و ایجاد خراش و حفرات روی سطح، پدیده خستگی تشدید شده و مراکز جواهرزنی و رشد ترک ایجاد می‌شود. در نتیجه رشد تدریجی ترک باعث شکست می‌شود. بنابراین، تعیین عمر خستگی مواد به تشکیل لایه اکسید سطحی که نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند را نشان می‌دهد. اصطکاک که بین استخوان و کاشتنی رخ می‌دهد باعث ایجاد پدیده خستگی می‌شود. مطالعات انجام شده توسط ویلیامز، فارساد و همکاران، بررسی گسترده‌ای از شکست‌های کاشتنی‌های فولاد زنگ‌زن ارائه کرده‌اند [۵۰]. فارساد و همکاران نتایج قابل توجهی از ترک خوردگی کاشتنی‌های ساخته شده از فولاد زنگ‌زن در مفصل ران بیماران بدست آورده‌اند. رفتار کاشتنی‌های کوتاه مدت ساخته شده از فولاد زنگ‌زن در کاربردهای پزشکی (۳۱۶L) و همچنین عملکرد کاشتنی‌های دائمی، تخریب و شکست را بدنبال داشته است. خوردگی حفره‌ای، باعث شکستن سطح بین دانه‌ای می‌شود. بطور کلی خستگی خوردگی از خوردگی حفره‌ای ناشی شده است [۵۱]. شکل ۲الف و ۲ب درصد خوردگی را در موقعیت‌های مختلف آناتومی بدن را نشان می‌دهد.

به غیر از خوردگی شیباری، خستگی ناشی از حفره نیز در داخل صفحه فشرده استخوان و ترک ناشی از خوردگی تنشی که به دلیل حفره در داخل شیار کشف شده است. عیب خوردگی به سادگی نمی‌تواند به طور معمول در کاشتنی‌های دائمی آسیب برساند، اما در کاشتنی‌های موقت از جنس فولاد زنگ‌زن ۳۱۶L برای کاربردهای پزشکی و جراحی استفاده می‌شود، آسیب می‌رساند.

در این فولادها رشد ترک در مناطقی که دچار خوردگی حفره‌ای شده است رخ می‌دهد و باعث سرعت بخشیدن به پدیده شکست می‌شود. در مورد پدیده خستگی تحقیقات کمی صورت پذیرفته است، که علت آن استفاده از فولادهای زنگ‌زن آستیتی به عنوان ابزار موقت است (به دلیل مقاومت ضعیف در برابر پدیده خوردگی در محیط بدن انسان).

است [۳۵-۳۷]. در میان طیف وسیعی از حالت‌های اکسیداسیون کروم، حالت‌های Cr^{+3} (سه ظرفیتی) و Cr^{+6} (شش ظرفیتی) شایع ترین یون‌های موجود در بدن هستند، و سمیت آن‌ها وابسته به وضعیت اکسیداسیون است. مقدار کشنده کروم شش ظرفیتی بین ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم در هرکیلوگرم است و با توجه به تحقیقات گذشته سمیت کروم سه ظرفیتی کمتر از کروم شش ظرفیتی است.

علت سمیت بالای کروم شش ظرفیتی به دلیل خواص اکسیدی آن است که با حضور در جریان خون منجر به خسارات در کلیه و کبد می‌شود [۳۸]. کروم از طریق ریه، مصرف مواد خوراکی، تماس پوست با کرومات‌ها و یا از طریق کاشتنی‌ها به درون بدن وارد می‌شوند. در بدن کروم شش ظرفیتی به سه ظرفیتی تبدیل شده و از طریق ادرار دفع می‌شود، اما اگر مقدار کروم زیاد باشد باعث آسیب رساندن به DNA می‌گردد [۳۹].

۳.۱.۳ نیکل

۱.۳.۱.۳ بررسی سمیت عنصر نیکل در بدن

نقش بیولوژیکی نیکل به عنوان یک عنصر ضروری تا سال ۱۹۷۰ شناخته نشده بود [۴۰]. بیشترین حضور نیکل در آلبامین خون است، اما احتمال حضور نیکل در دیگر پروتئین‌ها وجود دارد [۴۱]. درصد بالای نیکل همانند کروم از طریق ادرار دفع می‌شود. غلظت نیکل در بافت‌های گوناگون متفاوت است، مانند ریه ۱۷۳ و یا در کبد ۵۲، قلب ۵۴ و در مغز ۴۴ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن بدن است [۴۲].

تحقیقات انجام شده بر روی جانوران نشان می‌دهد که کمبود نیکل منجر به اختلال در متابولیسم آهن، چربی، قند می‌گردد. همچنین کمبود نیکل در بدن منجر به کاهش وزن، آسیب به پوست و مو می‌شود [۴۳]. بیماری‌های تنفسی ناشی از استنشاق نیکل و بیماری پنومونیت^۱ که به عنوان سرطان حفره بینی و ریه معرفی می‌شود [۴۴].

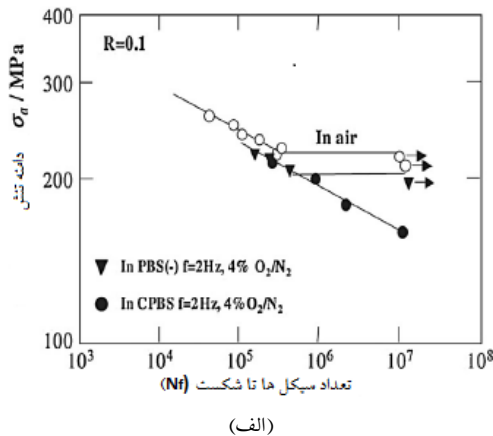
دلیل سرطان‌زا بودن نیکل، وجود ترکیباتی مانند: Ni_3S_2 و $Ni(CO)_4$ است که گازهای سمی هستند [۴۵]. در داخل بدن یون‌های نیکل دو ظرفیتی به لیگاندهای سیتوپلاسمایی چسبیده شده و ضمن سرطان‌زا بودن منجر به جهش‌های ژنتیکی می‌گردد.

نیکل دارای ویژگی‌های خاصی مانند بار منفی سطحی و انحلال کم است. وجود نیکل در بدن منجر به تشکیل رادیکال‌های اکسیژنی و تخریب DNA و ایجاد و رشد تومور می‌شود [۴۶].

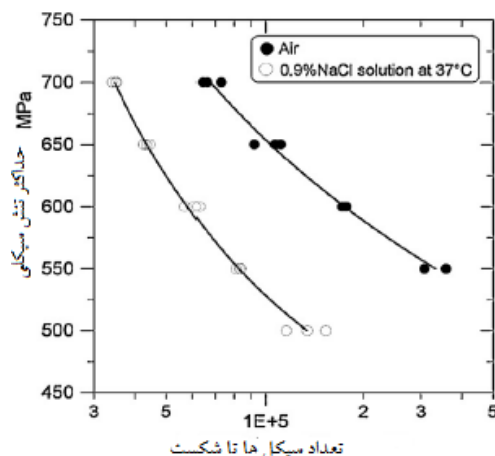
تحقیقات نشان می‌دهد که نیکل عنصری مضر برای رشد سلول‌های استخوان‌ساز است، اما اثر مضر آن از عناصر کبالت و وانادیوم کمتر است. در اثر پدیده خوردگی در اطراف مواد کاشتنی از جنس نیکل، حرکات ذرات در اطراف و حتی در اندام‌های دور وجود دارد. در اثر تزریق نیکل به موش‌های آزمایشگاهی مشاهده شد که این عنصر در کبد و طحال موش تجمع کرده و باعث آسیب رساندن به اندام گردیده است. غلظت نیکل در اطراف ماده کاشتنی فولاد زنگ‌زن، بین ۱۱۶ تا ۱۲۰ میلی‌گرم در لیتر است. نتایج آزمایشگاهی نیز نشان داده است که کبالت، نیکل و کروم عامل سرطان‌زا هستند [۴۷].

¹pneumonitis

فولادهای زنگ‌زن با درصد بالای نیتروژن و مقاومت به خوردگی و مقاومت به خستگی بالا، برای کاشتنی‌های دائمی، از جمله و انواع فولادهای زنگ به عنوان مثال (Orthinox) و آلیاژهای کبالت و آلیاژهای تیتانیوم استفاده می‌گردد. به طور کلی از فولاد زنگ‌زن ۳۱۶ L برای کاشتنی‌های دائمی خیلی کم استفاده می‌شود. جدول ۵ انواع کاربردهای فولاد زنگ‌زن را بیان می‌کند [۵۲].

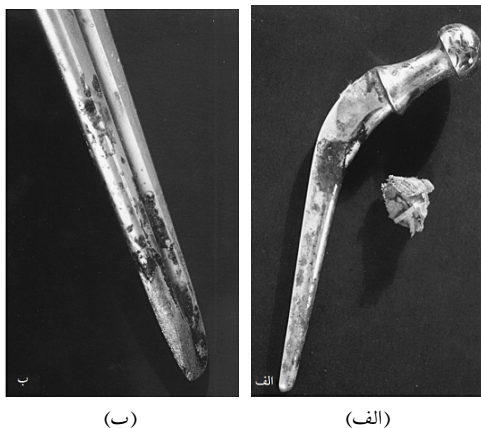


(الف)



(ب)

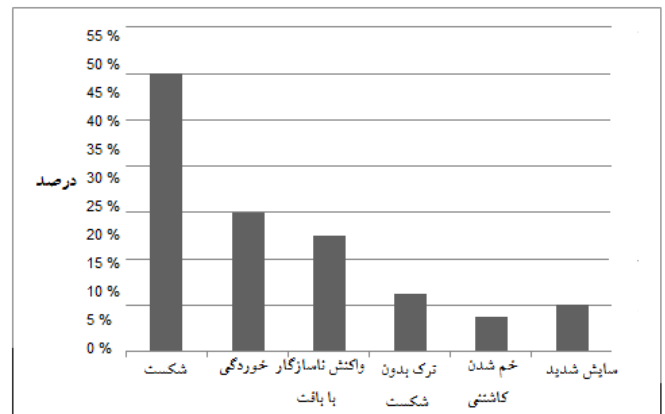
شکل ۳: الف) اثر SBF بر روی نمودار S-N فولاد زنگ‌زن ۳۱۶L ریخته‌گری شده، ب) اثر ۹ درصد محلول NaCl بر خواص خستگی فولاد زنگ‌زن با درصد نیکل کم و نیتروژن بالا [۵۳]



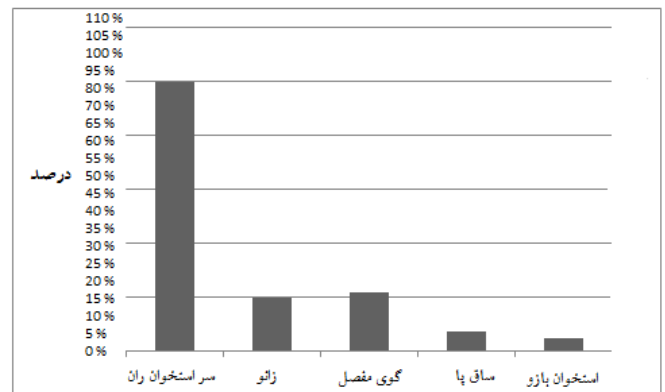
(ب)

(الف)

شکل ۴: الف) میزان خوردگی فولاد ضد زنگ Charnley، و ب) خوردگی حفره ای فولاد ضد زنگ Muller پس از خروج کاشتنی از بدن [۵۱]



(الف)



(ب)

شکل ۲: الف) دلایل عدم عملکرد کاشتنی‌های فولاد زنگ‌زن ب) تخریب کاشتنی‌های فولاد زنگ‌زن در موقعیت‌های مختلف آناتومی بدن [۵۲]

مطالعات نشان می‌دهد استحکام خستگی فولادهای زنگ و مدت زمان عمر آن‌ها در محلول‌های نمکی پایین‌تر از هوا است. داده‌های ذکر شده در جدول ۳ و شکل ۳ به طور خلاصه نشان می‌دهد که فولاد ضد زنگ‌زن ۳۱۶L دارای مقاومت به خستگی پایین است. استحکام خستگی فولادهای زنگ‌زن در محلول‌های زیستی در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ مگا پاسکال است، لازم به ذکر است که حداکثر استحکام کششی در استخوان ران ۲۰۰ مگا پاسکال است [۵۱]. استفاده از عناصر نیتروژن و مولیبدن منجر به افزایش مقاومت به خوردگی و در نتیجه افزایش مقاومت به خستگی می‌گردد.

۳.۳ کاربردهای پزشکی فولاد زنگ‌زن

در سال ۱۹۷۰ John Charnley یک نوع فولاد زنگ‌زن طراحی کرد که شامل سه بخش بود: فولاد زنگ‌زن شامل ساقه و سر، یک قطعه پلی اتیلن و یک سیمان استخوانی PMMA. بررسی و شیوه شکست این نوع کاشتنی را مورد مطالعه قرار دادند. تجزیه و تحلیل شکست نشان داده است که تمام شکست‌ها از نوع خستگی بوده است. نتایج به دست آمده در ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ نشان داد که فولاد زنگ‌زن برای کاشتنی‌های دراز مدت (کاشتنی مفصل ران) به علت مقاوم به خوردگی ضعیف مناسب نیستند. فولاد زنگ‌زن نیز دارای معایب دیگری، از جمله خوردگی تنشی (SCC)، مقاومت به سایش کم، و همچنین سمیت و سرطان‌زایی نیکل و کروم آزاد شده از آلیاژ است. از

جدول ۳: الزامات و خواص مکانیکی انواع فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L (ASTM F۱۳۸) و انواع در سیم یا مفتول [۹]

انواع فولادی زنگ نزن ۳۱۶L	نوع شرایط تولید	استحکام کششی min /MPa	استحکام تسلیم min /MPa	مدول الاستیک min /%
F138	آنیل شده	۴۹۰	۱۹۰	۴۰
	کار سرد شده	۸۶۰	۶۹۰	۱۲
F1314	سخت‌کاری شده	۱۳۵۰		
	آنیل شده	۶۹۰	۳۸۰	۳۵
F1586	کار سرد شده	۱۰۳۵	۸۶۲	۱۲
	آنیل شده	۷۴۰	۴۳۰	۳۵
F2229	کار سرد شده	۱۰۰۰	۷۰۰	۲۰
	سخت‌کاری شده	۱۱۰۰	۱۰۰۰	۱۰
F2229	آنیل شده	۹۳۱	۵۸۶	۵۲
	کار سرد شده ۱۰٪	۱۰۶۲	۷۸۶	۳۷
F2229	کار سرد شده ۲۰٪	۱۲۶۲	۹۵۲	۲۵
	کار سرد شده ۳۰٪	۱۴۹۶	۱۲۲۷	۱۹
F2229	کار سرد شده ۴۰٪	۱۷۳۱	۱۵۵۱	۱۲

جدول ۴: خواص خستگی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L (۱۰^۶ تا ۱۰^۷ چرخه) [۵۲]

آلیاژها	استحکام خستگی در محیط اتاق بر حسب فرکانس	استحکام خستگی در محلول بدن بر حسب فرکانس	R
۳۱۶L ریخته‌گری شده-فورج شده	۲۲۰ / ۲۰Hz	۲۰۰ / ۲Hz	-۱
۳۱۶LVM کارسرد شده	-	۳۰۰ / ۱Hz	۰/۰۵۳
۳۱۶LVM کارسرد شده	<۶۰۰ / ۱۰Hz	<۶۰۰ / ۱۰Hz	۰
۳۱۶LVM کارسرد شده	<۳۴۰ / ۱۲۰Hz	<۳۴۰ / ۱۲۰Hz	۰/۱
۳۱۶L آنیل شده	<۲۹۰ / ۱۲۰Hz	<۲۹۰ / ۱۲۰Hz	۰/۱
۳۱۶L آنیل شده	-	<۴۰۰ / ۱Hz	-۱
۳۱۶L آنیل شده	-	<۴۶۰ / ۱Hz	-۱
ISO 5832-9	<۵۵۰	<۵۰۰ / ۱۰Hz	۰/۰۱

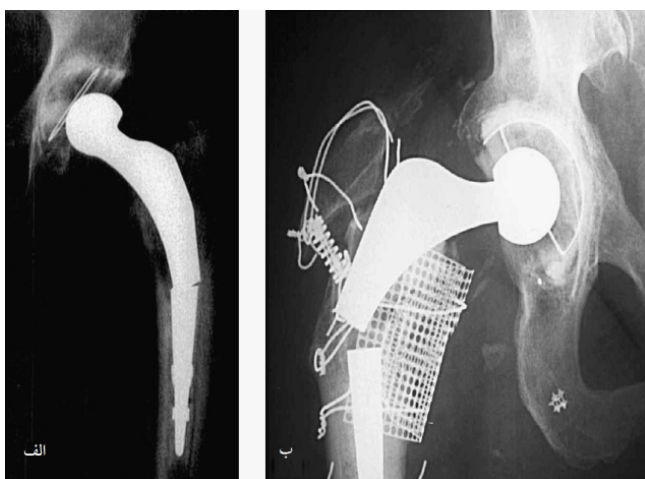
۴.۳ موضوعات، مسائل و چالش‌های فعلی فولاد زنگ‌نزن در کاربردهای پزشکی و راه‌های بهبود خواص این آلیاژ

استفاده از فولادهای زنگ‌نزن به عنوان ابزار کوتاه‌مدت (چندین ماه تا چندین سال) نمی‌توان عدم شکست در فولاد ضد زنگ را تضمین کرد، زیرا شکست‌های زودگذر فولاد ضد زنگ ۳۱۶L در کاشتنی‌های ارتوپدی گزارش شده است (شکل ۶) [۵۲].

تجزیه و تحلیل شکست کاشتنی‌های فولاد ۳۱۶L نشان داده است که شکست‌ها ناشی از خستگی است. به دلیل عیوب ماشینکاری و ایجاد خراش و سطح ناصاف که منجر به نقاط تمرکز تنش و ایجاد ترک و رشد ترک و در نتیجه شکست این کاشتنی‌ها شده است. از این رو، شکست ناشی از خستگی کاشتنی‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L را می‌توان با کنترل کیفیت سطح و روش‌های اصلاح سطح، مانند نیتروژن‌دهی خواص این آلیاژ را بهبود نمود [۵۲].



شکل ۵: تصویر رادیوگرافی شکست کاشتنی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L در بدن بیمار [۵۱]



شکل ۶: شکست کاشتنی مفصل گوی ران بعد از ۶ سال [۵۱]

جدول ۵: کاربردهای پزشکی فولاد زنگ‌نزن [۹]

مواد	نوع وسایل ساخته شده	کاربرها
فولاد زنگ نزن ۳۱۶ L	پیچ و پین	وسایل تثبیت شکستگی‌های داخلی استخوان- کاربردهای ارتوپدی
فولاد زنگ نزن ۳۱۶ L	صفحه استخوان‌بند	تثبیت شکستگی‌های فک و صورت
فولاد زنگ نزن ۳۱۶ L	میخ	تثبیت شکستگی داخلی در انتهای استخوان‌های تحمل‌کننده وزن
فولاد زنگ نزن ۳۱۶ L Orthinox	میخ داخلی استخوان- پروتز مفصل	جایگزین مفاصل (شانه، لگن، زانو، مچ پا و انگشت پا)
فولاد زنگ نزن ۳۱۶ L	سیم	برای شکستگی‌های استخوان میله‌ای
فولاد زنگ نزن ۳۱۶ L	میله‌های نگه‌دارنده ستون فقرات	میله و قلاب
فولاد زنگ نزن ۳۱۶ L	سیم‌های مشبک	بازسازی استخوان فک
فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و ۳۱۶	ابزار بخیه	جهت بستن زخم، شکاف لب و کام، حفاظت از سیم مش در جراحی بینی، تاندون و عصب، جراحی فک پایین
فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و ۳۱۶ L	پروتزهای گوش میانی	جایگزین فنجانی زانو
فولاد زنگ‌نزن ۳۰۱، ۳۰۴، ۳۱۶، ۴۲۰، ۴۳۱	گیره‌های الکترومغناطیسی و عصبی	انسداد موقت یا دائمی عروق خونی داخل جمجمه، گیره‌های مختلف جهت پیکربندی
فولاد زنگ‌نزن به صورت سیم‌های خم‌دار	استنت قابل انعطاف	جهت درمان تنگی نفس
فولاد زنگ نزن ۳۰۴	لوله‌های تنفسی	نای (مری)
فولاد زنگ نزن ۳۱۶	پروتز حنجره الکترونیکی	سیستم منبع صدای الکترومغناطیسی
فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ L، ۳۱۶، ۳۰۴	الکتروود و سیم‌های هادی (کاتد و آند)	محرك عضلانی، محرك رشد استخوان، ضربان ساز قلب
فولاد زنگ نزن ۳۱۶ و ۳۰۴	پین‌های نگهداری برای آمالگام دندان	حفظ و ترمیم‌های آمالگام دندان‌های بزرگ
فولاد زنگ نزن ۳۰۴	تاج دندان	پوسته پیش ساخته در دندان دائمی
فولاد زنگ نزن ۳۰۲، ۳۰۳، ۳۰۴ و ۳۰۵	براکت، قلاب، فدر، گیره	لوازم ثابت ارتودنسی
فولاد زنگ‌نزن	سوزن، سوزن سرنگ	طب سوزنی
فولاد زنگ‌نزن	تیغ، چاقو و انبر جراحی	ابزار پزشکی و دندانپزشکی

آلیاژها را شکننده کند.

۴ نتیجه‌گیری

فولاد زنگ‌نزن آستنیتی به عنوان ماده کاشتنی در کاربردهای پزشکی به دلیل در دسترس بودن، قیمت پایین، خواص تولید بالا، زیست سازگاری و چقرمگی به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کنترل خواص مکانیکی (استحکام

برای حذف اثرات نامطلوب یون‌های نیکل به بدن انسان می‌توان این عنصر را با نیتروژن جایگزین کرد، و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی نیتروژن بالا و بدون نیکل برای کاربردهای پزشکی تولید نمود. نیتروژن جایگزین نیکل جهت ایجاد ساختار آستنیتی، و نیز بهبود کلی خواص ساختاری فولاد و همچنین رفع مشکل عناصر سمی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L، استحکام بالا، زیست‌سازگاری مناسب و مقاومت به خوردگی بالاتر است [۵۲]. با این حال، باید سخت شدن این آلیاژها را مورد بررسی قرار داد، زیرا محتوای بالای نیتروژن می‌تواند

- [10] Alvarado, Jorge, Maldonado, Ricardo, Marxuach, Jorge, and Otero, Ruben. Biomechanics of hip and knee prostheses. *Applications of Engineering Mechanics in Medicine, GED-University of Puerto Rico Mayaguez*, pp. 1-20, 2003.
- [11] Muñoz, Alexandra and Costa, Max. Elucidating the mechanisms of nickel compound uptake: a review of particulate and nano-nickel endocytosis and toxicity. *Toxicology and applied pharmacology*, 260(1):1-16, 2012.
- [12] Sumita, M, Hanawa, T, Ohnishi, I, and Yoneyama, T. Failure processes in biometallic materials. 2003.
- [13] Røkkum, Magne, Bye, Kjell, Hetland, Karl R, and Reigstad, Astor. Stem fracture with the exeter prosthesis 3 of 27 hips followed for 10 years. *Acta orthopaedica Scandinavica*, 66(5):435-439, 1995.
- [14] Diamantino, Teresa C, Guilhermino, Lucia, Almeida, Elisabete, and Soares, Amadeu MVM. Toxicity of sodium molybdate and sodium dichromate to daphnia magna straus evaluated in acute, chronic, and acetylcholinesterase inhibition tests. *Ecotoxicology and environmental Safety*, 45(3):253-259, 2000.
- [15] Rask, Fiona, Mihic, Anton, Reis, Lewis, Dallabrida, Susan M, Ismail, Nesreen S, Sider, Krista, Simmons, Craig A, Rupnick, Maria A, Weisel, Richard D, Li, Ren-Ke, et al. Hydrogels modified with qhredgs peptide support cardiomyocyte survival in vitro and after sub-cutaneous implantation. *Soft Matter*, 6(20):5089-5099, 2010.
- [16] dos Santos, Venina, Brandalise, Rosmary Nichele, and Savaris, Michele. Metallic biomaterials. in *Engineering of Biomaterials*, pp. 17-28. Springer, 2017.
- [17] Kamath, Atul F, Voleti, Pramod B, Kim, Tae Won B, Garino, Jonathan P, and Lee, Gwo-Chin. Impaction bone grafting with proximal and distal femoral arthroplasty. *The Journal of arthroplasty*, 26(8):1520-1526, 2011.
- [18] J.E. Lemons, K.M.W. Niemann, A.B. Weiss J. Biomed. Mater. Res. p. 549-553, 1976.
- [19] Escalas, Felix, Galante, Jorge, Rostoker, William, and Coogan, Philip. Biocompatibility of materials for total joint replacement. *Journal of biomedical materials research*, 10(2):175-195, 1976.
- [20] Ellingsen, Jan Eirik. Surface configurations of dental implants. *Periodontology 2000*, 17(1):36-46, 1998.
- [21] Doran, A, Law, FC, Allen, MJ, and Rushton, N. Neoplastic transformation of cells by soluble but not particulate forms of metals used in orthopaedic implants. *Biomaterials*, 19(7-9):751-759, 1998.
- [22] Mu, Ying, Kobayashi, Takeshi, Sumita, Masae, Yamamoto, Akiko, and Hanawa, Takao. Metal ion release from titanium with active oxygen species generated by rat macrophages in vitro. *Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials and The Japanese Society for Biomaterials*, 49(2):238-243, 2000.
- [23] Bertini, Ivano, Gray, Harry B, Lippard, Stephen J, and Valentine, Joan Selverstone. *Bioinorganic chemistry*. University Science Books, 1994.

و شکل پذیری) با استفاده از ترکیب شیمیایی یکی از نقاط برجسته این آلیاژ است. با این حال، کاشتنی‌های فولاد زنگ‌زن ۳۱۶L اغلب به دلیل خوردگی حفره ای و شیار، خستگی خوردگی، خوردگی سایشی، ترک خوردگی تنش و خوردگی گالوانیزه در بدن تضعیف و تخریب می‌شوند.

مقاومت به سایش فولاد زنگ‌زن آستینیتی ۳۱۶L نسبتاً ضعیف است. ذرات جدا شده به دلیل سایش منجر به حساسیت و التهاب در بافت‌های اطراف می‌شود. این یکی دیگر از دلایل محدودکننده کاربرد آن‌ها در کاشتنی‌های دائمی است. فولاد زنگ‌زن ۳۱۶L جهت صرفه‌جویی در هزینه‌ها، در ابزارهای مختلف جراحی و کاشتنی‌های کوتاه مدت استفاده می‌شود. با این وجود، نقش اصلی فولاد زنگ‌زن به عنوان پروتزهای دائمی لگن با توسعه فولاد زنگ‌زن با نیتروژن بالا و نیکل کم است. در حال حاضر، میله‌های ساخته شده از فولاد زنگ‌زن Orthinox جهت جایگزینی کامل مفصل در بازار امریکا وجود دارد و مورد استفاده قرار می‌گیرد. پدیده‌های خستگی در فولاد زنگ‌زن ۳۱۶L را می‌توان با افزایش کیفیت سطح، اصلاح سطح و عملیات سطحی مانند نیتروژن دهی کنترل و بهبود نمود. طی این تحقیق انجام شده می‌توان از فولاد زنگ‌زن ۳۱۶L با نیتروژن بالا جهت کاربردهای دائمی و مکان‌های تحت بار در بدن استفاده نمود.

مراجع

- [1] Park, Joon B and Bronzino, Joseph D. *Biomaterials: principles and applications*. crc press, 2002.
- [2] Nie, X, Tsotsos, C, Wilson, A, Yerokhin, AL, Leyland, A, and Matthews, A. Characteristics of a plasma electrolytic nitrocarburising treatment for stainless steels. *Surface and Coatings Technology*, 139(2-3):135-142, 2001.
- [3] Yerokhin, AL, Nie, X, Leyland, A, Matthews, A, and Dowey, SJ. Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and coatings technology*, 122(2-3):73-93, 1999.
- [4] Bandyopadhyay, Amit, Espana, Felix, Balla, Vamsi Krishna, Bose, Susmita, Ohgami, Yusuke, and Davies, Neal M. Influence of porosity on mechanical properties and in vivo response of ti6al4v implants. *Acta biomaterialia*, 6(4):1640-1648, 2010.
- [5] Shahryari, Abdullah, Omanovic, Sasha, and Szpunar, Jerzy A. Electrochemical formation of highly pitting resistant passive films on a biomedical grade 316lvm stainless steel surface. *Materials Science and Engineering: C*, 28(1):94-106, 2008.
- [6] Disegil, JA and Eschbachz, L. Stainless steel in bone surgery. j. care injured 31. tech. rep., S-D2-6, 2000.
- [7] Lo, Kin Ho, Shek, Chan Hung, and Lai, JKL. Recent developments in stainless steels. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 65(4-6):39-104, 2009.
- [8] C.B. Klein, K. Frenkel, M. Costa Chem. Res, 1991. Toxicol.
- [9] International, ASM. *Handbook of materials for medical devices*. ASM international, 2003.

- [36] Brown, Patrick H, Welch, Ross M, Cary, Earle E, and Checkai, Ron T. Micronutrients: beneficial effects of nickel on plant growth. *Journal of Plant Nutrition*, 10(9-16):2125-2135, 1987.
- [37] Kawamoto, Toshihiro, Matsuda, Takayuki, Oyama, Tsunehiro, Tanaka, Masayuki, Yu, Hsu-Sheng, Uchiyama, Iwao, et al. Historical review on development of environmental quality standards and guideline values for air pollutants in japan. *International journal of hygiene and environmental health*, 214(4):296-304, 2011.
- [38] Zhao, Jinshun, Shi, Xianglin, Castranova, Vincent, and Ding, Min. Occupational toxicology of nickel and nickel compounds. *Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology*, 28(3), 2009.
- [39] Dunnick, June K, Elwell, Michael R, Radovsky, Ann E, Benson, Janet M, Hahn, Fletcher F, Nikula, Kristan J, Barr, Edward B, and Hobbs, Charles H. Comparative carcinogenic effects of nickel subsulfide, nickel oxide, or nickel sulfate hexahydrate chronic exposures in the lung. *Cancer research*, 55(22):5251-5256, 1995.
- [40] Rostoker, W, Chao, EYS, and Galante, JO. Defects in failed stems of hip prostheses. *Journal of biomedical materials research*, 12(5):635-651, 1978.
- [41] J.R. Cahoon, R.N. Holte, J. Biomed. Mater. Res. p. 137-145, 1981.
- [42] MAGNUSSON, BERTIL, BERGMAN, MAUD, Bergman, BO, and SÖREMARK, RENE. Nickel allergy and nickel-containing dental alloys. *European Journal of Oral Sciences*, 90(2):163-167, 1982.
- [43] Sun, Zhi Lin, Wataha, John C, and Hanks, Carl T. Effects of metal ions on osteoblast-like cell metabolism and differentiation. *Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials and The Japanese Society for Biomaterials*, 34(1):29-37, 1997.
- [44] Leunig, M and Ganz, R. The evolution and concepts of joint-preserving surgery of the hip. *The bone & joint journal*, 96(1):5-18, 2014.
- [45] Gonçalves, Tatiana Siqueira, de Menezes, Luciane Macedo, Trindade, Cristiano, da Silva Machado, Miriana, Thomas, Philip, Fenech, Michael, and Henriques, João Antonio Pêgas. Cytotoxicity and genotoxicity of orthodontic bands with or without silver soldered joints. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 762:1-8, 2014.
- [46] Hirakawa, Kazuo, Bauer, Thomas W, Stulberg, Bernard N, and Wilde, Alan H. Comparison and quantitation of wear debris of failed total hip and total knee arthroplasty. *Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials and The Japanese Society for Biomaterials*, 31(2):257-263, 1996.
- [47] El-Shiekh, Hussam El-Din F. *Finite element simulation of hip joint replacement under static and dynamic loading*. Ph.D. thesis, Dublin City University, 2002.
- [48] Cubillos, Patrícia Ortega, Claudio Teodoro dos Santos Ieda Maria Vieira Caminha Maurício de Jesus Monteiro Robson de Oliveira Centeno Vinícius Oliveira dos Santos and de Mello Roesler, Carlos Rodrigo. Chemical and
- [24] Cheney, Karla, Gumbiner, Carl, Benson, Blaine, and Tenenbein, Milton. Survival after a severe iron poisoning treated with intermittent infusions of deferoxamine. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 33(1):61-66, 1995.
- [25] Abdou, Kh A and Sharkawy, AA. Some toxicological studies on ivermectin in goats. in *Proceeding of the 20 Annual meeting of the Egyptian Society of toxicology. Bibliotheca Alexandria, Alexandria University, Alexandria, Egypt*, pp. 18-19, 2004.
- [26] Dunkel, Virginia C, San, Richard HC, Seifried, Harold E, and Whittaker, Paul. Genotoxicity of iron compounds in salmonella typhimurium and I5178y mouse lymphoma cells. *Environmental and molecular mutagenesis*, 33(1):28-41, 1999.
- [27] Brar, Sonia, Henderson, David, Schenck, John, and Zimmerman, Earl A. Iron accumulation in the substantia nigra of patients with alzheimer disease and parkinsonism. *Archives of neurology*, 66(3):371-374, 2009.
- [28] Ikarashi, Yoshiaki, Toyoda, Kazuhiro, Kobayashi, Equo, Doi, Hisashi, Yoneyama, Takayuki, Hamanaka, Hitoshi, and Tsuchiya, Toshie. Improved biocompatibility of titanium-zirconium (ti-zr) alloy: tissue reaction and sensitization to ti-zr alloy compared with pure ti and zr in rat implantation study. *Materials transactions*, 46(10):2260-2267, 2005.
- [29] Denizoglu, Saip and Duymus, Zeynep Yesil. Evaluation of cobalt, chromium, and nickel concentrations in plasma and blood of patients with removable partial dentures. *Dental materials journal*, 25(2):365-370, 2006.
- [30] Daraei, Hasti, Mittal, Alok, Noorisepehr, Mohammad, and Mittal, Jyoti. Separation of chromium from water samples using eggshell powder as a low-cost sorbent: Kinetic and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*, 53(1):214-220, 2015.
- [31] Daraei, Hasti, Mittal, Alok, Noorisepehr, Mohammad, and Mittal, Jyoti. Separation of chromium from water samples using eggshell powder as a low-cost sorbent: Kinetic and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*, 53(1):214-220, 2015.
- [32] Oliveira, S Carlos B and Oliveira-Brett, AM. In situ evaluation of chromium-dna damage using a dna-electrochemical biosensor. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 398(4):1633-1641, 2010.
- [33] Ragsdale, Stephen W. Nickel and its surprising impact in nature. metal ions in life sciences, vol. 2. edited by astrid sigel, helmut sigel, and roland ko sigel. *Angewandte Chemie International Edition*, 47(5):824-826, 2008.
- [34] Wezynfeld, Nina Ewa, Bonna, Arkadiusz, Bal, Wojciech, and Frączyk, Tomasz. Ni (ii) ions cleave and inactivate human alpha-1 antitrypsin hydrolytically, implicating nickel exposure as a contributing factor in pathologies related to antitrypsin deficiency. *Metallomics*, 7(4):596-604, 2015.
- [35] Rezuke, William N, Knight, Joseph A, and Sunderman Jr, F William. Reference values for nickel concentrations in human tissues and bile. *American journal of industrial medicine*, 11(4):419-426, 1987.

- microstructural characterization of modular femoral stems manufactured in iso 5832-9 stainless steel. *Metallography, Microstructure, and Analysis* 6, (1):44-54, 2017.
- [49] Rossetto, Victor José Vieira. Artroplastia total híbrida nacional em cães portadores de displasia coxofemoral. pp. 68-f, 2015.
- [50] Walczak, J., F. Shahgaldi and Heatley, F. In vivo corrosion of 316l stainless-steel hip implants: morphology and elemental compositions of corrosion products. *Biomaterials*, 1-3(19):229-237, 1998.
- [51] Manam, NS, Harun, WSW, Shri, DNA, Ghani, SAC, Kurniawan, T, Ismail, Muhammad Hussain, and Ibrahim, MHI. Study of corrosion in biocompatible metals for implants: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 701:698-715, 2017.
- [52] O. Reigstad, P. Siewers, M. Rokkum B. Espehaug Acta Orthop. p. 194-202, 2008.
- [53] Tavares, SSM, Mainier, FB, Zimmerman, F, Freitas, R, and Ajus, CMI. Characterization of prematurely failed stainless steel orthopedic implants. *Engineering Failure Analysis*, 5(17):1246-1253, 2010.