

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٣٢٤



تجزیه و تحلیل شکل پذیری ورق فلز تانتالوم

علی اکبر شبانی

دانشکده فنی

گروه مکانیک

۱۳۸۷

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

۱۳۸۹/۴/۸

توسعه واحدهای مزرعه سمی بزرگ
توسعه مزرعه

اساتید راهنما:

دکتر علی دنیوی

دکتر رامین ابراهیمی

۱۳۸۶۰۴

پایان نامه آقای **عبدالرشید شکرمان** به تاریخ ۲۱/۱۲/۸۱ شماره ۱۱۶-۲ ف مورد پذیرش هیات محترم داوران با رتبه **حسب** و نمره ۱۷/۵ قرار گرفت.

۱- استاد راهنما اول و رئیس هیات داوران: دکتر علی دنیوی

۲- استاد راهنما دوم: دکتر رامین ابراهیمی

۳- داور خارجی: دکتر مقصود سلیمانپور

۴- داور داخلی: دکتر صمد جعفرمنار

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر جواد سوری نیا

حق طبع و نشر مطالب این پایان نامه
در انجمن دانشگاه ارومیه می باشد.

فهرست مطالب

۱.....چکیده

فصل اول: کلیات

۲..... ۱-۱. مقدمه

۴..... ۲-۱. هدف از انجام تحقیق

فصل دوم: مروری بر تحقیقات انجام شده

۵..... ۱-۲. فلزات دیرگداز

۸..... ۲-۲. تانتالوم

۹..... ۱-۲-۲. کاربرد

۱۰..... ۲-۲-۲. تاریخچه

۱۰..... ۳-۲-۲. پیدایش

۱۰..... ۴-۲-۲. ترکیبات

۱۱..... ۳-۲. نمودارهای حد شکل دهی FLD

۱۵..... ۴-۲. عوامل مؤثر بر نمودار حد شکل دهی

- ۱-۴-۲. اثر مسیر کرنش بر روی نمودار حد شکل دهی..... ۱۶
- ۲-۴-۲. اثر ضخامت بر نمودار حد شکل دهی..... ۱۷
- ۳-۴-۲. اثر کرنش سختی ۱۸
- ۴-۴-۲. حساسیت به نرخ ۲۰
- ۵-۴-۲. ناهمگنی ۲۱
- ۶-۴-۲. ملاحظات دیگر ۲۳

فصل سوم: مواد و روشهای اجرا شده

- ۱-۳. مقدمه ۲۴
- ۲-۳. آنیل کاری ۲۵
- ۳-۳. متالوگرافی ۲۵
- ۴-۳. سختی سنجی ۲۷
- ۵-۳. آزمایش کشش ۲۸
- ۶-۳. آزمایش اریکسون ۲۹
- ۷-۳. آزمایش فشار ۳۱

فصل چهارم: تجزیه و تحلیل و نتایج آزمایشها

- ۱-۴. آنیل کاری ۳۳
- ۲-۴. متالوگرافی ۳۴
- ۳-۴. سختی سنجی ۳۶

..... ۳۷	..... ۴-۴	..... آزمایش کشش
..... ۳۸	..... ۵-۴	..... نمودار نیرو - ازدیاد طول
..... ۴۱	..... ۶-۴	..... منحنی تنش - کرنش مهندسی
..... ۴۲	..... ۷-۴	..... منحنی تنش - کرنش حقیقی
..... ۵۱	..... ۸-۴	..... آزمایش اریکسون
..... ۵۹	..... ۹-۴	..... آزمایش فشار
..... ۶۷	..... ۱-۹-۴	..... بدست آوردن نمودار حد شکل دهی با آزمایش فشار
..... ۷۶	..... ۱۰-۴	..... پیش بینی قابلیت ساخت یک قطعه تانتالومی

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

..... ۷۹	..... ۱-۵	..... مقدمه
..... ۸۰	..... ۲-۵	..... نتیجه گیری
..... ۸۲	..... ۳-۵	..... پیشنهادات
..... ۸۴	.....	..... مراجع

فهرست جداول

فصل دوم

جدول (۱-۲) - فلزات با دمای ذوب بیشتر از 2000°C ۵

فصل سوم

جدول (۱-۳) - ترکیبات شیمیایی تانتالوم (%) ۲۴

فصل چهارم

جدول (۱-۴) - ریزساختار نمونه‌های آنیل شده ۳۴

جدول (۲-۴) - نتایج آزمایش سختی سنجی ویکرز برای تانتالوم آنیل نشده ۳۶

جدول (۳-۴) - نتایج آزمایش سختی سنجی ویکرز برای تانتالوم آنیل شده ۳۷

جدول (۴-۴) - نتایج حاصل از آزمایش کشش بر روی نمونه با ضخامت $0/1$ میلیمتر ۴۰

جدول (۵-۴) - نتایج حاصل از آزمایش کشش بر روی نمونه با ضخامت $0/2$ میلیمتر ۴۰

جدول (۶-۴) - نتایج خروجی آزمایش اریکسون برای ورق با ضخامت $0/1$ ۵۲

جدول (۷-۴) - نتایج خروجی آزمایش اریکسون برای ورق با ضخامت $0/2$ ۵۲

جدول (۸-۴) - نتایج خروجی آزمایش اریکسون برای ورق با ضخامت $0/3$ ۵۲

فهرست تصاویر

فصل دوم

- شکل (۱-۲) - واپیچش دایره‌های چاپی در نزدیکی باریک شدگی موضعی و ثبت کرنشها در دایره‌ها ... ۱۳
- شکل (۲-۲) - نمودار حد شکل دادن فولاد کم کربن ۱۴
- شکل (۳-۲) - اثر مسیرهای کرنش متفاوت بر FLD ۱۸
- شکل (۴-۲) - اثر ضخامت بر FLD ۱۹
- شکل (۵-۲) - برخورد نمودار FLD با محور کرنش اصلی در نقطه‌ای معادل نمای کرنش-سختی ۱۹
- شکل (۶-۲) - نمودار FLD برای یک ورق با نمای کرنش-سختی زیاد و کم ۲۰
- شکل (۷-۲) - نمودارهای نشان دهنده تاثیر حساسیت به نرخ ۲۱
- شکل (۸-۲) - تاثیر بزرگی عیوب بر FLD ۲۲
- شکل (۹-۲) - ناهمگنی موجود در ماده ۲۲
- شکل (۱۰-۲) - نمودار تغییرات FLD، هنگامی که یک خاصیت در حال تغییر است ۲۳

فصل سوم

- شکل (۱-۳) - نمونه مانع شده ۲۶
- شکل (۲-۳) - ساختار دانه بندی حاصل از متالوگرافی ۲۷
- شکل (۳-۳) - ابعاد نمونه آزمایش کشش ۲۸

- شکل (۳-۴) - نمونه‌های آماده شده آزمایش کشش ۲۸
- شکل (۳-۵) - نمونه‌های برش خورده جهت آزمایش اریکسون ۲۹
- شکل (۳-۶) - نمونه‌های مدرج شده با دایره‌هایی به قطر ۳ میلیمتر جهت آزمایش اریکسون ۲۹
- شکل (۳-۷) - نمونه‌ها پس از انجام آزمایش اریکسون ۳۰
- شکل (۳-۸) - نمونه آزمایش فشار ۳۱
- شکل (۳-۹) - دستگاه آزمایش فشار ۳۱
- شکل (۳-۱۰) - نمونه پس از انجام آزمایش فشار ۳۲

فصل چهارم

- شکل (۴-۱) - ساختار دانه بندی تانتالوم ۳۵
- شکل (۴-۲) - نمونه آزمایش کشش ۳۷
- شکل (۴-۳) - نمودار نیرو-ازدیاد طول ۳۸
- شکل (۴-۴) - نمودار نیرو-ازدیاد طول برای آزمایش کشش با ضخامت ۰/۱ ۳۹
- شکل (۴-۵) - نمودار نیرو-ازدیاد طول برای آزمایش کشش با ضخامت ۰/۲ ۴۰
- شکل (۴-۶) - نمودار تنش-کرنش مهندسی برای آزمایش کشش با ضخامت ۰/۱ ۴۱
- شکل (۴-۷) - نمودار تنش-کرنش مهندسی برای آزمایش کشش با ضخامت ۰/۲ ۴۲
- شکل (۴-۸) - نمودار تنش-کرنش حقیقی اصلاح نشده برای آزمایش کشش با ضخامت ۰/۱ ۴۳
- شکل (۴-۹) - نمودار تنش-کرنش حقیقی اصلاح نشده برای آزمایش کشش با ضخامت ۰/۲ ۴۴
- شکل (۴-۱۰) - نمودار تنش-کرنش در مقیاس لگاریتم طبیعی برای ورق با ضخامت ۰/۱ ۴۶
- شکل (۴-۱۱) - نمونه ورق نشان دهنده تغییر شکل دایره به بیضی ۴۶
- شکل (۴-۱۲) - نمونه آزمایش کشش پس از انجام آزمایش و تبدیل دایره‌ها به بیضی ۴۷

- شکل (۴-۱۳)- اضافه شدن کرنش نقاط گلوبی شدن و شکست به نمودار تنش-کرنش حقیقی برای ورق با ضخامت ۰/۱ ۴۸
- شکل (۴-۱۴)- نمودار تنش-کرنش در مقیاس لگاریتم طبیعی برای ورق با ضخامت ۰/۲ ۴۹
- شکل (۴-۱۵)- اضافه شدن کرنش نقاط گلوبی شدن و شکست به نمودار تنش-کرنش حقیقی برای ورق با ضخامت ۰/۲ ۴۹
- شکل (۴-۱۶)- مقایسه نمودارهای تنش-کرنش در ضخامت های ۰/۱ و ۰/۲ میلیمتر ۵۰
- شکل (۴-۱۷)- قالب دستگاه آزمایش اریکسون ۵۱
- شکل (۴-۱۸)- اندازه گیری قطرهای کوچک و بزرگ بیضی، نزدیک محل شکست ۵۳
- شکل (۴-۱۹)- نمودار FLD برای ضخامت ۰/۱ ۵۴
- شکل (۴-۲۰)- نمودار FLD برای ضخامت ۰/۲ ۵۴
- شکل (۴-۲۱)- نمودار FLD برای ضخامت ۰/۳ ۵۵
- شکل (۴-۲۲)- نمودار FLD به تفکیک پهناهای مختلف نمونه‌ها برای ضخامت ۰/۱ ۵۵
- شکل (۴-۲۳)- نمودار FLD به تفکیک پهناهای مختلف نمونه‌ها برای ضخامت ۰/۲ ۵۶
- شکل (۴-۲۴)- نمودار FLD به تفکیک پهناهای مختلف نمونه‌ها برای ضخامت ۰/۳ ۵۶
- شکل (۴-۲۵)- اندازه گیری ابعاد بیضی در نزدیکی محل شکست در آزمایش کشش ۵۷
- شکل (۴-۲۶)- اضافه شدن مقادیر مربوط به آزمایش کشش به FLD برای ضخامت ۰/۱ ۵۸
- شکل (۴-۲۷)- اضافه شدن مقادیر مربوط به آزمایش کشش به FLD برای ضخامت ۰/۲ ۵۸
- شکل (۴-۲۸)- نمونه بشکه‌ای شده پس از آزمایش فشار ۵۹
- شکل (۴-۲۹)- ترک ایجاد شده در آزمایش فشار ۶۰
- شکل (۴-۳۰)- نمودار نیرو-جابجایی برای آزمایش فشار در حالت بدون روانکار ۶۰
- شکل (۴-۳۱)- نمودار نیرو-جابجایی برای آزمایش فشار در حالت با روانکار ۶۱

- شکل (۴-۳۲) - نمودار تنش- کرنش حقیقی برای آزمایش فشار در حالت بدون روانکار ۶۱
- شکل (۴-۳۳) - نمودار تنش- کرنش حقیقی برای آزمایش فشار در حالت با روانکار ۶۲
- شکل (۴-۳۴) - نمودار تنش- کرنش در آزمایش فشار گرم در شرایط اصطکاکی متفاوت ۶۳
- شکل (۴-۳۵) - نمودار تنش- کرنش حقیقی در دو حالت با روانکار و بدون روانکار ۶۳
- شکل (۴-۳۶) - نمایش ساده آزمایش فشار ۶۴
- شکل (۴-۳۷) - نمودار تنش- کرنش با احتساب عامل اصطکاک و بدون احتساب عامل اصطکاک .. ۶۶
- شکل (۴-۳۸) - نمودار تنش- کرنش حقیقی در مقیاس لگاریتمی ۶۷
- شکل (۴-۳۹) - شماتیک نمونه ها قبل و بعد از آزمایش فشار..... ۶۸
- شکل (۴-۴۰) - المان های مورد استفاده برای آنالیز باریک شدگی موضعی..... ۶۹
- شکل (۴-۴۱) - تغییرات f در برابر مدل R و مدل Z ۶۹
- شکل (۴-۴۲) - مکان هندسی حدود کرنش برای مدل R و مدل Z ۷۲
- شکل (۴-۴۳) - نمودار FLD مربوط به آزمایش فشار ۷۲
- شکل (۴-۴۴) - مقایسه نمودارهای FLD برای آزمایشهای فشار و اریکسون..... ۷۳
- شکل (۴-۴۵) - نمودار FLD بدست آمده طبق روش کان و سوئیفت..... ۷۵
- شکل (۴-۴۶) - مقایسه روشهای ارائه شده جهت بدست آوردن نمودار FLD..... ۷۵
- شکل (۴-۴۷) - قطعه تانتالومی مورد نظر جهت ساخت..... ۷۶
- شکل (۴-۴۸) - مراحل واسطه کشش قطعه مورد نظر ساخت..... ۷۸

چکیده

تان탈وم با دمای ذوب 2996°C یکی از فلزات دیرگداز بوده که در صنعت کمتر به صورت خالص مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما هر گاه دماهای بالا مورد نیاز باشد این فلز اهمیت خاصی دارد. در این تحقیق خواص شکل پذیری فلز تانتالوم مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور آزمایشهای کشش و اریکسون بر روی ورق تانتالوم با ضخامت های $0/1$ ، $0/2$ و $0/3$ میلیمتر انجام شده‌اند. همچنین استوانه‌های تانتالومی به قطر 6 میلیمتر و ارتفاع 9 میلیمتر برای انجام آزمایش فشار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کلیه مواد اولیه قبل از انجام آزمایش آنیل کاری شده، و به منظور مشاهده نتایج و تاثیر آنیل کاری آزمون سختی سنجی ویکرز و فرآیند متالوگرافی قبل و بعد از آنیل کاری انجام گرفته است. در آزمایشهای کشش و اریکسون قبل از انجام آزمایش سطح ورق را با دایره‌هایی به قطر 3 میلیمتر مدرج کرده، پس از انجام آزمایش و تغییر شکل دایره‌ها به بیضی، با استفاده از یک میکروسکوپ دیجیتالی ابعاد بیضی‌های بوجود آمده در نزدیکی محل پاره شدن ورق اندازه‌گیری و کرنش محاسبه شده است. ثابت کرنش سختی و ضریب استحکام برای فلز تانتالوم تعیین شده‌اند. نهایتاً نمودارهای حد شکل دهی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای فلز تانتالوم ترسیم شده‌اند. سپس نمودارهای حد شکل دهی حاصل از نتایج آزمایشگاهی با نمودارهای حاصل از تئوریهای کان و سویفت مقایسه شده‌اند.

کلمات کلیدی: تانتالوم، نمودار حد شکل دهی، آزمایش کشش، آزمایش اریکسون، آزمایش فشار

۱ کلیات

۱-۱ مقدمه

شکل دهی فلزات از سالها قبل بعنوان کارآمدترین روش برای ساخت قطعات فلزی مورد استفاده قرار میگیرد. در بین روشهای تولید، فرآیندهای شکل دهی فلزات از جایگاه ویژه ای برخوردار می باشد که در سالهای اخیر پیشرفت های قابل ملاحظه ای در همه زمینه های آن حاصل شده است، و این فرایندها به عنوان یک روش کارآمد برای ساخت محصولات با اشکال پیچیده و خواص ویژه شناخته شده اند. این روش نقش بسیار حیاتی در تولید قطعات در حیطه های گوناگون و متنوعی چون صنایع هوایی، نظامی، خودرو و پزشکی و... بازی می کند. در واقع تعداد بسیار کمی از محصولات را می توان نام برد که از آهنگری، نورد، کشش و یا شکل دهی ورق در فرایند تولید آن استفاده نشده باشد. انواع گوناگون فرآیندهای شکل دهی ورق های فلزی در صنایع نوین پرسکاری مورد استفاده قرار می گیرند. دستگاههای نوین نورد پیوسته حجم بالایی از ورق های فلزی نازک را با هزینه کم تولید می کند. بخش زیادی از تمام فلزات به صورت ورق نورد داغ یا سرد تولید می شوند، این ورق ها سپس در فرآیندهای ثانویه به قطعات اتومبیل، لوازم خانگی و بسیاری دیگر از محصولات تبدیل می شوند. در شکل دهی فلز، یک قطعه به صورت پلاستیک بین قالب ها تغییر شکل پیدا می کند تا به محصول نهایی تبدیل شود. یک کلاس خاص از شکل دهی فلز مربوط است به حالتی که در آن ضخامت قطعه فلزی در برابر دیگر ابعاد آن کوچک میباشد، این حالت را شکل دهی ورق نامیده و در این حالت عموماً مولفه تنش در جهت ضخامت ورق

صفر در نظر گرفته می شود. ورق های فلزی دارای مدول کشسانی بالا و استحکام تسلیم زیادی هستند، به گونه ای که قطعات تولید شده از این ورق ها سخت بوده و دارای نسبت استحکام به وزن خوبی می باشند.

با توجه به دانش و تجربه موجود در صنایع شکل دهی ورق های فلزی، بی تردید داشتن دانش عمیق تر از این فرایندها در دستیابی به بهره وری بیشتر، هزینه کمتر و دقت بالاتر موثر خواهد بود. از آنجاییکه آزمایش، عیب یابی و بهینه سازی این گونه فرایندها در تولید بسیار با اهمیت و لیکن پر هزینه و زمان گیر است از این رو پیش بینی نتیجه عملیات، قبل از ساخت قالب ها، کاهش هزینه ها و چرخه تولید را به دنبال خواهد داشت. به همین جهت استفاده از روش های پیش بینی فرایندهای شکل دهی سرعت رو به رشدی پیدا کرده و یکی از فرایندهایی که به آن توجه فراوان شده، فرایند شکل دهی ورق می باشد.

برای شکل دادن یک ورق باید قابلیت شکل دهی ورق در یک فرآیند معین که اغلب قابلیت شکل پذیری نامیده می شود مد نظر قرار گیرد. برای ارزیابی قابلیت شکل پذیری باید بتوان رفتار ورق را با یک روش دقیق تعریف نموده و خواص آن را در قالب ریاضی بیان کرد. همچنین لازم است چگونگی استفاده از آزمایشهای مکانیکی جهت بررسی خواص ورق را استخراج کرد.

در طی فرآیند شکل دهی یک ورق فلزی دو نوع تغییر شکل قابل مشاهده است که عبارتند از تغییر شکل کشسان و مومسان. شکل دهی ورق به یک شکل معین شامل جریان مومسان دائمی بوده و کرنشهای ایجاد شده در ورق ممکن است کاملاً بزرگ باشد. هنگامی که تنش در یک ورق وجود دارد قطعاً کرنش کشسانی هم وجود خواهد داشت که این کرنش نوعاً کوچک بوده و معمولاً کمتر از $0/001$ می باشد که در اغلب موارد از آن صرف نظر می شود. با توجه به کرنشهای (مومسان) ایجاد شده در ورق طی فرآیندی مشخص و طبق آزمایشهای خاص می توان نمودارهای حد شکل دهی¹ (FLD) را بدست آورده و با بررسی آن قابلیت شکل پذیری ورق را پیش بینی کرد. از میان ورق های فلزی معمولاً ورق های فلزات دیر گداز کمتر شناخته شده اند چرا که نسبت به فلزاتی مانند فولاد و آلومینیم کاربرد کمتری در صنعت دارند و اکثراً به صورت آلیاژ با دیگر مواد و به مقدار کم در آنها مورد استفاده دارند، از اینرو اطلاعات کمی در مورد خواص این فلزات و از جمله در مورد خاصیت شکل پذیری آنان موجود می باشد.

¹ Forming Limit Diagrams

اما گاه در صنعت مواردی پیش می آید که دماهای بسیار زیاد و منابع حرارتی بالا نیاز می باشد، در اینگونه موارد فلزات به کار رفته در نزدیکی این منابع حرارتی باید قابلیت تحمل این دماها را داشته، در نتیجه استفاده از فلزات دیر گداز به صورت خالص ضروری می باشد. از طرف دیگر فلزات دیر گداز به صورت خالص، فلزات گرانبهایی بوده و دارای قیمت بسیار بالا میباشد و در فرآیند های تولید آنها باید دقت نمود که مقدار دور ریز مواد به حداقل رسیده، و میزان خراب شدن قطعات تولیدی به پایین ترین حد برسد. بدین منظور نیاز است که رفتار فلز طی فرآیند، قابل پیش بینی باشد تا بتوان بهترین فرآیند را برای تولید قطعه مورد نظر در نظر گرفت و با توجه به آن فرآیند، قالب ها، ماشین آلات و . . . را به صورت بهینه طراحی، تولید و انتخاب نمود.

۲-۱ هدف از انجام تحقیق

با توجه به موارد ذکر شده، در این تحقیق سعی بر آن شده است تا خاصیت شکل پذیری ورق فلز تانتالوم به عنوان یک فلز دیر گداز مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به انجام آزمایشهای مختلف بر روی آن بتوان نمودارهای حد شکل دهی (FLD) را از آن استخراج نمود، و راه را برای شناخت هر چه بهتر خواص این فلز و قابلیت شکل پذیری آن هموار نمود. لذا با استفاده از آزمایشهای کشش و اریکسون بر روی ورق تانتالوم در ضخامت های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ میلیمتر و همچنین انجام آزمایش فشار بر روی استوانه هایی از جنس تانتالوم به قطر ۶ میلیمتر و ارتفاع ۹ میلیمتر، نمودارهای حد شکل دهی برای تانتالوم بدست آمد.

۲ مروری بر تحقیقات انجام شده

۱-۲ فلزات دیرگداز

کلمه دیرگداز در علوم مربوط به متالورژی به مفهوم مقاوم در برابر حرارت می‌باشد. لذا دمای ذوب بالا اولین شرط لازم برای یک فلز دیرگداز می‌باشد. از اینرو دمای ذوب، شاخصی برای جداسازی فلزات دیرگداز از دیگر فلزات می‌باشد و فلزاتی که دمای ذوب بالاتر از این دما دارند به عنوان فلزات دیرگداز شناخته می‌شوند. اما این دما کاملاً قراردادی می‌باشد و در منابع مختلف دماهای 1539°C (دمای ذوب آهن)، 1650°C ، 1850°C و 2000°C گزارش شده که با این وجود عموماً دمای 2000°C مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این شرط تنها ۱۰ فلز وجود دارد که دمای ذوب بالای 2000°C دارد [۱]. این فلزات در جدول ۱-۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۱-۲ فلزات با دمای ذوب بیشتر از 2000°C [۱]

فلز	دمای ذوب ($^{\circ}\text{C}$)	فلز	دمای ذوب ($^{\circ}\text{C}$)
تکنتیوم (Tc)	۲۲۰۰	مولیبدنیم (Mo)	۲۶۲۳
هافنیوم (Hf)	۲۲۲۷	اسمیوم (Os)	۲۷۰۰
رادنیوم (Ru)	۲۳۱۰	تانالتوم (Ta)	۲۹۹۶
آیریدیوم (Ir)	۲۴۴۷	رنیوم (Re)	۳۱۸۰
نیوبیوم (Nb)	۲۴۶۸	تنگستن (W)	۳۴۱۰

با این وجود اکثر فلزاتی که در جدول ۱-۲ فهرست شده‌اند را نمی‌توان از دیدگاه تجاری به عنوان یک فلز دیرگداز محسوب کرد. در دسترس نبودن و کمیاب بودن تکنیوم و هافنیوم اجازه استفاده از آنها را به عنوان فلزات دیرگداز نمی‌دهد. بعلاوه رادنیوم، آیریدیوم، اسمیوم و رنیوم بسیار گران‌قیمت بوده و جزء فلزات دیرگداز قرار نمی‌گیرند. بنابراین ۴ فلز باقیمانده به نامهای نیوبیوم، مولیبدنیم، تانتالوم و تنگستن خانواده فلزات دیرگداز را تشکیل می‌دهند. اتفاقاً همه چهار فلز دیرگداز دارای ساختار کریستالی مکعبی مرکزپر BCC بوده و یک دمای انتقالی از حالت شکننده به چکش خوار (شکل پذیر) از خود نشان می‌دهند. اما از آنجاییکه دمای انتقال نیوبیوم و تانتالوم پایین‌تر از دمای اتاق است این فلزات خاصیت چکش خواری و شکل‌پذیری بهتری در مقایسه با تنگستن و مولیبدنیم از خود نشان می‌دهند. تنگستن و مولیبدنیم آنیل شده دمای انتقال بالاتر از دمای اتاق دارند. در دمای اتاق تنگستن شکننده‌تر از مولیبدنیم می‌باشد [۱].

فلزات دیرگداز در صنایع روشنایی، ابزارها، تجهیزات هسته‌ای و به عنوان کاتالیزور کاربرد داشته و به دلیل خواص شیمیایی و الکتریکی آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دلیل دمای ذوب بالای آنها محصولات فلزات دیرگداز به روش ریخته‌گری قابل تولید نیستند. یکی از فرآیندهای مورد استفاده متالوژی پودر می‌باشد. در این روش پودر فلز خالص تحت فشار زیاد به هم فشرده می‌شود و سپس از طریق حرارت دهی گرم شده و بدین ترتیب شکل می‌گیرد. به علاوه روشی که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد روش کار سرد با مراحل آنیل کاری میانی می‌باشد. فلزات دیرگداز می‌توانند در انواع سیم، شمش، میله، ورق و فویل تولید شود.

تنگستن در سال ۱۷۸۱ توسط شیمیدان سوئدی کارل ویلهلم شیل^۱ کشف شد. تنگستن یکی از وافرترین فلزات دیرگداز بوده که بالاترین دماهای ذوب را با 3410°C (6170°F) در میان فلزات دارا می‌باشد [۲]. سیم فیلمان‌های تنگستنی در چراغ‌های روشنایی خانگی بیشترین کاربرد تنگستن می‌باشد و همچنین به عنوان الکترود در لامپهای قوی در صنایع روشنایی بکار می‌رود. در تجهیزات جوشکاری TIG^2 نیز از یک الکترود دائمی غیر ذوبی از جنس تنگستن استفاده می‌شود. اما معمولی‌ترین استفاده تنگستن بصورت ترکیب، کاربرد تنگستن در مته‌ها و ابزارهای تراشکاری و برشکاری می‌باشد. تنگستن می‌تواند در ابزارها نقش روان‌ساز و آنتی اکسیدان را ایفا کرده و در نازل‌ها و پوش‌ها بصورت یک پوشش محافظ عمل می‌کند.

^۱ Karl Wilhelm Scheel

^۲ Tungsten Inert Gas

مولیدنیم بیشترین کاربرد را در بین فلزات دیرگداز دارا بوده که مهمترین کاربرد آن بعنوان مقاوم کننده آلیاژهای فولاد می‌باشد و لوله‌ها و تیوب‌های ساختمانی اغلب تحت عنوان فولادهای زنگ نزن شامل مولیدن می‌گردند. استحکام در دماهای بالا، مقاومت در برابر سایش و ضریب اصطکاک پایین از خواصی هستند که این ماده را به عنوان یک ترکیب آلیاژی مناسب گردانیده است. خواص فوق‌العاده ضد اصطکاک مولیدن منجر به ترکیب این ماده در روغن‌ها و گریس‌هایی شده که در جاهای حساس و بحرانی و با ضریب اطمینان بالا بکار می‌روند. مولیدنیم به آسانی با فلزات ترکیب شده و تشکیل یک پوشش بسیار سخت و مقاوم در برابر اصطکاک را می‌دهد [۳].

تانالوم مقاومت به خوردگی بسیار بالایی در محیط‌های اسیدی و شیمیایی دارد که بسیاری از کاربردهای آن در صنایع شیمیایی، نظامی و هوافضا بر اساس این خاصیت می‌باشد. همچنین با توجه به همین خاصیت، تانالوم کاربرد وسیعی در پزشکی و ساخت ابزارآلات جراحی پیدا کرده است. از طرف دیگر دمای ذوب بالای این فلز، آن را جهت استفاده در محیط‌هایی که نیاز به دمای بالا باشد مناسب گردانیده است. تانالوم همچنین در خازن‌های الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. فیلم‌های تانالوم بیشترین ظرفیت به حجم را دارا بوده که در تولید تجهیزات و مدارات الکترونیکی مینیاتوری مناسب می‌باشد [۴].

نیوبیوم (کلمبیوم) تقریباً همیشه همراه با تانالوم یافت شده و استفاده‌های فراوانی دارد، از جمله آنکه نیوبیوم را در زمره فلزات دیرگداز قرار داده این است که می‌توان عملیات حرارتی مختلفی روی آن انجام داد، تا به محدوده وسیعی از استحکام دست یافت. نیوبیوم کمترین چگالی را در میان فلزات دیرگداز دارا می‌باشد. نیوبیوم در خازن‌های الکتریکی و در آلیاژهای سوپر هادی کاربرد داشته و می‌تواند در توربین‌های گازی، لامپهای خلاء و رآکتورهای هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرد [۵].

رنیوم نیز در بسیاری از جاها به عنوان فلز دیرگداز شناخته شده و جدیدترین فلز دیرگداز کشف شده می‌باشد. این ماده با غلظت بسیار کمی همراه با دیگر فلزات در معادن فلزات دیرگداز، پلاتینیوم و یا معادن مس یافت می‌شود. این فلز بصورت آلیاژ با دیگر فلزات دیرگداز بکار رفته و به آنها خاصیت شکل‌پذیری و مقاومت کششی بالا

می‌بخشد. آلیاژهای رنیوم در تجهیزات الکترونیک، ژيروسکوپ و راکتورهای هسته‌ای کاربرد دارد. بهترین استفاده رنیوم بعنوان کاتالیست بوده و کمیابی آن باعث شده که گران‌ترین ماده در میان فلزات دیرگداز باشد [۶].

فلزات دیرگداز و آلیاژهای آنان به دلیل خواص قابل توجه و دورنمای کاربردی آنان توجه محققان را به خود جذب کرده‌اند. خواص فیزیکی فلزات دیرگدازی مانند تانتالوم، مولیبدنیم و تنگستن از قبیل استحکام و پایداری در دمای بالا آنان را برای کاربردهای فلز کاری گرم و تکنولوژی کوره و محیط‌های خلاء مناسب گردانیده است. بسیاری از کاربردهای این فلزات از این خواص بهره می‌گیرند بعنوان مثال فیلمان‌های تنگستنی لامپها در دمای بالاتر از 2800°C کار می‌کنند و سیم‌پیچ‌های کوره‌ها از جنس مولیبدن دمای تا 2000°C را تحمل می‌کنند و تانتالوم در محیط‌های با خلاء 10^{-9} bar و دمای بالاتر از 2000°C کاربرد دارد. قابلیت ساخت ضعیف در دمای پایین و اکسید شدن بیش از حد در دماهای بالا از محدودیت‌های اکثر فلزات دیرگداز می‌باشد. واکنش با اتمسفر محیط بطور قابل توجهی بر استحکام اکثر این فلزات در دمای بالا اثر می‌گذارد. لذا کاربرد این مواد نیاز به یک پوشش و یا اتمسفر محافظ دارد.

آلیاژهای فلزات دیرگداز مولیبدنیم، نیوبیوم، تانتالوم و تنگستن برای سیستم‌های قدرت تجهیزات هسته‌ای و فضایی به کار می‌روند. این سیستم‌ها برای کار در دماهای 1100°C تا 1650°C طراحی شده‌اند و محیط نباید با مواد واکنش دهد.

۲-۲ تانتالوم

تانتالوم فلزی با عدد اتمی ۷۳ از عناصر واسطه با ساختار کریستالی مکعبی مرکز پر B.C.C با علامت اختصاری Ta می‌باشد [۷]. تانتالوم فلزی کمیاب، تیره، چگال، چکش خوار، بسیار سخت و با رسانایی بسیار بالای گرما و الکتریسیته می‌باشد. مقاومت به خوردگی این فلز در محیط‌های اسیدی مشهور می‌باشد. این فلز در محیط اسیدفلوریک و یا محلول اسیدی شامل یون فلورید و تری‌اکسیدسولفور و یا محلول هیدروکسید پتاسیم قابل حل می‌باشد. دمای ذوب تانتالوم 2996°C (دمای جوش آن 5458°C) بوده که تنها کمتر از تنگستن و رنیوم می‌باشد [۸].

مهمترین کاربرد تانتالوم بصورت متالوژی پودر در ساخت اجزاء الکترونیکی بخصوص خازن‌ها و مقاومت‌های درجه بالا می‌باشد. یکی از خواص تانتالوم تمایل این ماده به ایجاد یک لایه اکسید بر روی سطح خود می‌باشد که در خازن‌های الکترولیتی تانتالوم از این خاصیت استفاده می‌شود، به گونه‌ای که یک صفحه نازک تانتالوم به عنوان یک صفحه خازن استفاده شده و لایه اکسید بعنوان دی‌الکتریک عمل کرده و یک محلول الکترولیتی بعنوان صفحه دیگر خازن بکار می‌رود. از آنجاییکه لایه دی‌الکتریک می‌تواند بسیار نازک باشد (بسیار نازک‌تر از لایه‌های مشابه در خازن‌های الکترولیتی آلومینیوم) در نتیجه در یک حجم کوچک خازن ظرفیت بالایی قابل دسترسی است. بواسطه این مزیت وزن و حجم کم، خازن‌های تانتالوم بسیار مناسب استفاده در تلفن‌های همراه، پیچرها، کامپیوترهای شخصی و قطعات الکترونیک اتومبیل می‌باشد [۹].

تانتالوم همچنین برای تولید آلیاژهایی با دمای ذوب بالا و با استحکام و خاصیت چکش خواری خوب بکار می‌رود. ترکیب آلیاژی تانتالوم با دیگر فلزات همچنین برای استفاده در ساخت ابزارهای کارباید، تولید سوپر آلیاژها برای اجزاء موتور جت، تجهیزات فرآیندهای شیمیایی، راکتورهای هسته‌ای و قطعات موشک استفاده می‌شود. از آنجایی که تانتالوم در برابر مایعات بدن مقاوم بوده و خورده نمی‌شود موارد استفاده وسیعی در ابزار و وسایل جراحی و ایمپلانت‌ها دارد و از اکسید آن بنا بر دلایل خاصیت شکست نور در تولید لنز دوربین‌های عکاسی استفاده می‌شود. همچنین یکی از کاربردهای اصلی این فلز استفاده در تجهیزات سیستم‌های خلاء بالا در دماهای زیاد می‌باشد [۸].

۲-۲-۲ تاریخچه

تانتالوم در سال ۱۸۰۲ توسط آندروس کبرگ^۱ در سوئد کشف شد و در سال ۱۸۲۰ توسط جان برزیلیوس^۲ تجزیه شد. بسیاری از شیمیدان‌های آن دوران معتقد بودند که تانتالوم و نیوبیوم عناصر واحدی هستند تا اینکه در سال ۱۸۴۴ و سپس در ۱۸۶۶ دانشمندان مشخص کردند که اسیدهای تانتالیک و نیوبیک ترکیبات مختلفی هستند. اوائل

^۱ Andres Ekeberg

^۲ John Berzelius