

صلى الله عليه وسلم



دانشگاه سندھ

دانشکده مهندسی مکانیک

اثر مقدار مس بر رفتار خزش فرورونده آلیاژ

Al-17%Si-0.5%Mg

نگارش

محمد رضا محمدی بقا

استاد راهنما: دکتر سید مهدی میر اسماعیلی

استاد مشاور: مهندس ابراهیم محمدی مزرعه شاهی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته شناسایی و انتخاب مواد مهندسی

اسفند ۱۳۹۲

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب محمد رضا محمدی بقا متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی می‌باشد

محمد رضا محمدی بقا

امضاء

چکیده

در این تحقیق، اثر مس افزودنی، بر ریزساختار و خواص خزشی آلیاژ ریختگی Al-17Si-0.5Mg که در ساخت قطعات ریختگی فضاپیما و خودرو استفاده می‌شود و در دمای بالا کاربرد دارد، مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی اثر مس در تغییرات خواص خزشی آلیاژ با افزودن مقادیر مختلف مس از روش خزش فروروندگی با فرورونده استوانه‌ای شکل استفاده شد. دماهای آزمون خزش آلیاژ مورد پژوهش، به ترتیب ۵۳۳، ۵۴۸ و ۵۵۸ کلوین انتخاب شده و سطوح تنش در محدوده ۳۲۵-۳۷۵ MPa اعمال گردید. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که در اثر افزودن مس به آلیاژ Al-17Si-0.5Mg، نرخ خزش حالت پایدار کاهش یافته و مقاومت به خزش، بدلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی Al_2Cu بهبود می‌یابد. بر اساس رابطه خزش توانی حالت پایدار، توان تنش (n) در محدوده ۷-۴ و انرژی اکتیواسیون خزش (Q) در محدوده $۸۴ \frac{kJ}{mol}$ تا $۱۳۸ \frac{kJ}{mol}$ بدست آمد. مقادیر انرژی اکتیواسیون بدست آمده، در تمام سطوح تنش، مابین انرژی اکتیواسیون نفوذ در خود آلومینیم در شبکه ($۱۴۲ \frac{kJ}{mol}$) و در کانال نابجایی‌ها ($۸۲ \frac{kJ}{mol}$) است. بنابراین در تمام سطوح تنش ذکر شده، مکانیزم خزش غالب، خزش نابجایی کنترل شونده بوسیله صعود می‌باشد.

واژگان کلیدی

آلیاژ Al-17Si-0.5Mg - خزش فروروندگی - مکانیزم خزش - مس - ریزساختار

فهرست مطالب

مقدمه..... ۲

فصل دوم: مروری بر منابع

۱-۲- نگاه کلی به خزش فلزات و آلیاژها ۴

۲-۲- فرآیندهای تغییر شکل در خزش ۵

۱-۲-۲- خزش نفوذی ۵

۲-۲-۲- لغزش مرز دانه ۶

۳-۲-۲- خزش نابجایی ۷

۱-۳-۲-۲- لغزش ویسکوز نابجایی ۷

۲-۳-۲-۲- صعود نابجایی ۸

۳-۳-۲-۲- لغزش متقاطع فعال شده با گرما ۸

۴-۳-۲-۲- خزش هارپر-درن ۸

۳-۲- انتقال در مکانیزم های خزشی ۸

۴-۲- خزش فروروندگی ۱۰

۱-۴-۲- آزمایش خزش فروروندگی با استفاده از فرورونده استوانه‌ای ۱۰

۲-۴-۲- مزایای روش خزش فروروندگی ۱۱

۵-۲- آلومینیم و آلیاژهای Al-Si ۱۲

۱-۵-۲- ویژگیهای کلی آلیاژهای Al-Si ۱۲

۲-۵-۲- روش های بهبود خواص مکانیکی آلیاژهای Al-Si ۱۵

۱-۲-۵-۲- عملیات آلیاژسازی ۱۵

۲-۲-۵-۲- تولید کامپوزیت‌های Al-Si ۱۶

۶-۲- رفتار خزشی آلومینیم و آلیاژهای آن ۱۶

فصل سوم: روش تحقیق

۱-۳- ترکیب شیمیایی مواد اولیه ۲۶

۲-۳- ذوب و آلیاژسازی ۲۶

۲۶	..... ریخته‌گری ۳-۳
۲۷	..... آماده‌سازی نمونه‌ها ۴-۳
۲۸	..... متالوگرافی کیفی و کمی ۵-۳
۲۹	..... آزمون خزش ۶-۳

فصل چهارم: نتایج و بحث

۳۳	..... ترکیب شیمیایی آلیاژها ۱-۴
۳۳	..... نتایج مربوط به آلیاژ Al-17Si-0.5Mg ۲-۴
۳۳	..... ریزساختار قبل از خزش ۱-۲-۴
۳۶	..... نتایج آزمایش خزش آلیاژ Al-17Si-0.5Mg ۲-۲-۴
۳۸	..... ریزساختار پس از خزش ۳-۲-۴
۳۹	..... نتایج مربوط به آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-3Cu ۳-۴
۳۹	..... ریزساختار قبل از خزش ۱-۳-۴
۴۲	..... نتایج آزمایش خزش آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-3Cu ۲-۳-۴
۴۴	..... نتایج مربوط به آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-5Cu ۴-۴
۴۴	..... ریزساختار قبل از خزش ۱-۴-۴
۴۷	..... نتایج آزمایش خزش آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-5Cu ۲-۴-۴
۴۹	..... ریزساختار پس از خزش ۳-۴-۴
۵۰	..... آنالیز فاز زمینه سه آلیاژ ۵-۴
۵۱	..... مقایسه نهایی رفتار خزشی آلیاژها ۶-۴
۵۲	..... تعیین مکانیزم خزش برای آلیاژها ۷-۴

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

۵۵	..... نتیجه‌گیری ۱-۵
۵۶	..... پیشنهادات ۲-۵
۵۷	..... فهرست منابع

فهرست جداول

۹	.....	جدول (۱-۲) مکانیزم‌های خزشی مختلف با توجه به مقادیر n , p و Q
۲۶	.....	جدول (۱-۳) ترکیب آلیاژ
۳۳	.....	جدول (۱-۴) آنالیز شیمیایی آلیاژها (درصد وزنی) در تحقیق حاضر
۵۱	.....	جدول (۲-۴) حلالیت عناصر آلیاژی در زمینه سه آلیاژ

فهرست تصاویر

۴	نمونه‌ای از یک منحنی خزش	شکل (۱-۲)
۵	طرح شماتیک از خزش ناشی از نفوذ که سبب کشیده شدن دانه در جهت تنش اعمالی می‌گردد	شکل (۲-۲)
۷	تغییر شکل دانه‌ها در اثر نفوذ در دانه و مرز دانه	شکل (۳-۲)
۹	انتقال مکانیزم‌های خزشی در (a) نزدیک به دمای ذوب، (b) نزدیک به $0.5T_m$	شکل (۴-۲)
۱۰	طرح شماتیک از تأثیر یک فرورونده استوانه‌ای	شکل (۵-۲)
۱۱	طرح شماتیک از تجهیزات آزمایش خزش فروروندگی با فرورونده استوانه‌ای	شکل (۶-۲)
۱۳	ریزساختار یک آلیاژ هیپریوتکتیک حاوی ذرات گوشه دار Si اولیه	شکل (۷-۲)
۱۴	بعضی رسوبات بین فلزی در ریزساختار یک آلیاژ Al-Si	شکل (۸-۲)
۱۸	نرخ کرنش پایدار به عنوان تابعی از تنش اعمالی برای آلیاژ هیپریوتکتیک و کامپوزیت زمینه ۶۰۶۱ در دماهای مختلف	شکل (۹-۲)
۱۹	محاسبه تنش آستانه‌ای در دمای مختلف برای دو ماده	شکل (۱۰-۲)
۲۰	نمودار نرمالیزه شده که مقدار تعدیل شده n را تأیید می‌کند	شکل (۱۱-۲)
۲۱	ریزساختار نمونه آلیاژ Al-17Si پس از شکست در اثر خزش. ترک در ذرات سیلیسیم به روشنی دیده می‌شود	شکل (۱۲-۲)
۲۲	نمودار تابعیت نرخ کرنش حداقل از تنش اعمالی برای آلیاژ هیپریوتکتیک که دو نوع رفتار مختلف را نشان می‌دهد	شکل (۱۳-۲)
۲۲	تصاویر ریزساختاری تهیه شده توسط TEM. شبکه نابجائیه‌ها در شکل سمت چپ و تشکیل زیردانه‌ها در شکل سمت راست قابل ملاحظه می‌باشند	شکل (۱۴-۲)
۲۵	نمودار کلی فرآیندهای انجام شده در این پروژه	شکل (۱-۳)
۲۷	دستگاه Tilt Casting مورد استفاده در این پروژه	شکل (۲-۳)
۲۷	شماتیک نمونه‌های آماده شده برای انجام تست خزش	شکل (۳-۳)
۲۸	شماتیک شمش‌های نهایی تولید شده برای انجام آزمایشات	شکل (۴-۳)
۳۰	(الف) کامپیوتر همراه با نرم افزار خزش، (ب) دستگاه خزش، (ج) LVDT اندازه‌گیری جابجایی خطی، (د) نمایشگر LVDT و (ه) نمایشگر دمای کوره	شکل (۵-۳)
۳۳	تصویر میکروسکوپ نوری آلیاژ Al-17Si-0.5Mg در دو بزرگنمایی مختلف	شکل (۱-۴)

شکل (۲-۴)	تصویر میکروسکوپ الکترونی آلیاژ Al-17Si-0.5Mg به همراه آنالیز نقطه‌ای از چهار ناحیه	۳۴
شکل (۳-۴)	آنالیز چهار ناحیه مشخص شده در تصویر میکروسکوپی شکل (۲-۴)	۳۵
شکل (۴-۴)	نقشه توزیع عناصر آلیاژی آلیاژ Al-17Si-0.5Mg	۳۶
شکل (۵-۴)	نمودار منحنی‌های تابعیت عمق فروروندگی بر حسب زمان در آلیاژ Al-17Si-0.5Mg	۳۷
شکل (۶-۴)	نمودار لگاریتمی نرخ فروروندگی به صورت تابعی از تنش اعمال شده برای آلیاژ Al-17Si-0.5Mg	۳۸
شکل (۷-۴)	نمودار نیمه لگاریتمی نرخ فروروندگی به صورت تابعی از دما برای آلیاژ Al-17Si-0.5Mg	۳۸
شکل (۸-۴)	تصویر میکروسکوپ الکترونی ریزساختار آلیاژ Al-17Si-0.5Mg در زیر فرورونده پس از خزش در دمای ۵۵۸ کلوین تحت تنش ۳۷۵ مگاپاسکال	۳۹
شکل (۹-۴)	تصویر میکروسکوپ نوری آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-3Cu در دو بزرگنمایی مختلف	۳۹
شکل (۱۰-۴)	تصویر میکروسکوپ الکترونی آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-3Cu به همراه آنالیز نقطه‌ای از چهار ناحیه مجزا	۴۰
شکل (۱۱-۴)	آنالیز چهار ناحیه مشخص شده در تصویر میکروسکوپی شکل (۱۰-۴)	۴۱
شکل (۱۲-۴)	نقشه توزیع عناصر آلیاژی آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-3Cu	۴۲
شکل (۱۳-۴)	نمودار منحنی‌های تابعیت عمق فروروندگی بر حسب زمان در آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-3Cu	۴۳
شکل (۱۴-۴)	نمودار لگاریتمی نرخ فروروندگی به صورت تابعی از تنش اعمال شده برای آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-3Cu	۴۴
شکل (۱۵-۴)	نمودار نیمه لگاریتمی نرخ فروروندگی به صورت تابعی از دما برای آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-3Cu	۴۴
شکل (۱۶-۴)	تصویر میکروسکوپ نوری آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-5Cu در دو بزرگنمایی مختلف	۴۵
شکل (۱۷-۴)	تصویر میکروسکوپ الکترونی آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-5Cu به همراه آنالیز نقطه‌ای از دو ناحیه مجزا	۴۶
شکل (۱۸-۴)	آنالیز چهار ناحیه مشخص شده در تصویر میکروسکوپی شکل (۱۷-۴)	۴۶
شکل (۱۹-۴)	نقشه توزیع عناصر آلیاژی آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-5Cu	۴۷
شکل (۲۰-۴)	نمودار منحنی‌های تابعیت عمق فروروندگی بر حسب زمان در آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-5Cu	۴۸
شکل (۲۱-۴)	نمودار لگاریتمی نرخ فروروندگی به صورت تابعی از تنش اعمال شده برای آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-5Cu	۴۹

شکل (۴-۲۲)	نمودار نیمه لگاریتمی نرخ فروروندگی به صورت تابعی از دما برای آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-5Cu	۴۹
شکل (۴-۲۳)	تصویر میکروسکوپ الکترونی ریزساختار آلیاژ Al-17Si-0.5Mg-5Cu در زیر فرورونده پس از خزش در دمای ۵۵۸ کلوین تحت تنش ۳۷۵ مگاپاسکال	۵۰
شکل (۴-۲۴)	آنالیز فازهای زمینه سه آلیاژ	۵۱
شکل (۴-۲۵)	نمودار منحنی‌های تابعیت عمق فروروندگی بر حسب زمان در درصدهای مختلف مس در تنش و دمای ثابت	۵۲

فصل اول

مقدمه

مقدمه

آلیاژهای پایه آلومینیم به واسطه خواص منحصر به فردی که دارند از پر کاربردترین آلیاژهای صنعتی در جهان محسوب می‌شوند که از جمله این خواص می‌توان به چگالی پایین، قدرت هدایت حرارتی و مقاومت به خوردگی بالا اشاره کرد. نقطه ضعف اصلی برخی آلیاژهای آلومینیم مقاومت خزشی کم و یا استحکام کم در دماهای بالای کاری است که با توجه به کاربرد آلیاژهای جدید که کار در دماهای بالاتر را ضروری کرده است، تلاش بسیار زیادی طی سال‌های اخیر در رفع این نقیصه صورت پذیرفته است. خزش در دمای بالا می‌تواند موجب تخریب یا حتی شکست قطعه گردد. به طور کلی به تغییر شکل تدریجی ماده در شرایط دمایی و تنش ثابت خزش گفته می‌شود و چون این فرآیند تابعیت شدید از دما دارد، هرچه دمای کاری بالاتر رود اهمیت پدیده خزش نیز بیشتر خواهد شد. بنابراین از ملزومات قطعی برای کاربرد مناسب یک قطعه در دمای بالا برخورداری از رفتار خزشی مناسب می‌باشد. استفاده از آلیاژهای آلومینیم در صنایع هوافضا و حتی در تولید ظروف آشپزخانه که بایستی محصولات در دمای بالا نسبت به کاهش خواص مکانیکی، مقاومت نشان دهند نیاز به تحقیقات را بیشتر نمایان می‌کند. حضور عناصری مثل منگنز و منیزیم باعث افزایش مقاومت به خوردگی آلیاژهای آلومینیم می‌شود. منیزیم با تشکیل محلول جامد، باعث افزایش استحکام و مقاومت به خزش آلومینیم می‌شود. در حضور سیلیسیم ترکیبات رسوبی و بین فلزی Mg_2Si و Al_xMn_ySi تشکیل می‌شوند.

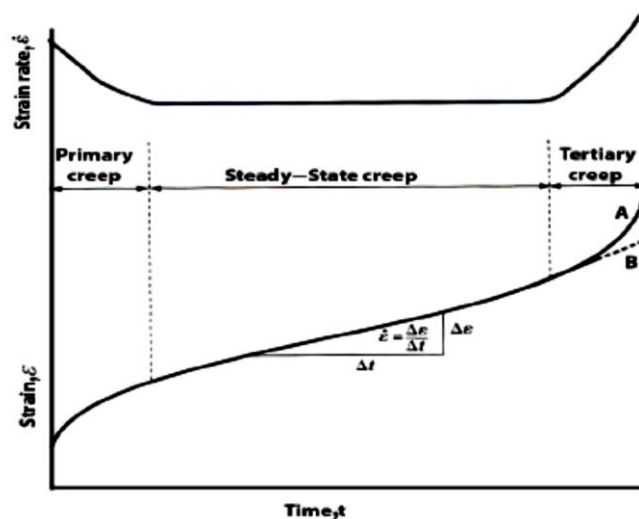
در این پروژه آلیاژ $Al-17Si-0.5Mg$ در حالت پایه که فاقد مس می‌باشد و پس از افزودن مس با روش خزش فروروندگی با فرورونده استوانه‌ای سر تخت مورد بررسی قرار داده شدند. مطالعات ریز ساختاری نمونه‌ها قبل و بعد از انجام آزمایش خزش با میکروسکوپ نوری و الکترونی انجام شد و برای بررسی فازها از EDS کمک گرفته شد. منحنی تغییرات عمق فروروندگی با زمان برای هر کدام از نمونه‌های مورد مطالعه بدست آمد. افزایش نرخ خزش در دمای ثابت با افزایش سطوح تنش اعمال شده و همچنین تابعیت نرخ خزش از دما در تنش ثابت مشهود بود. در نهایت پارامتر Q و n تعیین و مکانیزم‌های غالب پیشنهاد شده و پس از مقایسه کلی بین خواص خزشی مناسب‌ترین آلیاژ گزارش گردیده است.

فصل دوم

مروری بر منابع

۱-۲ نگاه کلی به خزش فلزات و آلیاژها

تغییر شکل فزاینده ماده تحت تنش ثابت خزش نامیده می‌شود. برای تعیین منحنی خزش مهندسی یک فلز، بار ثابتی به یک نمونه کشش در دمای ثابت وارد شده و کرنش نمونه بر حسب تابعی از زمان تعیین می‌شود. منحنی A در شکل (۱-۲) شکل آرمانی یک منحنی خزش را نشان می‌دهد. شیب این منحنی آهنگ خزش نامیده می‌شود. پس از ازدیاد طول سریع اولیه نمونه، آهنگ خزش با زمان کم می‌شود و سپس به یک حالت پایدار می‌رسد که در آن آهنگ خزش با زمان تغییر کمی می‌کند و بالاخره پس از آن تا وقوع شکست سریعاً با زمان زیاد می‌شود [۱].



شکل ۱-۲: نمونه‌ای از یک منحنی خزش [۱]

به محض شروع آزمایش، در اثر اعمال بار وارده نوعی رفتار الاستیک لحظه‌ای رخ داده و به دنبال آن مرحله خزش انتقالی (مرحله I) شروع خواهد شد. در ابتدای این مرحله نرخ کرنش بالا بوده و به تدریج از میزان آن کاسته می‌شود. تحت این شرایط، مقاومت خزشی ماده در اثر تغییر شکل، زیاد می‌شود. در مرحله دوم، نرخ خزش تقریباً ثابت است و علت آن وقوع پدیده "بازیابی" و برقراری تعادل بین دو فرآیند "کارسختی" و "بازیابی" است. به خزش مرحله دوم "خزش حالت پایدار" گفته می‌شود.

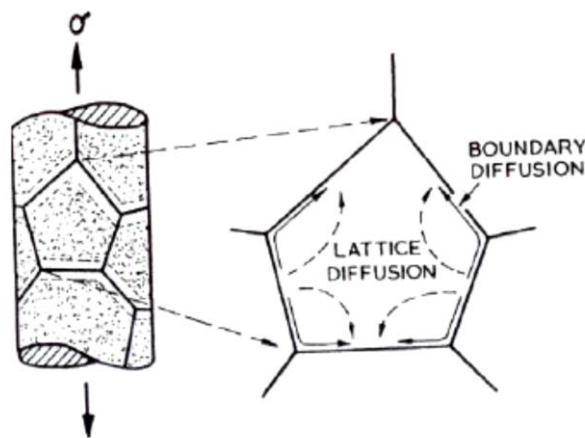
به تدریج با پیشروی فرآیند تغییر شکل خزشی، در اثر دو پدیده گردنی شدن و تجمع حفرات در این ناحیه، سطح مقطع مؤثر در تحمل بار کاهش می‌یابد و با توجه به ثابت بودن نیروی وارده می‌توان گفت با گذشت زمان، بر میزان تنش اعمالی افزوده خواهد شد. در این حالت دیگر تعادل بین دو پدیده کارسختی و بازیابی به هم خورده و به دلیل افزایش تنش، سیلان به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. این روند که مرحله سوم را در منحنی خزش تشکیل می‌دهد، شامل تغییر شکل شتابدار نمونه تا لحظه شکست خواهد بود [۴-۱].

۲-۲ فرآیندهای تغییر شکل در خزش

مقالات بسیار زیادی در مورد روش‌های تغییر شکل مواد کریستالی انتشار یافته است و بر مبنای آنها چند روش تغییر شکل وجود دارد:

۱-۲-۲ خزش نفوذی

این تغییر شکل بر مبنای نفوذ جاهای خالی در درون دانه‌های یک ماده پلی کریستال می‌باشد که توسط Nabarro و Herring ارائه شد. نظریه نابارو هرینگ این است که فرآیند خزش با نفوذ اتمی ناشی از تنش کنترل می‌شود. عقیده بر این است که این نوع خزش نفوذی شامل مهاجرت تهی‌جاها (همراه با شیب غلظتی) از مرز دانه‌های تحت تنش کششی به مرز دانه‌های تحت تنش فشاری است. شکل (۲-۲) همزمان اتمها در جهت مخالف حرکت می‌کنند که به ازدیاد طول دانه‌ها در جهت تنش کششی اعمالی منجر می‌شود. این شیب غلظتی در اثر کاهش انرژی تشکیل تهی‌جاها در مرزهای تحت تنش کششی و افزایش این انرژی در مرزهای تحت تنش فشاری به وجود می‌آید [۵].



شکل ۲-۲: طرح شماتیک از خزش ناشی از نفوذ که سبب کشیده شدن دانه در جهت تنش اعمالی می‌گردد [۶]

آقای Herring نشان داد که این نوع خزش می‌تواند در دماهای بالا و تنش‌های پایین رخ دهد و در دماهای پایین و تنش‌های بالا اثر بسیار کمی دارد.

خزش نابارو هرینگ را می‌توان با معادله زیر توصیف کرد که در آن $A = 7(b/d^2)$ و d قطر دانه می‌باشد:

$$\varepsilon_S^0 = \frac{7b^3 D_V}{kT d^2} \quad (1-2)$$

با افزایش تعداد مرز دانه‌ها، d کاهش می‌یابد و ε^0 افزایش می‌یابد. این معادله از معادله نیم تجربی (۲-۲) که برای تعیین آهنگ خزش ارائه شده با فرض $n = 1$ بدست آمده است [۵].

$$\frac{\varepsilon_S^0 kT}{D G b} = A \left(\frac{\sigma}{G} \right)^n \quad (2-2)$$

$$\varepsilon_S^0 = \text{آهنگ خزش پایدار}$$

$$k = \text{ثابت بولتزمن}$$

$$T = \text{دمای مطلق}$$

$$D = \text{ضریب نفوذ پذیری}$$

$$G = \text{مدول برشی}$$

$$b = \text{بردار برگرز}$$

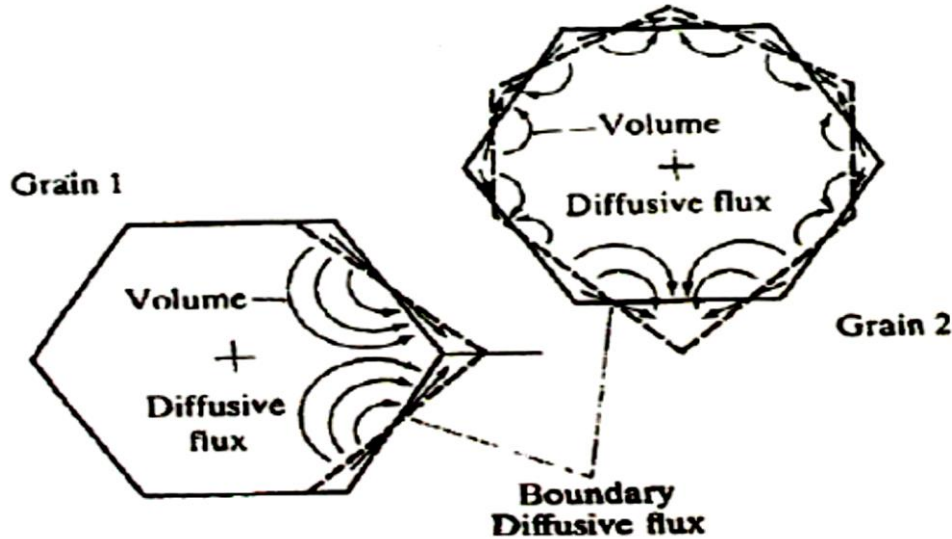
$$\sigma = \text{تنش اعمالی}$$

$$A, n = \text{ثوابت ماده}$$

۲-۲-۲ لغزش مرز دانه

جابجایی که به واسطه سر خوردن دو دانه بر روی یکدیگر تحت تنش اعمالی خارجی، اتفاق می‌افتد، لغزش مرز دانه تعریف می‌شود. این مکانیزم در تنش‌های کم و حرکت در نزدیکی یا در مرز دانه اتفاق می‌افتد. دو مکانیزم مختلف لغزش مرز دانه: راشینگر و لیفشیتز است. لغزش لیفشیتز در خزش نابارو هرینگ یا کوبل اتفاق می‌افتد. تحت این شرایط دانه با توجه به نفوذ جای خالی تحت تنش جابجا می‌شود. در راشینگر شکل دانه عوض نمی‌شود اما دانه‌ها نسبت به هم جابجا می‌شوند [۷]. شکل (۳-۲) تغییر شکل دانه‌ها در اثر نفوذ در دانه و مرز دانه را نشان می‌دهد. جهت محاسبه نرخ خزش از معادله (۳-۲) استفاده می‌شود.

$$\varepsilon^0 = \frac{A D g b}{K T d^3} \left(\frac{b}{d} \right)^p \left(\frac{\sigma}{G} \right)^n \quad (3-2)$$



شکل ۲-۳: تغییر شکل دانه‌ها در اثر نفوذ در دانه و مرز دانه [۸]

تحت این شرایط $n \sim 2$ است. علاوه بر مقدار n با استفاده از مشاهده افسست‌های بعد از خزش نیز می‌توان به مکانیزم سرش مرز دانه پی برد [۷].
در برخی از تقسیم بندی‌ها سرش مرز دانه‌ای به عنوان مکانیزم مستقل بیان نمی‌شود و زیر مجموعه مکانیزم‌های خزش نفوذی و خزش نابجایی محسوب می‌شود [۷].

۳-۲-۲ خزش نابجایی

خزش نابجایی به ۳ مکانیزم عمده نسبت داده می‌شود: لغزش ویسکوز نابجایی، صعود نابجایی و لغزش متقاطع فعال شده با گرما. هر سه مکانیزم در تنش‌ها و دماهای مختلف به وجود می‌آیند [۷ و ۹].

۱-۳-۲-۲ لغزش ویسکوز نابجایی

لغزش ویسکوز نابجایی در دماهای پایین‌تر ($۶۰۰ - ۷۵۰\text{K}$) و تنش نرماله کمتر مشاهده می‌شود. در این شرایط $n = 3$ می‌باشد. حرکت نابجایی‌ها در این حالت به واسطه حضور اتمسفر محلول محدود می‌شود. اتم‌های محلول بسته به اختلاف اندازه بین اتم‌های خود و زمینه منجر به ایجاد کرنش در شبکه می‌شود. اتم‌های محلول به سمت نابجایی مهاجرت کرده و برخی از این کرنش‌ها را آزاد می‌کند که به نام اتمسفر کاترل شناخته می‌شود. تحت این شرایط نابجایی یا باید خود را از این اتمسفر جدا کرده یا آن را با خود بکشد. نرخ خزش در لغزش ویسکوز نابجایی به وسیله نرخ مهاجرت اتم‌های محلولی که به نابجایی چسبیده‌اند تعیین می‌شود [۹].

۲-۳-۲-۲ صعود نابجایی

در تنش نرماله بیشتر صعود نابجایی کنترل کننده است. تحت این شرایط نابجایی از اتمسفرهای محلول جدا می‌شود. توان خزشی به دست آمده برابر ۶ و انرژی فعال‌سازی همانند لغزش ویسکوز است. با توجه به این که فرآیند صعود نابجایی به نفوذ جای خالی و بین نشین نیاز دارد، پس سرعت نفوذ کنترل کننده فرآیند است [۹].

۲-۳-۲-۲ لغزش متقاطع فعال شده با گرما

در دمای بالاتر، تغییر شکل خزشی به لغزش متقاطع فعال شده با گرمای نابجایی‌های پایه به صفحه منشوری نسبت داده می‌شود. انرژی فعال‌سازی به مراتب بیش از دو مکانیزم دیگر است و توان خزش ۴ است [۹].

۲-۳-۲-۲ خزش هارپر-درن

خزش هارپر-درن هم جزو مکانیزم‌های خزش نابجایی محسوب می‌شود و در موادی چون آلومینیوم اتفاق می‌افتد. تحت این شرایط نابجایی‌ها درون دریایی از نابجایی‌های ثابت حرکت می‌کنند و چگالی نابجایی با تنش تغییر نمی‌کند [۱۰].

۲-۳ انتقال در مکانیزم‌های خزشی

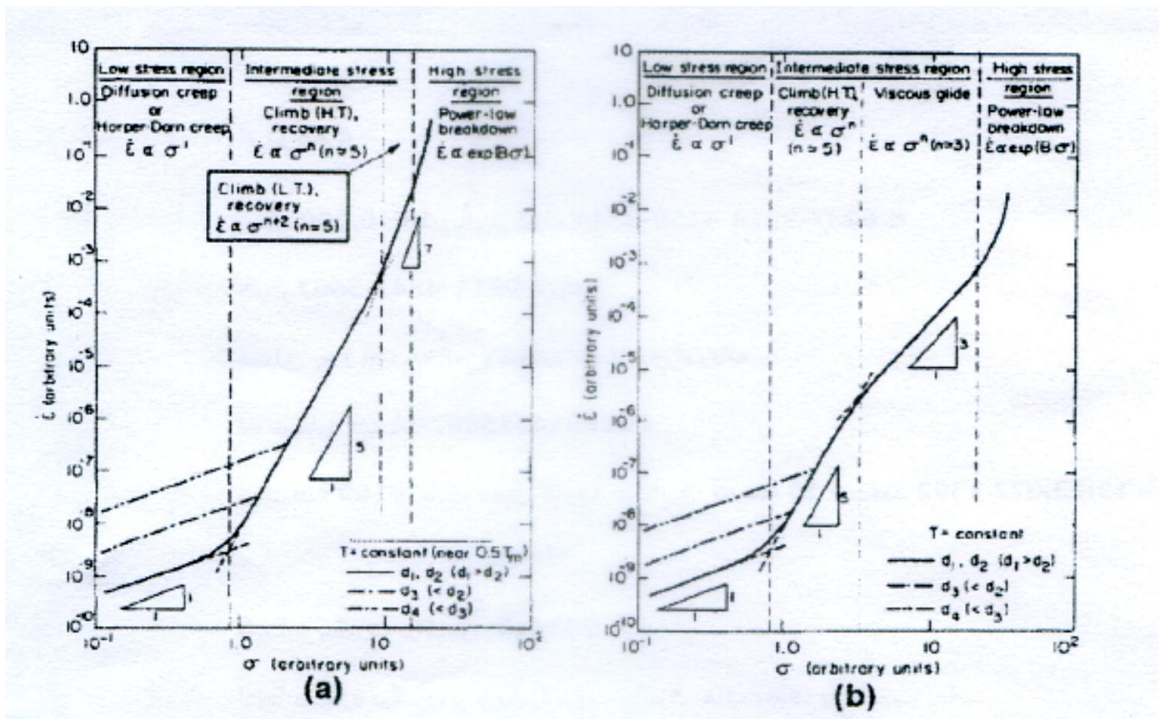
در جدول (۲-۱) که توسط یآوری و لانگدن گردآوری شده، برخی از مکانیزم‌های خزشی بر حسب n ، p و Q خلاصه شده‌اند. Q_i ، Q_{gb} ، Q_p و Q_l به ترتیب انرژی‌های فعال‌سازی نفوذ در خود اتم‌های محلول، نفوذ مرز دانه‌ای، نفوذ در کانال نابجایی و نفوذ در خود شبکه می‌باشند [۱۱].

در شکل (۲-۴) انتقال در مکانیزم‌های خزشی برای آلیاژهای محلول جامد نشان داده می‌شود. در شرایطی که $n=1$ باشد، مکانیزم‌های هارپر-درن، نابارو هرینگ و کوبل حکمفرما می‌باشند. در شرایطی که اندازه دانه بزرگ باشد (مانند d_1 و d_2) فلز تحت مکانیزم هارپر-درن تغییر شکل می‌دهد. این مکانیزم در تنش‌های کم اتفاق می‌افتد و با توجه به این که مقدار p برابر صفر است، بر روی خط ممتد قرار می‌گیرد. در اندازه دانه‌های کوچکتر مانند d_3 ($d_3 < d_2$) و d_4 ($d_4 < d_3$) خزش نفوذی حائز اهمیت است. تحت این شرایط $p=2$ (نابارو هرینگ) و ۳ (کوبل) است. همانطور که مشاهده می‌شود نرخ خزش در مقایسه با هارپر-درن افزایش یافته و به صورت خطوط شکسته نشان داده می‌شوند. افزایش اندازه دانه منجر به کاهش نرخ خزش می‌شود. در تنش‌های بالاتر تغییر در توان خزشی از ۱ به ۵ تحت فرآیند صعود دما بالا مشاهده می‌شود [۱۱].

جدول ۱-۲: مکانیزم‌های خزشی مختلف با توجه به مقادیر n ، p و Q [۱۱]

مکانیزم	Q	P	وابستگی تنش	محدوده تنش
نابارو هرینگ	Q_l	۲	$\epsilon' \alpha \sigma^1$	کم
کوبل	Q_{gb}	۳	$\epsilon' \alpha \sigma^1$	
هارپر-درن	Q_l	۰	$\epsilon' \alpha \sigma^1$	
صعود (دما بالا)	Q_l	۰	$\epsilon' \alpha \sigma^n (n = 5)$	متوسط
صعود (دما پایین)	Q_p	۰	$\epsilon' \alpha \sigma^{n+2} (n = 5)$	
لغزش ویسکوز	Q_i	۰	$\epsilon' \alpha \sigma^n (n = 3)$	
شکست قانون نمایی	Q_l	۰	$\epsilon' \alpha \exp(B\beta)$	بالا

مراحل ذکر شده تاکنون، در هر دو شکل a و b مشابه است. در شرایطی که شیب دمایی در ناحیه تنش متوسط از ۵ به ۷ تغییر کند (شکل ۲-۴ a)، صعود دمای پایین با توجه به نفوذ در کانال نابجایی حاکم است. در شرایطی که $n=3$ در ناحیه تنش متوسط باشد (شکل ۲-۴ b) لغزش ویسکوز نابجایی حاکم است. لغزش ویسکوز نابجایی ناشی از اتم‌های محلول اطراف نابجایی است. از آن جایی که فرآیندهای لغزش ویسکوز و صعود سری‌اند، کنترل کننده دارای نرخ کمتر است. با افزایش تنش، تغییر در توان خزشی از ۵ به ۳ ایجاد می‌شود [۱۱]. در تنش‌های بالاتر (که در ۲-۵ a و b مشاهده می‌شود) شکست قانون نمایی حاکم است.



شکل ۲-۴: انتقال مکانیزم‌های خزشی (a) نزدیک به دمای ذوب، (b) نزدیک به $0.5T_m$ [۱۱]

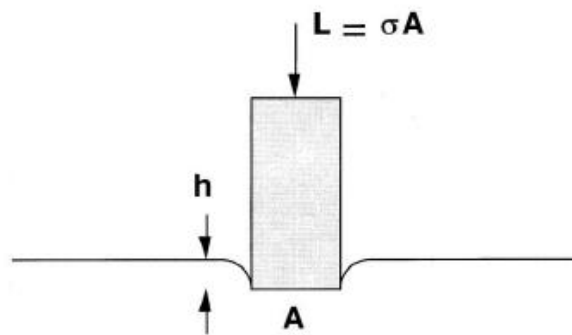
۲-۴ خزش فروروندگی

اگرچه در تحلیل فرآیندهای خزشی، متداول‌ترین روش آزمایش که هنوز به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد، آزمایش کشش تک محوری می‌باشد، با این حال محدودیت‌هایی در این روش وجود دارد. اولاً تهیه نمونه‌ها بر اساس شکل استاندارد آزمایش هزینه بر و زمان بر است. ثانیاً عدم یکنواختی کامل در ساختارها، تجزیه و تحلیل رفتار را مشکل می‌سازد. به دلایل ذکر شده در چند دهه اخیر، روش آزمایش خزش فروروندگی توجه محققین بسیاری را به خود معطوف ساخته است. در بررسی‌های مختلف انجام شده در این زمینه، پژوهشگران از شکل‌های مختلفی از فرورونده‌ها شامل فرورونده‌های هرمی، کروی و مخروطی استفاده نموده و روابطی را برای یافتن نرخ خزش متناسب با شرایط بکار گرفته شده پیشنهاد نمودند [۱۵-۱۲].

۲-۴-۱ آزمایش خزش فروروندگی با استفاده از فرورونده استوانه‌ای

علیرغم سادگی روش‌های آزمایش خزش فروروندگی نسبت به آزمایش خزش متداول این نکته همچنان مطرح بوده است که در این روش‌ها نیز به دلیل تغییر قطر تدریجی فرورونده‌های کروی، مخروطی و یا هرمی، سرعت نفوذ در یک بار ثابت، ثابت نخواهد بود. برای رفع این مشکل اولین بار محققى به نام Larson پیشنهاد استفاده از یک فرورونده استوانه‌ای شکل را در سال ۱۹۶۷ میلادی مطرح نمود، اما چندان مورد توجه قرار نگرفت. چند سال بعد در اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی، Li و همکارش اولین سری تحقیقات خود را در زمینه بکارگیری فرورونده استوانه‌ای بر روی تک کریستال‌ها به انجام رساندند. Li در مطالعات خود سه عامل نفوذ حجمی، نفوذ سطحی و حرکت نابجاییها را بعنوان مکانیزم‌های اصلی تغییر شکل در فرآیند خزش فروروندگی مطرح نمود [۱۶، ۱۷].

نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که اطلاعات خزشی حاصل از این روش، تطابق خوبی با نتایج حاصل از آزمایش‌های خزش کششی متداول داشته‌اند. بعدها محققین دیگری نظیر Kovacs، Juhasz و دیگران از این روش به صورت موفقیت آمیز برای بررسی رفتار خزشی پلی کریستالها و مواد سوپر پلاستیک استفاده نمودند. در شکل (۲-۵) نمای شماتیک از فرآیند خزش فرورونده استوانه‌ای نشان داده شده است.



شکل ۲-۵: طرح شماتیک از تأثیر یک فرورونده استوانه‌ای [۱۸]