

صلاة الاضلاع

باسمه تعالی



مدیرت تحصیلات تکمیلی

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب ناهید زنده‌دل متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه 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 پایان نامه 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 دبیر شهید رجایی می‌باشد

ناهید زنده‌دل

امضاء



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی اثر منیزیم بر رفتار خزشی آلیاژ

Al-2%Ni-2%Mn-(0-1-2)%Mg

نگارش

ناهید زنده‌دل

استاد راهنما : دکتر سید مهدی میراسماعیلی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته شناسایی و انتخاب مواد فلزی

اردیبهشت 1391

شماره: ۱۱۹۲/۱۱۲۹۳
تاریخ: ۱۳۹۲/۲/۲۱
پیوست:



بیت

دانشگاه تربیت مدرس شیرازی

صور تجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم ناهید زنده دل رشته مهندسی مواد-شناسایی و انتخاب مواد مهندسی تحت عنوان بررسی تاثیر منیزیم بر رفتار خزشی آلیاژ Mg(۱-۲)%(۰-۱-۲)Mn-۲%Ni-۲%AL که در تاریخ ۹۱/۲/۱۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه تربیت مدرس شیرازی برگزار گردید و نتیجه به شرح زیر اعلام گردید.

قبول (با درجه عالی) امتیاز ۱۹/۱۷ دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۵- غیر قابل قبول (کمتر از ۱۴)

اعضاء	نام و نام خانوادگی	مرتبیه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر سید مهدی میراسماعیلی	استادیار	
استاد داور داخلی	دکتر بهرام نامی	استادیار	
استاد داور خارجی	دکتر بهمن میرزاخانی	استادیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمدرضا ارباب تفتی	استادیار	

دکتر غلامرضا پایگان

رئیس دانشکده مهندسی مکانیک

تهران، لویزان، کد پستی: ۱۶۷۸۸-۱۵۸۱۱
صندوق پستی: ۱۶۳-۱۶۷۸۵
تلفن: ۲۲۹۷۰۰۶۰-۹ فکس: ۲۲۹۷۰۰۳۳
Email: sru@sru.ac.ir
www.srttu.edu

تقدیرم بہ پدر و مادرم

حامیان ہمیشگی من در زندگی کہ دگر من ایشان در این راہ ہم وارہ ہر از نیروی تازہ من بنشینید

تقدیرم بہ ہر مرفر زندم

کہ تکہ الین تحقیق بدون یتدی و فداکاری ایشان یہ مرز بود

تقدیر تشکر

رپاس خرمولون به درگاه ایزد منان که رحمت بی انتهایش در تمام ذرات عالم جاریست و از شکر نعمت های و ثمارش
تمامی مرا حال زندگی خود جا بهزمو بنامید به لطف بخشش اش در دنیا آخرت هیچ ندارم
بر خود لازم و لازم تا در اتب رپاس قلبم را خدمت استاد راهنمای بزرگم کمالیم آقای دکتر میرا معین تقدیرم
دارم عانید که مرا من جناب آقای دکتر نامن آوقبتی بکتر میرزا حافی که ز رحمت بازخواستی و داوری این پایان
را متل کردیدند پاسکزار مییم هم چندین لازم و لازم آقای مهندس که بکجهن زحمات و همراهی ایشان انجام
این حد میرم کشتند تشکر خدا و هم بزرگ برای همه این عزیزان و تمامی دورتا فیکه به زوعی مرا در این کاریاری
رسانند آرزوی سلامتی و موفقیت روز افزون دارم

چکیده

در این تحقیق، اثر منیزیم بر ریزساختار و خواص خزشی آلیاژ ریختگی Al-1.6Ni-1.6Mn که در ساخت قطعات ریختگی فضاپیما و خودرو استفاده می‌شود و در دمای بالا کاربرد دارد، مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی اثر منیزیم در تغییرات خواص خزشی آلیاژ با افزودن مقادیر مختلف منیزیم از روش خزش فروروندگی با فرورونده استوانه‌ای شکل استفاده شد. دماهای آزمون خزش آلیاژ مورد پژوهش، به ترتیب 483، 493، 503 و 513 کلوین انتخاب شده و سطوح تنشی در محدوده 420-524 MPa اعمال گردید. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که افزودن منیزیم به آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn باعث پراکندگی فازهای رسوبی در مرزدانه شده و مقاومت خزشی کاهش می‌یابد. مقادیر توان تنشی و انرژی فعال‌سازی برای آلیاژ فاقد منیزیم به ترتیب 6/2 و 165kJ/mol و برای آلیاژ حاوی 1% Mg به ترتیب 4/8 و 133kJ/mole و برای آلیاژ حاوی 7/1% Mg به ترتیب 4/5 و 122 kJ/mole بدست آمد.

واژگان کلیدی

آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn - خزش فروروندگی - مکانیزم خزش - منیزیم - ریزساختار

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

2 1-1- مقدمه

فصل دوم: مروری بر منابع

4 1-2- نگاه کلی به خزش فلزات و آلیاژها

5 2-2- فرآیندهای تغییر شکل حین خزش

5 1-2-2- خزش کنترل شده با فرآیند نفوذ

7 2-2-2- خزش ناشی از لغزش مرزدانه‌ها

8 3-2-2- خزش نابجائی

9 4-2-2- مکانیزم کنترل کننده خزش

10 3-2- نقشه تغییر فرم خزش

12 4-2- آزمایش خزش فروروندگی با استفاده از فرورونده استوانه‌ای

15 1-4-2- معادلات خزش فروروندگی با استفاده از فرورونده استوانه‌ای

16 5-2- آلیاژهای آلومینیم با کاربرد دما بالا

17 6-2- معرفی آلیاژهای ریختگی Al-Ni-Mn

18 7-2- تأثیر نیکل در آلیاژهای آلومینیم

21 8-2- تأثیر منیزیم در آلیاژهای آلومینیم

22 9-2- سیستم‌های تعادلی در آلیاژهای حاوی نیکل

22 1-9-2- سیستم تعادلی Al-Ni-Mn

24 2-9-2- سیستم تعادلی Al-Mg-Mn

25 3-9-2- سیستم تعادلی Al-Mg-Ni

فصل سوم: روش تحقیق

29 1-3- ترکیب شیمیایی مواد اولیه

29 2-3- ذوب و آلیاژسازی

29 3-3- ریخته‌گری

30 4-3- آماده‌سازی نمونه‌ها

31	.....5-3- متالوگرافی کیفی و کمی
32	.....6-3- سختی سنجی
32	.....7-3- آزمون خزش

فصل چهارم: نتایج و بحث

35	.....1-4- ترکیب شیمیایی آلیاژها
35	.....2-4- نتایج مربوط به آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn
35	.....1-2-4- ریزساختار قبل از خزش
38	.....2-2-4- نتایج آزمایش خزش آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn
40	.....3-2-4- ریزساختار پس از خزش
42	.....3-4- نتایج مربوط به آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-1Mg
42	.....1-3-4- ریزساختار قبل از خزش
43	.....2-3-4- نتایج آزمایش خزش آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-1Mg
46	.....4-4- نتایج مربوط به آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-1.7Mg
46	.....1-4-4- ریزساختار قبل از خزش
48	.....2-4-4- نتایج آزمایش خزش آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-1.7Mg
51	.....3-4-4- ریزساختار پس از خزش
53	.....5-4- تعیین مکانیزم خزش برای آلیاژها
53	.....6-4- مقایسه نهایی رفتار خزشی آلیاژها

فصل پنجم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

57	.....1-5- نتیجه گیری
58	.....2-5- پیشنهادات
59	.....فهرست منابع

فهرست جداول

- جدول (1-2) خواص مکانیکی (کششی) و سختی آلیاژهای ریختگی Al-Ni-Mn با ترکیب‌های مختلف 18
- جدول (2-2) مشخصات متالورژیکی آلیاژهای Al-Ni-Mn بررسی شده در دمای 620 درجه سانتی‌گراد. 23
- جدول (1-4) آنالیز شیمیایی آلیاژها (درصد وزنی) در تحقیق حاضر 35
- جدول (2-4) الکترونگاتیویته عناصر موجود در آلیاژهای مورد بررسی در این پروژه 48

فهرست تصاویر

- شکل (1-2) نمونه‌ای از یک منحنی خزش 4
- شکل (2-2) نمودار نرخ کرنش در آزمایش خزش به صورت تابعی از کرنش کل 5
- شکل (3-2) طرح شماتیک از خزش ناشی از نفوذ که سبب کشیده شدن دانه در جهت تنش اعمالی می‌گردد 6
- شکل (4-2) لغزش مرزدانه‌ای سبب ناهمگنی در دو انتهای صفحات A , B شده است 7
- شکل (5-2) نمای شماتیک از خزش کنترل شده با صعود یک نابجایی لبه‌ای از طریق صعود از مانع موجود عبور می‌کند 8
- شکل (6-2) کنترل پدیده خزش با دو فرآیند همزمان A و B در دو حالت سری و موازی 10
- شکل (7-2) نمودار نرمالیزه شده برای آلومینیم خالص با ابعاد دانه 10 میکرون 11
- شکل (8-2) طرح شماتیک از تأثیر یک فرورونده استوانه‌ای 13
- شکل (9-2) طرح شماتیک از تجهیزات آزمایش خزش فروروندگی با فرورونده استوانه‌ای 14
- شکل (10-2) استفاده از روش خزش فروروندگی در بررسی مرزدانه (لف) پلی‌کریستال دانه‌ریز (ب) پلی-کریستال دانه درشت. 15
- شکل (11-2) (الف) سختی در دمای مختلف برای فازهای مختلف حاوی نیکل، (ب) سختی در دمای 600K نسبت به 300K 19
- شکل (12-2) نمودار تعادلی Al-Mg 20
- شکل (14-2) تغییرات انرژی نقص در چیدن در سیستم Al-Mg 21

- 21 شکل (2-15) نمودار تأثیر افزایش منیزیم روی خواص خزشی آلومینیم خالص
- 22 شکل (2-16) نمودار تعادلی سیستم Al-Ni-Mn
- 24 شکل (2-17) نمودار تعادلی Al-Mg-Mn، الف) حالت لیکوئیدوس، ب) توزیع فازها در حالت جامد
- 26 شکل (2-18) نمودار تعادلی Al-Mg-Ni
- 28 شکل (3-1) نمودار کلی فرآیندهای انجام شده در این پروژه
- 29 شکل (3-2) کوره گازی استفاده شده جهت ذوب و آلیاژسازی
- 30 شکل (3-3) دستگاه Tilt Casting مورد استفاده در این پروژه
- 30 شکل (3-4) شماتیک نمونه‌های آماده شده برای انجام تست خزش
- شکل (3-5) الف) تصویر دستگاه خزش فروروندگی استفاده شده در این تحقیق، ب) لودسل، ج) اندازه‌گیر
 33 جابجایی خطی و د) نمایشگر دمای کوره، لودسل و اندازه‌گیر جابجایی خطی
- 36 شکل (4-1) تصویر میکروسکوپ نوری آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn در دو بزرگنمایی مختلف
- 36 شکل (4-2) نقشه توزیع عناصر آلیاژی آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn
- شکل (4-3) تصویر میکروسکوپ الکترونی آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn به همراه آنالیز نقطه‌ای از دو ناحیه
 37 مجزا
- 38 شکل (4-4) نمودار منحنی‌های تابعیت عمق فروروندگی بر حسب زمان در آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn
- شکل (4-5) نمودار لگاریتمی نرخ فروروندگی به صورت تابعی از تنش اعمال شده برای آلیاژ Al-1.6Ni-
 39 1.6Mn.
- 40 شکل (4-6) نمودار نیمه لگاریتمی نرخ فروروندگی به صورت تابعی از دما برای آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn
- شکل (4-7) ریزساختار آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn در زیر فرورونده پس از خزش در دمای 513 کلوین تحت
 41 تنش 490 مگاپاسکال الف) تصویر میکروسکوپ نوری، ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی
- 42 شکل (4-8) تصویر میکروسکوپ نوری آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-1Mg در دو بزرگنمایی مختلف
- 43 شکل (4-9) نقشه توزیع عناصر آلیاژی آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-1Mg
- 44 شکل (4-10) نمودار منحنی‌های تابعیت عمق فروروندگی بر حسب زمان در آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-1Mg
- شکل (4-11) نمودار لگاریتمی نرخ فروروندگی به صورت تابعی از تنش اعمال شده برای آلیاژ Al-1.6Ni-
 45 1.6Mn-1Mg
- شکل (4-12) نمودار نیمه لگاریتمی نرخ فروروندگی به صورت تابعی از دما برای آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-
 45 1Mg
- 46 شکل (4-13) تصویر میکروسکوپ نوری آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-1.7Mg

- 47 شکل (4-14) نقشه توزیع عناصر آلیاژی Al-1.6Ni-1.6Mn-1.7Mg
- شکل (4-15) تصویر میکروسکوپ الکترونی آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-1.7Mg به همراه آنالیز نقطه‌ای از ناحیه A
- 48 شکل (4-16) نمودار منحنی‌های تابعیت عمق فروروندگی بر حسب زمان در آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-1.7Mg
- 50 شکل (4-17) نمودار سختی بر حسب درصد وزنی منیزیم برای آلیاژهای مورد بررسی
- شکل (4-18) نمودار لگاریتمی نرخ فروروندگی به صورت تابعی از تنش اعمال شده برای آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-1.7Mg
- 50 شکل (4-19) نمودار نیمه لگاریتمی نرخ فروروندگی به صورت تابعی از دما برای آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-1.7Mg
- 51 شکل (4-20) ریزساختار آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn-1.7Mg در زیر فرورونده پس از خزش در دمای 513 کلوین تحت تنش 490 مگاپاسکال الف) تصویر میکروسکوپ نوری، ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی
- 52 شکل (4-21) مقایسه کمترین نرخ کرنش برای سه آلیاژ در تنش‌های مختلف در دماهای الف) 483K، ب) 493K، ج) 503K، د) 513 K
- 55

فصل اول

مقدمه

مقدمه

با ورود آلومینیم به صنعت در سال‌های 1900 به دلیل مشخصه‌های بارزی نظیر مقاومت به خوردگی، وزن حجمی پایین و انتقال حرارت بالا ایده جایگزینی آهن و فولاد با این فلز در بسیاری از کاربردها مطرح گردید اما آلومینیم از خواص استحکامی خوبی برخوردار نبود به منظور رفع این نقیصه توجه به سمت تولید آلیاژهای پایه آلومینیم با خواص مکانیکی بهتر معطوف گردید که با افزودن عناصری نظیر Sc, Ti, Ni, Mn، به مقدار زیادی می‌توان استحکام این آلیاژها را بهبود بخشید. آلیاژهای ریختگی Al-Ni-Mn در صنایع هوافضا و ساخت قطعات موتورهای خودرو با کاربردهای دما بالا استفاده می‌شوند و به دلیل حضور منگنز دارای مقاومت خوردگی بالا می‌باشد که می‌تواند سال‌های سال بدون تغییر رنگ در دمای بالا مورد استفاده قرار گیرد.

از پدیده‌های مهمی که در دمای بالا می‌تواند موجب تخریب یا حتی شکست قطعه گردد، پدیده خزش می‌باشد. 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. آلیاژهای ریختگی Al-Ni-Mn به دلیل حضور عناصر آلیاژی و ترکیبات بین فلزی با مقاومت حرارتی بالا دارای خواص خزشی خوبی می‌باشند. بر این اساس و با توجه به اینکه فعالیتی در زمینه بررسی خواص خزشی آلیاژهای ریختگی Al-Ni-Mn صورت نگرفته است در این تحقیق تلاش شده تا رفتار خزشی این آلیاژ مورد ارزیابی قرار گیرد.

در این پروژه آلیاژ Al-1.6Ni-1.6Mn در حالت پایه که فاقد منیزیم می‌باشد و پس از افزودن منیزیم 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, Map 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 n و Q تعیین و مکانیزم‌های غالب پیشنهاد شده و پس از مقایسه کلی بین خواص خزشی مناسب‌ترین آلیاژ گزارش گردیده است.

فصل دوم

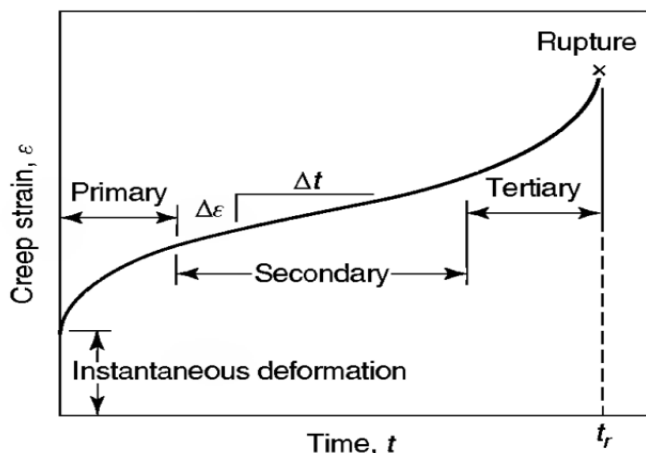
مروری بر منابع

1-2 نگاه کلی به خزش فلزات و آلیاژها

بطور کلی تنش سیلان یک فلز خالص، σ ، شامل دو جزء مختلف است:

$$\sigma = \sigma^p + \sigma_E \quad (1-2)$$

σ^p جزئی از تنش سیلان است که وابسته به دما می‌باشد، درحالی‌که σ_E جزء دیگری است که تأثیر ساختارناجائیها را در فلز انعکاس می‌دهد. اندیس E نیز نشانگر آن است که تابعیت این جزء از دما تنها به دلیل وابستگی مدول به دما است. از این واقعیت که تنش سیلان شامل یک جزء فعال شونده با حرارت است، می‌توان دریافت که تغییر شکل پلاستیک می‌تواند در مقدار ثابتی از دما و تنش صورت گیرد. فرآیند تغییر شکل پلاستیک فزاینده ماده تحت تنش و دما ثابت "خزش" نامیده می‌شود [1].



شکل 1-2: نمونه ای از یک منحنی خزش [2]

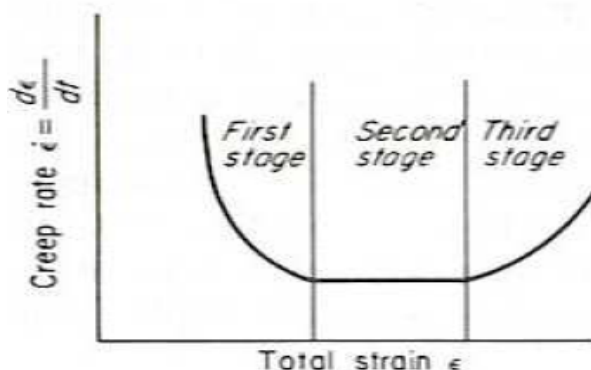
به محض شروع آزمایش، در اثر اعمال بار وارده نوعی رفتار الاستیک لحظه‌ای رخ داده و به دنبال آن مرحله خزش انتقالی (مرحله I) شروع خواهد شد. در ابتدای این مرحله نرخ کرنش بالا بوده و به تدریج از میزان آن کاسته می‌شود. تحت این شرایط، مقاومت خزشی ماده در اثر تغییر شکل، زیاد می‌شود. در مرحله دوم، نرخ خزش تقریباً 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 تغییرشکل 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 تغییرشکل شتابدار نمونه تا لحظه شکست خواهد بود [1-5].

2-2 فرآیند های تغییر شکل در خزش

چنانچه شیب منحنی خزش بر حسب کرنش کل رسم شود، نمودار حاصله، تغییرات زیادی را در سرعت خزش در حین انجام آزمایش نشان می‌دهد (شکل 2-2). از آنجائیکه در این مدت تنش و دما ثابت بوده‌اند، این تغییرات در نرخ کرنش ناشی از تغییر در ساختار داخلی ماده است.



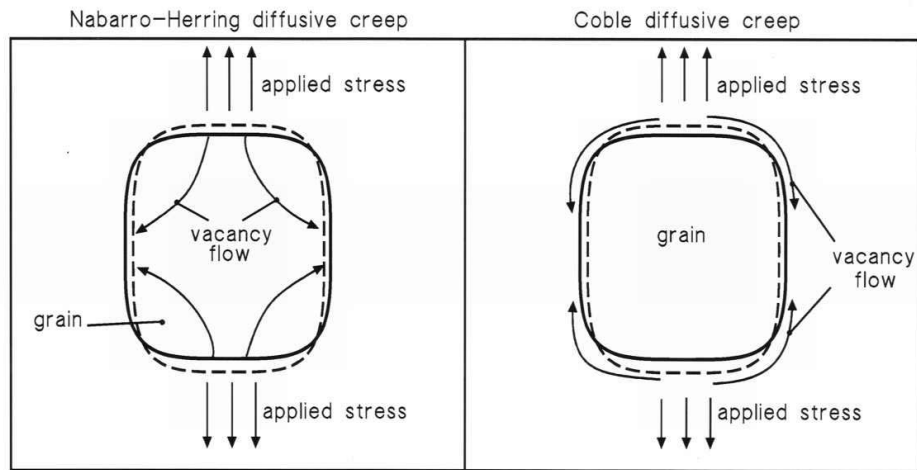
شکل 2-2: نمودار نرخ کرنش در آزمایش خزش به صورت تابعی از کرنش کل [3]

فرآیندهای تغییر شکل مختلفی در خزش موثر می‌باشند که عبارتند از:

2-2-1 خزش کنترل شده با فرآیند نفوذ

تنش اعمالی در یک ماده کریستالی، موجب افزایش چگالی جاهای خالی، در مرزدانه‌های تحت کشش، می‌شود و متناظر با آن، در مرزدانه‌هایی که تحت تنش فشاری قرار دارند، چگالی جاهای خالی کاهش می‌یابد که جریان جاهای خالی معادل با جریان اتم‌ها در جهت مخالف است. خزش با جریان و حرکت نفوذی اتم‌ها، از منبع مرزدانه-هایی که حامل بار فشاری هستند به قسمتی که بار کششی اعمال می‌شود، ادامه می‌یابد. می‌توان تصور نمود که با انتقال اتم‌ها به مرزهای عمود بر محور تنش نمونه کشیده خواهد شد. این فرآیند با نفوذ کنترل می‌شود و نرخ کرنش

به صورت خطی با تنش افزایش می‌یابد.



شکل 2-3: طرح شماتیک از خزش ناشی از نفوذ که سبب کشیده شدن دانه در جهت تنش اعمالی می‌گردد [7]

حال چنانچه خزش از طریق نفوذ درون شبکه رخ دهد، به این نوع فرآیند، خزش نابارو - هرینگ¹ اطلاق می‌گردد. شار نفوذی بین مرزهای موازی و عمود بر محور تنش متناسب با میزان تنش و ضریب نفوذ شبکه D_L بوده و با فاصله نفوذ بین منبع حرکت اتمها و مقصد آنها $d^{1/2}$ نسبت عکس خواهد داشت. سرعت خزش در فرآیند نابارو - هرینگ (N-H) با رابطه زیر بدست خواهد آمد.

$$\dot{\epsilon}_{N-H} = A_{LH} \cdot (\sigma / d^2) \cdot D_L \quad (2-2)$$

که A_{LH} ، ثابت معادله خواهد بود. چنانچه خزش در اثر نفوذ در طول مرزخانه‌ها رخ دهد، به آن فرآیند خزش کوبل² گفته می‌شود. نیروی رانش برای خزش کوبل همان نیروی محرکه در فرآیند نابارو - هرینگ است. در اینجا نیز تعداد کل مسیرهای نفوذ مرزخانه با ابعاد دانه نسبت عکس دارد. در این حالت شار نفوذی، متناسب با $d^{-1/3}$ بوده و نرخ خزش با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$\dot{\epsilon} = A_G \left(\frac{\sigma}{d^{1/3}} \right) \cdot D_{gb} \quad (3-2)$$

که D_{gb} ، نفوذ در طول مرزخانه و A_G ، ثابت معادله می‌باشند. نسبت نفوذ شبکه به نفوذ مرزخانه با دما افزایش می‌یابد، زیرا انرژی فعال‌سازی برای نفوذ مرزخانه همیشه کمتر از نفوذ شبکه است. بنابراین خزش کوبل در دماهای پایین‌تر اهمیت بیشتری پیدا می‌کند درحالیکه خزش نابارو - هرینگ در دماهای بالا مطرح می‌گردد. در هر دو این مکانیزمها بخصوص در فرآیند نابارو - هرینگ سطوح تنش اعمالی پایین بوده ($\frac{\sigma}{G} \ll 10^{-4}$) و از این لحاظ این

1 - Nabarro-Herring
1-Coble

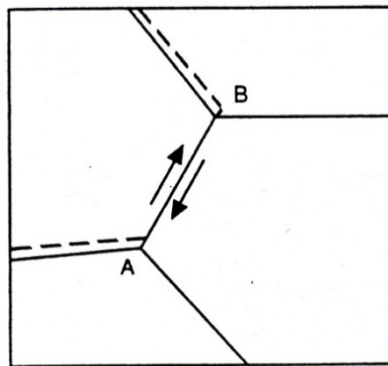
پدیده در کاربردهای مهندسی کمتر مطرح می‌باشد نکته دیگر آنکه در محدوده‌ای از تنش و دما که احتمالاً این نوع فرآیند خزشی وجود دارد، هرچه ابعاد دانه کوچک‌تر باشد، از مقاومت در برابر تغییر شکل کاسته خواهد شد [4 و 6].

2-2-2 خزش ناشی از لغزش مرزدانه‌ها

دانه‌های فلزات چند بلوری در دمای زیاد قادرند نسبت به یکدیگر حرکت کنند. لغزش مرزدانه‌ها در این مواد ذاتاً به صورت ویسکوز اتفاق افتاده و در واقع یک فرآیند برشی است که در جهت مرزدانه رخ می‌دهد. این فرآیند با ازدیاد دما و یا کاهش نرخ کرنش پیشرفت می‌کند. سرعت لغزش بر روی مرزدانه‌ها، متناسب با مقدار تنش بوده و با ویسکوزیته، نسبت عکس دارد. همچنین نرخ پیشروی در این حالت بستگی به سطح مرزدانه در واحد حجم دارد، بنابراین با ابعاد دانه (d) نیز نسبت عکس خواهد داشت بنابراین رابطه نرخ کرنش حاصل از لغزش مرزدانه‌ای به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\dot{\epsilon}_v = A \left(\frac{\sigma}{d}\right)^n \exp\left(-Q_v/RT\right) \quad (4-2)$$

در رابطه بالا، $\dot{\epsilon}_v$ تنش اعمال شده، A ثابت ماده، d ابعاد دانه، Q انرژی فعال سازی، R ثابت گازها و T دمای مطلق می‌باشند. چنانچه لغزش مرزدانه تنها پدیده فعال می‌بود، در یک انتهای مرزی که روی آن لغزش رخ داده تجمع ماده به وجود آمده و در انتهای دیگر کاهش ماده رخ می‌داد این روند را می‌توان به صورت شماتیک در شکل (4-2) مشاهده نمود.

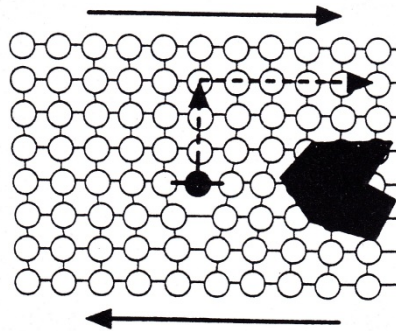


شکل 4-2: لغزش مرزدانه‌ای سبب ناهمگنی در دو انتهای صفحات A , B شده است [4]

این ناسازگاری وعدم تطابق باید با فرآیند تغییر شکل دیگری ترمیم و به گونه‌ای جبران شود. فرآیند دوم می‌تواند حرکت نابجائی، نفوذ یا مهاجرت مرزدانه باشد.

3-2-2 خزش نابجائی

فرآیند سوم خزش بر اساس حرکت نابجائیهها بوده و عمده بحث بر لغزش و صعود متمرکز می‌باشد. نابجایی خطی می‌تواند روی صفحه لغزش شامل خط نابجایی و بردار برگرز خود حرکت کند. اما در شرایط ویژه ای ممکن است از صفحه لغزش خارج شده و بر صفحه‌ای موازی صفحه لغزش خود که در بالا و پایین صفحه اولیه قرار دارد، وارد شود. به فرآیند حرکتی نوع اول لغزش و به فرآیند حرکتی دوم صعود اطلاق می‌گردد. حرکت نوع اول، حرکت پایستار¹ نابجایی و حرکت نوع دوم ناپایستار نامیده می‌شود. معمولاً لغزش در دماهای پایین‌تر و سطوح تنشی ($10^{-2} \frac{\sigma}{G}$) بالا رخ می‌دهد درحالی‌که لازمه صعود شرایط دمایی بالا می‌باشد در شکل (5-2) صعود یک نابجایی لبه‌ای جهت عبور از مانع به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل 5-2: نمای شماتیک از خزش کنترل شده با صعود. یک نابجایی لبه‌ای از طریق صعود از مانع موجود عبور می‌کند [4]

در فرآیند حرکت نابجائیهها، نرخ خزش بسته به اینکه نابجائیهها با چه سرعتی می‌توانند بر موانع موجود بر سر راهشان غلبه کنند، کنترل می‌شود. همانطور که اشاره شد پدیده غالب در دماهای بالا صعود است. در فرآیند صعود، نرخ خزش وابسته به ابعاد دانه نبوده اما نرخ صعود به شدت تابع میزان تنش اعمال شده می‌باشد. در این شرایط از رابطه (4-2) که به رابطه خزش قانونی مشهور می‌باشد استفاده می‌گردد:

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \quad (5-2)$$

برای خزش کنترل شده با صعود مقدار n تقریباً برابر 5 است. از آنجائیکه صعود یک پدیده وابسته به نفوذ

می‌باشد، ثابت A نیز مشابه نفوذ شبکه، وابسته به دما خواهد بود. در دماهای پایین، خزش تنها توسط صعود کنترل نمی‌شود و به توان‌های تنشی بالاتر نیاز می‌باشد. روابط (2-2) تا (5-2) نرخ خزش را در حالتی پیش بینی می‌کنند که تنها تابع میزان تنش و دما بوده و مقدار کرنش در سرعت خزش تأثیرگذار نباشد بنابراین این روابط برای خزش

1-Conservative motion