بسم الله الرحمن الرحیم

مبانی خزش فلزات و آلیاژها

مولف:

M. E. Kassner

مترجمین:

دکتر سید عبدالکریم سجادی

(استاد دانشگاه فردوسی مشهد)

مهندس یوسفعلی نگهداری

مهندس مسعود اسلامی مسرور

www.ketab.ir

سرشناسه	:	کسنر، مایکل ارنست Kassner, Michael Ernest
عنوان و نام پدیدآور	:	مبانی خزش در فلزات و آلیاژها/ کاسنر؛ ترجمه سیدعبدالکریم سجادی.
مشخصات نشر	:	مشهد: نشر مشهد،۱۳۹۱.
مشخصات ظاهری	:	۲۶۴ص.: مصور.
شابک	:	964-6157-35-1
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپا
یادداشت	:	عنوان اصلی: .Fandamentals of creep in metals any alloys
یادداشت	:	کتابنامه .
موضوع	:	فلزها -- خزش
موضوع	:	آلیاژها -- خزش
شناسه افزوده	:	سجادی، عبدالکریم، ۱۳۴۱ - ، مترجم
رده بندی کنگره	:	TA۴۶۰/ک۵م۲ ۱۳۹۱
رده بندی دیویی	:	۲۶۰/۱۶۶
شماره کتابشناسی ملی	:	۲۸۸۱۴۹

www.ketab.ir

نشر مشهد

مبانی خزش فلزات و آلیاژها

مولف:

M. E. Kassner

مترجمین:

دکتر سید عبدالکریم سجادی

(استاد دانشگاه فردوسی مشهد)

مهندس یوسفعلی نگهداری

مهندس مسعود اسلامی مسرور

وزیری، ۲۶۴ صفحه، ۱۰۰۰ نسخه، چاپ اول، زمستان ۱۳۹۱

امور فنی و چاپ: موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

بها: ۸۰۰۰۰ ریال

شابک: ۱-۳۵-۶۱۷۵-۹۶۴ ISBN: 964-6157-35-1

پیش‌گفتار مولف

این کتاب که در باره اصول تغییرفرم پلاستیک ناشی از خزش است یک مرور و تجزیه و تحلیل از تحقیقات انجام شده در زمینه‌های مختلف مرتبط با خزش می‌باشد. این زمینه‌ها شامل این موارد می‌شوند: خزش قانون توان پنج، که گاهی تحت عنوان خزش کنترل شده با صعود نابجایی در فلزات، آلیاژها و سرامیک‌ها نامیده می‌شود؛ لغزش چسبنده یا خزش قانون توان سه در آلیاژها، خزش نفوذی، خزش هازپر– دورن، فوق مومسانی، استحکام‌دهی ناشی از فاز ثانویه، و حفره‌زایی و شکست خزشی. بسیاری از منابع مروری و کتاب‌های با کیفیت بالا تلاش دارند تا مطالبی مروری و گسترده در باره مبانی خزش ارائه نمایند. یکی از مزایای این اثر توانایی تشریح کارهای ارزشمند چاپ شده قبلی می‌باشد. سعی شد تا نتایج مطالعات قبلی مورد بحث قرار گیرد ولی تاکید روی پیشرفت‌های اخیر باشد.

این چاپ دوم کتاب می‌باشد و یک جنبه‌ی این چاپ تصحیح خطاهای چاپ اول است. همچنین، پیشرفت‌های پنج سال گذشته نیز در آن گنجانیده شده است. دکتر María-Teresa Pérez-Prado نویسنده همکار برای چاپ اول بود ولی ایشان در تهیه چاپ دوم همکاری ننمود؛ فصل‌های ۵، ۶ و ۹ به مقدار زیادی با همکاری دکتر Pérez-Prado تهیه شده است.

M. E. Kassner
University of Southern California
2009

www.ketab.ir

پیش‌گفتار مترجمین

خزش را به عنوان تغییرشکل مومسانی وابسته به زمان تحت یک تنش یا نیروی ثابت کم و در دمایی بالاتر از نصف نقطه ذوب (برحسب درجه کلوین) تعریف می‌کنند. جالبی این نوع رفتار این است که مواد تحت تنشی به مراتب کمتر از استحکام تسلیم خود دچار تغییرشکل می‌شوند. این نوع رفتار دمای بالا با مکانیزم‌های متعددی اتفاق می‌افتد که در دماهای پایین قادر به انجام تغییرشکل در مواد نیستند. در نتیجه، ردپای خزش را بایستی در مواد دمای بالا جستجو کرد. در حین خزش، مواد دچار تغییرات شدید ریزساختاری می‌شوند بنابراین می‌توان گفت که یکی از عوامل مهم تخریب قطعاتی که در دمای بالا کار می‌کنند خزش می‌باشد.

کتاب حاضر ترجمه چاپ دوم سال ۲۰۰۹ کتاب Fundamentals of Creep in Metals and Alloys نوشته M. E. Kassner می‌باشد. این کتاب که مشتمل بر ۱۱ فصل می‌باشد به مباحثی در خصوص اصول و مبانی تغییرفرم پلاستیک ناشی از خزش و مرور و تجزیه و تحلیل نتایج تحقیقات انجام شده در زمینه‌های مختلف مرتبط با خزش می‌پردازد. مطالبی که در این کتاب مطرح می‌شوند شامل: خزش قانون توان پنج، که گاهی تحت عنوان خزش کنترل شده با صعود نابجایی در فلزات، آلیاژها و سرامیک‌ها نامیده می‌شود، لغزش چسبنده یا خزش قانون توان سه در آلیاژها، خزش نفوذی، خزش هارپر – دورن، فوق مومسانی، استحکام‌دهی ناشی از فاز ثانویه، و حفره‌زایی و شکست خزشی می‌باشد. این مطالب علاوه بر آن که برای دانشجویان رشته‌های مهندسی مواد و متالورژی و مکانیک مفید است برای مهندسینی که با کار قطعات و دستگاه‌ها در دماهای بالا سروکار دارند نیز بسیار با ارزش می‌باشد.

مترجمین این اثر امیدوارند مطالعه این کتاب برای دانشجویان و مهندسین شاغل در صنایع مفید و سودمند باشد و بتواند اطلاعات کافی در ارتباط با خزش را در اختیار آنها قرار دهد.

سید عبدالکریم سجادی
(استاد دانشگاه فردوسی مشهد)
یوسفعلی نگهداری
مسعود اسلامی مسرور
دانشگاه فردوسی مشهد
زمستان ۱۳۹۱

www.ketab.ir

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- توصیف خزش ۱

۱-۲- اهداف ۵

فصل ۲: خزش قانون توانی ۵

۲-۱- روابط ماکروسکوپی ۷

۲-۱-۱- انرژی فعال‌سازی و توان‌های تنشی ۷

۲-۱-۲- تأثیر مدول الاستیک ۱۳

۲-۱-۳- انرژی نقص چیدمان ۱۶

۲-۱-۴- قانون توانی ۳ طبیعی ۲۱

۲-۱-۵- محلول جامد جانشینی ۲۳

۲-۲- مشاهدات میکروساختاری ۲۳

۲-۲-۱- اندازه دانه‌های فرعی، سگالی نابجایی شبکه فرانک، زاویه عدم انطباق دانه‌های فرعی، و جدایش نابجایی در دیواره دانه‌های فرعی در ساختارهای حالت پایدار ۲۳

۲-۲-۲- معادلات ساختار حالت پایدار ۳۱

۲-۲-۳- ریزساختارهای خزش اولیه ۳۸

۲-۲-۴- آزمایش‌های تغییر حالت (گذار) خزشی ۴۴

۲-۲-۵- تنش داخلی ۴۵

۲-۲- تاریخچه‌ای از کارهای آزمایشگاهی ۴۷

۲-۳- مکانیزم‌های کنترل سرعت ۵۵

۲-۳-۱- مقدمه ۵۵

۲-۳-۲- میکروساختار نابجایی و مکانیزم کنترل سرعت ۶۶

۲-۳-۳- آزمایشات درجا و کنترل میکروساختار ۶۹

۲-۳-۴- نکات دیگری در مورد استحکام‌دهی از طریق شبکه نابجایی ۷۰

۲-۴- تأثیر عوامل دیگر بر خزش توانی ۵ ۷۵

۲-۴-۱- تأثیرات بافت و تغییر شکل خزشی در کرنش‌های زیاد ۷۵

۲-۴-۲- تأثیر اندازه دانه ۷۹

۲-۴-۳- ناخالصی‌ها و مقادیر کم حل شونده‌های استحکام‌بخش ۸۱

۲-۴-۴- خزش هلالی شکل ۸۴

فصل ۳: خزش نفوذی ۸۵

www.ketab.ir

فصل ٤: خزش هارپر-دورن

۴-۱- مقدمه ۹۱
۴-۲- تئوری‌های خزش هارپر-دورن ۹۴
۴-۲-۱- تئوری Harper و Dorn ۹۵
۴-۲-۲- تئوری Friedel ۹۷
۴-۲-۳- تئوری Barret، Muehleisen و Nix ۹۸
۴-۲-۴- تئوری Langdon ۹۹
۴-۲-۵- تئوری Wu و Sherby ۹۹
۴-۲-۶- تئوری Wang ۱۰۰
۴-۲-۷- تئوری Ardell ۱۰۰
۴-۳- آخرین پیشرفت‌ها ۱۰۱
۴-۳-۱- تأثیر کرنش ۱۰۱
۴-۳-۲- تأثیر ناخالصی‌ها ۱۰۲
۴-۳-۳- تأثیرات اندازه ۱۰۳
۴-۳-۴- آزمایشات اخیر ۱۰۴
۴-۴- مواد دیگری که خزش هارپر-دورن برای آن پیشنهاد شده است ۱۰۶
۴-۴-۱- α-Zr ۱۰۶
۴-۴-۲- NaCl ۱۰۷
۴-۴-۳- Cu ۱۰۷
۴-۴-۴- CaO ۱۰۷
۴-۴-۵- MgO ۱۰۷
۴-۴-۶- فرستریت (Mg_2SiO_4) ۱۰۸
۴-۴-۷- $CaTiO_3$ و $MgCl_2.6H_2O$ ($CO_{0.5}Mg_{0.5}$) ۱۰۸
۴-۵- خلاصه ۱۰۸

فصل ۵: خزش لغزش چسبنده قانون توانی ۳ ۱۰۹

فصل ٦: سوپرپلاستیسیته

۶-۱- مقدمه ۱۱۹
۶-۲- مشخصات سوپرپلاستیسیته ساختار ریز ۱۲۰
۶-۳- ریزساختار مواد سوپرپلاستیک ساختار ریز ۱۲۳
۶-۳-۱- شکل و اندازه دانه ۱۲۳
۶-۳-۲- وجود فاز ثانویه ۱۲۳
۶-۳-۳- ماهیت و خواص مرزدانه‌ها ۱۲۳

www.ketab.ir

۶-۴- سوپرپلاستیسیته بر اساس مطالعه بافت ۱۲۴
۶-۵- سوپرپلاستیسیته‌ی نرخ کرنش بالا ۱۲۴
۶-۵-۱- سوپرپلاستیسیته‌ی نرخ کرنش بالا در کامپوزیت‌های زمینه فلزی ۱۲۵
۶-۵-۲- سوپرپلاستیسیته نرخ کرنش بالا در مواد آلیاژ شده به صورت مکانیکی ۱۳۰
۶-۶- سوپرپلاستیسیته در مواد نانو و میکروساختار ۱۳۱

فصل ۷: تبلور مجدد

۷-۱- مقدمه ۱۳۵
۷-۲- تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته (DRX) ۱۳۷
۷-۳- تبلور مجدد دینامیکی هندسی ۱۳۸
۷-۴- جوانه‌زنی تحریک شده با ذره (PSN) ۱۳۹
۷-۵- واکنش‌های پیوسته ۱۳۹

فصل ۸: رفتار خزشی آلیاژهای استحکام یافته با ذره

۸-۱- مقدمه ۱۴۱
۸-۲- ذرات با کسر حجمی کم و نسبت‌های هندسی کوچک که با زمینه همدوست و غیرهمدوست هستند ۱۴۱
۸-۲-۱- مقدمه و تئوری ۱۴۱
۸-۲-۲- صعود موضعی و عمومی نابجایی‌ها از روی موانع ۱۴۵
۸-۲-۳- مدل انفصال ۱۴۷
۸-۲-۴- روابط حاکم ۱۵۱
۸-۲-۵- اثرات ریزساختاری ۱۵۵
۸-۲-۶- ذرات همدوست ۱۵۷

فصل ۹ :خزش ترکیبات بین فلزی

۹-۱- مقدمه ۱۵۹
۹-۲- آلومینیدهای تیتانیم ۱۶۱
۹-۲-۱- مقدمه ۱۶۱
۹-۲-۲- مکانیزم‌های خزشی کنترل کننده سرعت در ترکیبات بین فلزی FL TiAl حین خزش مرحله "دوم" ۱۶۳
۹-۲-۳- خزش اولیه در ریزساختارهای FL ۱۷۰
۹-۲-۴- خزش مرحله سوم در ریزساختارهای FL ۱۷۲
۹-۳- آلومینیدهای آهن ۱۷۳
۹-۳-۱- مقدمه ۱۷۳
۹-۳-۲- پدیده‌ی نقطه تسلیم غیرطبیعی و غیرمعمول ۱۷۴

www.ketab.ir

۹-۳-۳- مکانیزم‌های خزشی ۱۷۷
۹-۳-۴- مکانیزم‌های استحکام‌دهی ۱۷۹
۹-۴- آلومینیدهای نیکل ۱۷۹
Ni_3Al-۹-۴-۱ ۱۷۹
NiAl -۹-۴-۲ ۱۸۸

فصل ۱۰: شکست خزشی
۱۰-۱- پیش زمینه ۱۹۳
۱۰-۲- جوانه‌زنی حفره ۱۹۵
۱۰-۲-۱- تجمع تهی‌جاها ۱۹۶
۱۰-۲-۲- لغزش مرزدانه‌ای ۱۹۷
۱۰-۲-۳ -تجمع نابجایی پشت موانع ۱۹۸
۱۰-۲-۴- مکان و محل جوانه‌زنی ۲۰۰
۱۰-۳- رشد حفرات ۲۰۰
۱۰-۳-۱- رشد کنترل شده با نفوذ مرزدانه‌ای ۲۰۰
۱۰-۳-۲- رشد کنترل شده با نفوذ سطحی ۲۰۳
۱۰-۳-۳- لغزش مرزدانه‌ای ۲۰۴
۱۰-۳-۴- رشد نفوذی مهار شده حفره ۲۰۴
۱۰-۳-۵- پلاستیسیته ۲۰۸
۱۰-۳-۶- رشد توأمان نفوذ و تغییرشکل پلاستیک ۲۰۹
۱۰-۳-۷- رشد ترک خزشی ۲۱۲
۱۰-۴- ملاحظات دیگر ۲۱۳

فصل ۱۱: سوپرآلیاژهای پایه نیکل γ'—γ
۱۱-۱- مقدمه ۲۱۵
۱۱-۲- خزش دمای پایین ۲۱۸
۱۱-۳- خزش دمای متوسط ۲۲۱
۱۱-۴- خزش دمای بالا ۲۲۲
۱۱-۴-۱- شبکه‌های نابجایی ۲۲۳
۱۱-۴-۲- جهت‌دار شدن ۲۲۳

مراجع ۲۲۵

www.ketab.ir

لیست علائم و اختصارات

a	شعاع حفره
a_0	پارامتر شبکه
$A' - A'''$	ثوابت
A A_F A_{C-J} A_{APB} A_{SN} A_{CR}	پارامتر برهم‌کنش نابجایی- اتم حل شونده
A_{gb}	مساحت مرزدانه
A_{HD}	ثابت معادله هال‌پرچ-رورن
A_{PL}	ثوابت
A_v	ناحیه پیش‌بینی شده حفره
A_0–A_{12}	ثوابت
b	بردار برگرز
B	ثابت
c	غلظت تهی‌جاها
c^*	سرعت رشد ترک
c_j	غلظت جاگ‌ها
c_p	غلظت تهی جاها در نزدیکی یک جاگ
c_p^*	غلظت حالت پایدار تهی جا در نزدیکی یک جاگ
c_v	غلظت تعادلی تهی جا
c_v^D	غلظت تهی جا در نزدیکی یک گره یا نابجایی
c_0	طول اولیه ترک
C	غلظت اتم‌های حل شونده
C^*	انتگرال برای مکانیک شکست مواد پلاستیک وابسته به زمان
C_{1-2}	ثابت
C_{LM}	ثابت لارسون – میلر
CBED	پراش اشعه الکترونی همگرا

www.ketab.ir

CGBS	لغزش مرزدانه‌ای معمول
CS	لغزش کریستالوگرافی
CSL	مکان شبکه منطبق
C_0^*	ثابت
C_1-C_5	ثوابت
d	فاصله متوسط نابجایی‌هایی که یک مرزدانه فرعی را تشکیل می‌دهند
D	ضریب نفوذ کل
D_c	ضریب نفوذ برای صعود
D_{eff}	ضریب نفوذ مؤثر
D_g	ضریب نفوذ برای لغزش
D_{gb}	ضریب نفوذ در امتداد مرزدانه‌ها
D_i	نفوذ فصل مشترک
D_s	ضریب نفوذ سطحی
D_v	ضریب نفوذ برای تهی جاها
D_0	ثابت نفوذ
DRX	تبلور مجدد دینامیکی پیوسته
$\tilde{D}$	ضریب نفوذ برای اتم حل شونده
e	تفاوت اندازه حل شونده- حلال یا پارامتر عدم‌تطابق
E	مدول یانگ
E_j	انرژی تشکیل یک جاگاه
EBSP	الگوهای الکترون برگشتی
f	کسر
f_m	کسر نابجایی‌های متحرک
f_p	نیروی کششی شیمیایی وارد بر یک جاگاه
f_{sub}	کسر ماده‌ای که با دانه‌های فرعی اشغال شده‌است
F	نیروی کل در واحد طول وارد بر یک نابجایی
g	اندازه (قطر) متوسط دانه
g'	ثابت
G	مدول برشی
GBS	لغزش مرزدانه‌ای

www.ketab.ir

GDX	تبلور مجدد دینامیکی هندسی
GNB	مرزهای ضروری از نظر هندسی
h	ارتفاع دوقطبی
h_r	نرخ کارسختی
h_{ss}	جدایش متوسط بین صفحات لغزش درون یک دانه فرعی با نابجایی‌های در حال لغزش
HAB	مرز زاویه زیاد
HVEM	میکروسکوب الکترونی عبوری ولتاژ بالا
j	فاصله جاک
J	انتگرال J برای مکانیک شکست ماده پلاستیک
J_{tip}	شار تهی جا در امتداد یک مرزدانه
k	ثابت بولتزمن
$k0 - k^{***}$	ثوابت
k_y	ثابت هال- پچ
k_{MG}	ثابت مونکمن- گرانت
k_R	فاکتور رهایش
$k_1 - k_{10}$	ثوابت
K	ثابت
K_I	فاکتور شدت تنش
$K_0 - K_7$	ثوابت
ℓ	طول اتصال یا پیوند یک شبکه نابجایی فرانک
ℓ_c	طول اتصال یا پیوند بحرانی برای خم کردن یک نابجایی بین ذره
ℓ_m	طول اتصال یا پیوند بیشینه
l	مسافت مهاجرت برای یک نابجایی در خزش هارپر- دورن
L	مسافت جدایش ذره‌ای
LAB	مرز زاویه کم
LM	پارامتر لارسون- میلر
M	توان حساسیت به نرخ کرنش ($=1/N$)
m'	توان زمان خزش انتقالی
m''	توان نرخ کرنش در معادله مونکمن-گرانت
m_c	ثابت

www.ketab.ir

ε_0	کرنش لحظه‌ای
$\dot{\varepsilon}$	نرخ کرنش
$\dot{\varepsilon}_{min}$	نرخ کرنش حداقل
$\dot{\varepsilon}_{ss}$	نرخ کرنش تک محوره حالت پایدار
$\bar{\varepsilon}$	کرنش تک محوره مؤثر یا کرنش فون میزز
θ	زاویه عدم انطباق در عرض مرزدانه‌های زاویه زیاد
θ_λ	زاویه عدم انطباق در عرض مرزدانه‌های فرعی (زاویه کم)
$\theta_{\lambda ave}$	زاویه عدم انطباق متوسط در عرض مرزدانه‌های فرعی (زاویه کم)
λ	اندازه دانه فرعی متوسط
λ_s	فاصله حفرات
λ_{ss}	اندازه دانه فرعی متوسط در حالت پایدار
ν	ضریب پواسون
ρ	دانسیته نابجایی‌ها بدون در نظر گرفتن نابجایی‌های مرزدانه‌های فرعی
ρ_m	دانسیته نابجایی‌های متحرک
ρ_{ms}	دانسیته نابجایی‌های پیچی متحرک
ρ_{ss}	دانسیته نابجایی‌های حالت پایدار بدون در نظر گرفتن نابجایی‌های دیواره دانه فرعی
σ	تنش تک محوره اعمالی
σ_i	تنش داخلی
σ_0	استحکام تسلیم تک کریستال
σ'_0	استحکام تسلیم پلی‌کریستال آنیل شده
σ''_0	تنش سینتر شدن برای یک حفره
σ_p	تنش پیرلز
σ_{ss}	تنش حالت پایدار تک محوری
σ_T	تنش انتقال بین خزش قانون توانی پنج و هارپر- دورن
σ_{TH_s}	تنش آستانه برای تغییرشکل سوپرپلاستیک
$\sigma_{y\|T,\dot{\varepsilon}}$	تنش سیلان در یک دما و نرخ کرنش مرجع
$\bar{\sigma}$	تنش تک محوری مؤثر یا تنش فون میزز
τ	تنش برشی
τ_b	تنش فرار نابجایی‌ها از اتمسفر اتم حل شونده
τ_c	تنش بحرانی لازم برای صعود از یک ذره فاز ثانویه

www.ketab.ir

τ_d	تنش انفصال از ذره فاز ثانویه
τ_j	تنش برای حرکت نابجایی‌های پیچی با جاگ
τ_{or}	تنش کمانه کردن اوروان
τ_B	تنش برشی لازم برای خروج نابجایی از یک مرزدانه فرعی
τ_{BD}	تنش بیشینه از یک مرز کج ساده
τ_L	تنش برای حرکت نابجایی از طریق یک مرز ناشی از تولید جاگ
τ_N	استحکام برشی یک شبکه فرانک
$(\tau/G)_t$	تنش انتقال برماله شده
$\phi(P)$	تابع توزیع فرکانس شبکه فرانک
χ	انرژی نقص چیدن
χ'	ثابت خزش اولیه
Ψ	زاویه بین سطح حفره و سطح پیش بینی شده مرزدانه
ω_m	انرژی برهم کنش بیشینه بین یک اتم حل شونده و یک نابجایی لبه‌ای
Ω	حجم اتمی
ω	کسر سطح مرزدانه حفره‌زایی شده

www.ketab.ir