بسم الله الرحمن الرحیم

انتشارات
۴۲۶

رفتار مکانیکی مواد

ویرایش دوم- چاپ دهم

دکتر سید عبدالکریم سجادی
استاد دانشـــگاه فردوسی مشهد

press.um.ac.ir

سرشناسه: سجادی، عبدالکریم. ۱۳۴۱-
عنوان و نام پدیدآور: رفتار مکانیکی مواد [ویراست ۲]/ سیّد عبدالکریم سجادی؛ ویراستار علمی سیّد مجتبی زبرجد.
مشخصات نشر: مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۴.
مشخصات ظاهری: ۵۶۰ ص. مصوّر، جدول، نمودار.
فروست: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۴۲۶.
شابک: ISBN: 978-964-386-082-0
وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا.
یادداشت: کتابنامه، نمایه.
موضوع: مواد -- خواص مکانیکی.
موضوع: Materials -- Mechanical properties
شناسه افزوده: زبرجد، سیّد مجتبی، ۱۳۴۹- ، ویراستار.
شناسه افزوده: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.
رده‌بندی کنگره: TA ۴۰۵
رده‌بندی دیویی: ۶۲۰/۱۱۲۹۲
شماره کتابشناسی ملی: ۵۹۹۰۲۵۲

انتشارات
۴۲۶

رفتار مکانیکی مواد (ویرایش دوم)

پدیدآورنده: دکتر سیّد عبدالکریم سجادی
ویراستار علمی: دکتر سیّد مجتبی زبرجد
مشخصات: وزیری، ۵۰۰ نسخه، چاپ دهم، زمستان ۱۴۰۰ (اوّل، ۱۳۸۴)
چاپ و صحافی: چاپخانهٔ دقت
بها : ۱/۳۰۰/۰۰۰ ریال
حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.

مراکز پخش:

فروشگاه و نمایشگاه کتاب پردیس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، جنب سلف یاس
تلفن: ۳۸۸۰۲۶۶۶- ۳۸۸۳۳۷۲۷ (۰۵۱)

مؤسّسهٔ کتابیران: تهران، خیابان کارگر جنوبی، خیابان لبافی‌نژاد، بین خیابان فروردین و اردیبهشت، شمارهٔ ۲۳۸، تلفن: ۶۶۴۹۴۴۰۹-۶۶۴۸۴۷۱۵ (۰۲۱)

مؤسّسهٔ دانشیران: تهران، خیابان انقلاب، خیابان منیری جاوید (اردیبهشت) نبش خیابان نظری، شمارهٔ ۱۴۲
تلفکس: ۶۶۴۰۰۲۲۰ – ۶۶۴۰۰۱۴۴ (۰۲۱)

http://press.um.ac.ir Email: press@um.ac.ir

press.um.ac.ir

تقدیم به:

پدر و مادر؛

همسر و فرزندانم سینا و پویا؛

و همه‌ی متالورژها

press.um.ac.ir

press.um.ac.ir

فهرست مطالب

پیش گفتار ویراست دوم ۱۱

پیش گفتار ویراست اول ۱۳

فصل ۱ – تنش و کرنش ۱۵

۱-۱) مفهوم تنش ۱۵

۱-۲) تنش در یک نقطه ۱۶

۱-۳) حالت‌های تنش در شرایط دو بُعدی (تنش‌صفحه‌ای) ۱۸

۱-۴) دایره مور تنش دو بُعدی ۲۲

۱-۵) دایره مور تنش سه‌بُعدی ۲۳

۱-۶) مفهوم کرنش ۲۴

۱-۷) رابطه تنش و کرنش الاستیکی ۲۷

مسائل ۲۹

فصل ۲ – آزمایش‌های مکانیکی ۳۱

۲-۱) آزمایش کشش ۳۱

۲-۱-۱) منحنی تنش-کرنش مهندسی ۳۱

۲-۱-۲) منحنی تنش – کرنش حقیقی ۳۳

۲-۱-۳) رفتار مواد در برابر کشش ۳۶

۲-۱-۴) مشخصاتی که از آزمایش کشش به‌دست می‌آیند ۳۸

۲-۱-۴-۱) تنش تسلیم ۳۸

۲-۱-۴-۲) استحکام نهایی یا کششی ۳۹

۲-۱-۴-۳) انعطاف‌پذیری یا داکتیلیتی ۳۹

۲-۱-۴-۴) مدول الاستیسیته یا مدول یانگ ۴۰

۲-۱-۴-۵) قابلیت ارتجاعی ۴۴

۲-۱-۴-۶) چقرمگی ۴۵

۲-۱-۵) انواع منحنی‌های تنش – کرنش ۴۶

۲-۱-۵-۱) نوع ۱: تنش – کرنش الاستیکی ۴۶

۲-۱-۵-۲) نوع ۲- الاستیک – پلاستیکی یکنواخت ۵۰

۲-۱-۵-۳) نوع ۳ - الاستیک – پلاستیکی غیریکنواخت ۵۹

۲-۱-۵-۴) نوع ۴ - الاستیک – پلاستیکی غیریکنواخت – پلاستیکی یکنواخت ۵۹

press.um.ac.ir

۲-۱-۵-۵) نوع ۵ - الاستیک – پلاستیکی غیریکنواخت – پلاستیکی یکنواخت ۶۱
۲-۱-۶) سوپرپلاستیسیته ۶۲
۲-۱-۷) تاثیر سرعت کرنش روی رفتار کشش ۶۴
۲-۱-۸) تاثیر دما روی رفتار کشش ۶۷
۲-۱-۹) تأثیر هم‌زمان دما و سرعت کرنش ۷۱
۲-۱-۱۰) غیریکنواختی خواص کششی یا ناهمسان‌گردی ۷۵
۲-۲) آزمایش کشش کرنش صفحه‌ای ۷۹
۲-۳) آزمایش فشار ۸۰
۲-۴) آزمایش فشار کرنش صفحه‌ای ۸۴
۲-۵) آزمایش خمش ۸۵
۲-۶) آزمایش پیچش ۸۶
۲-۷) آزمایش سختی ۹۰
۲-۷-۱) سختی برینل ۹۲
۲-۷-۲) سختی ویکرز ۹۳
۲-۷-۳) سختی راکول ۹۴
۲-۷-۴) آزمایش میکروسختی ۹۵
۲-۷-۵) تبدیل معیارهای مختلف تعیین سنجش سختی به همدیگر ۹۶
۲-۷-۶) رابطه بین سختی و استحکام نهایی ۹۹
مسائل ۱۰۰

فصل ۳ - عیوب کریستالی ۱۰۹

۳-۱) استحکام یک کریستال بدون نقص ۱۰۹
۳-۲) انواع عیوب ۱۱۲
۳-۲-۱) عیوب نقطه‌ای ۱۱۲
۳-۲-۱-۱) تهی جاها یا جاهای خالی اتمی ۱۱۲
۳-۲-۱-۲) عیوب نقطه‌ای بین‌نشینی و جانشینی ۱۱۶
۳-۲-۲) عیوب خطی ۱۱۷
۳-۲-۳) عیوب صفحه‌ای ۱۱۷
۳-۲-۴) عیوب حجمی ۱۱۸
مسائل ۱۱۹

فصل ۴ - نابجایی‌ها ۱۲۱

۴-۱) نابجایی و انواع آن ۱۲۱
۴-۲) آرایش‌های مختلف نابجایی ۱۲۷
۴-۳) بُردار برگرز ۱۲۸
۴-۴) صعود نابجایی‌های لبه‌ای ۱۳۳
۴-۵) لغزش متقاطع ۱۳۷
۴-۶) نابجایی در شبکه‌های کریستالی مختلف ۱۳۹

press.um.ac.ir

۴-۶-۱) نابجایی‌ها در شبکه fcc ۱۴۱
۴-۶-۱-۱) نابجایی‌های متحرک در شبکه fcc ۱۴۲
۴-۶-۱-۲) نابجایی‌های غیرمتحرک در شبکه fcc ۱۵۰
۴-۶-۱-۳) نقص‌چیدن‌های ذاتی و غیرذاتی در فلزات fcc ۱۵۳
۴-۶-۱-۴) لغزش متقاطع یک نابجایی بازشده و نقص‌چیدن بین آنها ۱۵۵
۴-۶-۲) نابجایی‌ها در شبکه bcc ۱۵۶
۴-۶-۳) نابجایی‌ها در شبکه hcp ۱۵۸
۴-۷) مشاهده نابجایی‌ها ۱۵۸
۴-۷-۱) روش‌های شیمیایی ۱۵۸
۴-۷-۱-۱) اچ کردن سطح پولیش‌شده نمونه ۱۵۹
۴-۷-۱-۲) تشکیل رسوب در امتداد خطوط نابجایی (دکوراسیون نابجایی) ۱۵۹
۴-۷-۲) روش‌های فیزیکی ۱۶۰
۴-۷-۲-۱) استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری ۱۶۰
۴-۷-۲-۲) استفاده از تفرق اشعه ایکس ۱۶۰
۴-۷-۲-۳) تابش یون ۱۶۱
مسائل ۱۶۲

فصل ۵ - خصوصیات الاستیکی نابجایی‌ها ۱۶۵

۵-۱) برخورد نابجایی‌ها ۱۶۵
۵-۱-۱) برخورد دو نابجایی لبه‌ای با بردارهای برگرز عمود بر هم ۱۶۵
۵-۱-۲) برخورد دو نابجایی لبه‌ای با بردارهای برگرز موازی با هم ۱۶۷
۵-۱-۳) برخورد یک نابجایی پیچی و یک نابجایی لبه‌ای ۱۶۸
۵-۱-۴) برخورد دو نابجایی پیچی با همدیگر ۱۶۹
۵-۱-۵) برخورد یک نابجایی لبه‌ای با یک حلقه نابجایی ۱۷۳
۵-۲) میادین تنشی اطراف نابجایی‌ها ۱۷۴
۵-۲-۱) میدان تنشی اطراف یک نابجایی پیچی ۱۷۴
۵-۲-۲) میدان تنشی اطراف یک نابجایی لبه‌ای ۱۷۶
۵-۳) انرژی کرنشی نابجایی ۱۷۸
۵-۳-۱) انرژی کرنشی یک نابجایی پیچی ۱۷۸
۵-۳-۲) انرژی کرنشی یک نابجایی لبه‌ای ۱۸۰
۵-۴) نیرو روی یک نابجایی ۱۸۱
۵-۴-۱) نیرو روی یک نابجایی پیچی ۱۸۱
۵-۴-۲) نیرو روی یک نابجایی لبه‌ای ۱۸۲
۵-۴-۳) نیروی ناشی از صعود روی یک نابجایی لبه‌ای ۱۸۳
۵-۴-۴) نیروهای بین نابجایی‌ها ۱۸۴
۵-۴-۵) کشش خطی ۱۸۶
۵-۵) تکثیر نابجایی‌ها ۱۸۸
۵-۶) تجمع نابجایی‌ها پشت یک مانع ۱۹۰
مسائل ۱۹۲

press.um.ac.ir

فصل ۶ - مکانیزم‌های تغییرشکل پلاستیک ۱۹۷

۶-۱) لغزش ۱۹۷
۶-۲) تنش پیرلز - نابارو ۱۹۹
۶-۳) مؤلفه تنش برشی بحرانی ۲۰۲
۶-۴) سیستم‌های لغزشی در ساختارهای کریستالی ۲۰۷
۶-۴-۱) سیستم‌های لغزشی در مواد fcc ۲۰۸
۶-۴-۲) سیستم‌های لغزشی در مواد hcp ۲۰۹
۶-۴-۳) سیستم‌های لغزشی در مواد bcc ۲۱۰
۶-۵) تغییرشکل پلاستیک تک‌کریستال‌ها ۲۱۰
۶-۵-۱) منحنی تنش برشی – کرنش برشی تک‌کریستال‌ها ۲۱۲
۶-۵-۲) مکانیزم‌های کرنش‌سختی یا کارسختی تک‌کریستال‌ها ۲۱۴
۶-۶) تغییرشکل پلاستیک مواد پلی‌کریستال ۲۱۶
۶-۷) اثر بوشینگر ۲۱۸
۶-۸) تغییرشکل پلاستیک با دوقلویی شدن ۲۲۰
۶-۹) اختلاف بین لغزش و دوقلویی شدن ۲۲۳
۶-۱۰) حافظه‌داری و سوپرالاستیسیته ۲۲۴
مسائل ۲۲۸

فصل ۷ - مکانیزم‌های استحکام‌دهی ۲۳۳

۷-۱) مقاوم کردن در اثر ریز کردن اندازه دانه‌ها ۲۳۳
۷-۲) کرنش‌سختی یا کارسختی ۲۴۰
۷-۳) پیرکرنشی ۲۴۳
۷-۴) مقاوم کردن با تشکیل محلول جامد و عوامل مؤثر در آن ۲۴۶
۷-۴-۱) اختلاف اندازه اتم‌های حل‌شونده و حلال ۲۵۱
۷-۴-۲) ظرفیت نسبی اتم‌های حل شونده و حلال ۲۵۱
۷-۴-۳) اختلاف بین مدول برشی حلال و محلول ۲۵۲
۷-۴-۴) واکنش‌های الکتریکی ۲۵۲
۷-۴-۵) واکنش‌های شیمیایی (واکنش Suzuki) ۲۵۳
۷-۴-۶) واکنش‌های ساختاری (اثر Fisher) ۲۵۳
۷-۵) مقاوم کردن به وسیله ذرات ریز ۲۵۴
۷-۵-۱) رسوب‌سختی ۲۵۷
۷-۵-۲) عوامل مؤثر روی افزایش استحکام در اثر رسوب سختی ۲۵۸
۷-۵-۲-۱) سخت شدن در اثر وجود نظم ۲۵۹
۷-۵-۲-۲) سخت شدن در اثر عدم انطباق ثابت شبکه زمینه و ذره ۲۶۴
۷-۵-۳) پراکنده‌سختی ۲۶۷
۷-۵-۴) مکانیزم‌های عبور نابجایی‌ها از ذرات ۲۶۷
۷-۵-۴-۱) مکانیزم برشی ذرات توسط نابجایی‌ها ۲۶۷

press.um.ac.ir

۷-۵-۴-۲) مکانیزم‌های عبور از کنار ۲۶۹
۷-۵-۵) تأثیر درصد حجمی و اندازه رسوب روی خواص مکانیکی آلیاژها ۲۷۱
۷-۶) مقاوم کردن با افزودن الیاف ۲۷۴
۷-۷) افزایش استحکام با عملیات حرارتی سخت کردن ۲۷۷
مسائل ۲۸۵

فصل ۸ - شکست ۲۸۹

۸-۱) شکست و انواع آن ۲۸۹
۸-۲) جنبه‌های ماکروسکوپی شکست ۲۹۳
۸-۲-۱) استحکام پیوستگی تئوری فلزات ۲۹۳
۸-۲-۲) ضریب تمرکز تنش ۲۹۶
۸-۲-۳) تئوری شکست ترد گریفیث ۳۰۳
۸-۲-۴) نظریه اوروان ۳۰۹
۸-۲-۵) نرخ کاهش انرژی و چقرمگی شکست ۳۱۰
۸-۲-۶) مکانیک شکست یا تحلیل تنشی تَرَک ۳۱۷
مسائل ۳۲۴

فصل ۹ - چقرمگی شکست ۳۲۷

۹-۱) چقرمگی شکست و طراحی ۳۲۷
۹-۲) تخمین اندازه منطقه پلاستیکی نوک تَرَک ۳۳۲
۹-۳) تغییرات چقرمگی شکست KC با ضخامت نمونه ۳۳۵
۹-۴) مقاوم شدن و ضعیف شدن در اثر شیار ۳۳۸
مسائل ۳۴۱

فصل ۱۰ - دمای انتقال نرمی - تردی ۳۴۷

۱۰-۱) روش‌های تعیین دمای انتقال از شکست نرم به ترد ۳۴۷
۱۰-۱-۱) آزمایش ضربه نمونه شیاردار ۳۴۷
۱۰-۱-۱-۱) انرژی جذب شده توسط نمونه در هنگام شکست ۳۵۰
۱۰-۱-۱-۲) درصد شکست ترد یا نرم از طریق بررسی سطح شکست ۳۵۰
۱۰-۱-۱-۳) انعطاف‌پذیری یا داکتیلیتی ۳۵۰
۱۰-۲) اهمیت منحنی دمای انتقال ۳۵۳
۱۰-۳) عوامل متالورژیکی مؤثر روی دمای انتقال ۳۵۵
۱۰-۳-۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ ۳۵۵
۱۰-۳-۲) اندازه دانه ۳۵۸
۱۰-۳-۳) تغییر ریزساختار در اثر عملیات حرارتی و مکانیکی ۳۶۱
۱۰-۴) محدودیت‌های آزمایش ضربه چارپی در تعیین دمای انتقال ۳۶۱
۱۰-۵) انواع دیگر روش‌های تعیین دمای انتقال ۳۶۳
۱۰-۵-۱) آزمایش شروع تَرَک به طریقه انفجاری ۳۶۳

press.um.ac.ir

۱۰-۵-۲) آزمایش انداختن وزنه DWTT ۳۶۴
۱۰-۵-۳) آزمایش پارگی دینامیکی DT ۳۶۵
۱۰-۵-۴) آزمایش توقف تَرَک CAT ۳۶۶
مسائل ۳۶۷

فصل ۱۱ - ایجاد ساختار لایه‌ای به منظور افزایش چقرمگی شکست ۳۶۹

۱۱-۱) توقف تَرَک ۳۶۹
۱۱-۲) توزیع تَرَک ۳۷۴
۱۱-۳) کم کردن عرض نمونه ۳۷۵
۱۱-۴) تأثیر ریزساختار روی چقرمگی شکست ۳۷۶
۱۱-۵) ریزکردن ریزساختار ۳۸۲
مسائل ۳۸۷

فصل ۱۲ - جنبه‌های متالوگرافی و ریزساختاری شکست ۳۸۹

۱۲-۱) مراحل تشکیل تَرَک ۳۸۹
۱۲-۱-۱) مراحل تشکیل تَرَک در مواد ترد ۳۹۰
۱۲-۱-۱-۱) تشکیل تَرَک در اثر برخورد نابجایی‌ها با موانع ۳۹۱
۱۲-۱-۱-۲) تشکیل تَرَک در شکست کلیواژ ۳۹۴
۱۲-۱-۲) مراحل تشکیل تَرَک در شکست شبه کلیواژ ۳۹۷
۱۲-۱-۳) مراحل تشکیل تَرَک در شکست نرم ۳۹۷
۱۲-۲) شکست مرزدانه‌ای ۴۰۱
۱۲-۳) بررسی سطوح شکست ۴۰۱
مسائل ۴۰۲

فصل ۱۳ - تردی متالورژی ۴۰۳

۱۳-۱) تردی آبی ۴۰۳
۱۳-۲) تردی در محدوده ۲۵۰-۳۵۰°C ۴۰۴
۱۳-۳) تردی ناشی از بازپخت یا تمپر کردن ۴۰۵
۱۳-۴) تردی ناشی از تابش اشعه نوترونی ۴۰۶
۱۳-۵) تردی هیدروژنی ۴۰۸
مسائل ۴۱۰

فصل ۱۴ - خستگی ۴۱۱

۱۴-۱) مشخصات شکست خستگی ۴۱۱
۱۴-۲) سیکل‌های تنشی ۴۱۴
۱۴-۳) منحنی S - N یا منحنی Wohler ۴۱۵
۱۴-۴) عوامل مؤثر روی عمر یا استحکام خستگی ۴۱۷
۱۴-۴-۱) تنش متوسط ۴۱۷

press.uma.ac.ir

۱۴-۴-۲) تمرکز تنش و اندازه نمونه ۴۲۲
۱۴-۴-۳) خواص ماده ۴۲۳
۱۴-۴-۳) عملیات سطحی ۴۳۰
۱۴-۵) منحنی تنش – کرنش سیکلی یا منحنی هیستریزیس ۴۳۴
۱۴-۶) رفتار وابسته به سیکل ماده ۴۳۶
۱۴-۷) منحنی‌های کرنش – عمر ۴۳۹
۱۴-۷-۱) خستگی سیکل کم ۴۳۹
۱۴-۷-۲) خستگی سیکل زیاد ۴۴۱
۱۴-۷-۳) منطبق کردن منحنی‌های کرنش - عمر ۴۴۲
۱۴-۸) جنبه‌های ریزساختاری خستگی ۴۴۴
۱۴-۸-۱) جوانه‌زنی تَرَک خستگی ۴۴۶
۱۴-۸-۲) پیشرفت تَرَک خستگی ۴۵۰
۱۴-۸-۳) مکانیک رشد تَرَک خستگی ۴۵۴
۱۴-۹) خستگی خوردگی ۴۵۸
۱۴-۱۰) تأثیر دما روی خستگی ۴۶۱
۱۴-۱۱) خستگی حرارتی ۴۶۴
۱۴-۱۲) راه‌های بهبود مقاومت خستگی ۴۶۴
مسائل ۴۶۶

فصل ۱۵ - خزش ۴۷۱

۱۵-۱) عوامل مؤثر بر کاهش استحکام ناشی از افزایش دما ۴۷۱
۱۵-۲) برخی مشخصات آزمایش خزش ۴۷۲
۱۵-۳) آزمایش تنش – گسیختگی ۴۷۵
۱۵-۴) تغییرات سرعت خزش ۴۷۶
۱۵-۵) مکانیزم‌های تغییرشکل ۴۷۶
۱۵-۵-۱) تغییرشکل در تنش برشی تئوری ۴۷۶
۱۵-۵-۲) لغزش و دوقلویی شدن ۴۷۶
۱۵-۵-۳) خزش ناشی از نفوذ ۴۷۸
۱۵-۵-۴) لغزش مرزدانه‌ای ۴۷۹
۱۵-۵-۵) مهاجرت مرزدانه ۴۸۲
۱۵-۵-۶) خزش نابجایی ۴۸۳
۱۵-۶) مکانیزم‌های مستقل و متوالی ۴۸۵
۱۵-۷) تغییر مکانیزم در خزش ۴۸۹
۱۵-۷-۱) روش تعیین n برای مکانیزم‌های مختلف ۴۹۰
۱۵-۷-۲) روش تعیین انرژی محرکه برای مکانیزم‌های مختلف ۴۹۱
۱۵-۸) نقشه مکانیزم‌های تغییرشکل خزشی ۴۹۳
۱۵-۹) شکست در دماهای بالا ۴۹۳

press.um.ac.ir

۱۵-۱۰) تَرَک‌ها و حفره‌های مرزدانه‌ای ۴۹۵
۱۵-۱۱) تأثیر چند پارامتر متالورژیکی روی خزش ۵۰۰
۱۵-۱۱-۱) اندازه دانه ۵۰۰
۱۵-۱۱-۲) ترکیب شیمیایی ۵۰۱
۱۵-۱۱-۳) روش ذوب ۵۰۱
۱۵-۱۱-۴) کار مکانیکی ۵۰۱
۱۵-۱۲) ارائه نتایج خزش ۵۰۲
۱۵-۱۲-۱) رسم منحنی لگاریتم تنش - لگاریتم سرعت خزش مرحله II ۵۰۲
۱۵-۱۲-۲) رسم منحنی تنش - لگاریتم زمان رسیدن به یک کرنش مشخص ۵۰۳
۱۵-۱۲-۳) رسم منحنی لگاریتم تنش - لگاریتم زمان شکست ۵۰۳
۱۵-۱۲-۴) رسم منحنی لگاریتم سرعت خزش مرحله II - لگاریتم زمان شکست ۵۰۳
۱۵-۱۲-۵) رسم منحنی لارسون – میلر (Larson – Miller) ۵۰۴
مسائل ۵۰۶

فصل ۱۶ – مواد مقاوم در برابر گرما ۵۱۱

۱۶-۱) آلیاژهای دمای بالا ۵۱۱
۱۶-۱-۱) ترکیب شیمیایی ۵۱۲
۱۶-۱-۲) مشخصه‌های متالورژیکی ۵۱۵
۱۶-۱-۲-۱) فاز زمینه γ ۵۱۶
۱۶-۱-۲-۲) فاز رسوبی ´γ ۵۱۷
۱۶-۱-۲-۳) یوتکتیک ´γ/γ ۵۱۹
۱۶-۱-۲-۴) کاربیدها ۵۱۹
۱۶-۱-۲-۵) بُریدها ۵۲۲
۱۶-۱-۲-۶) فازهای مضر TCP ۵۲۲
۱۶-۱-۲-۷) ´γ مرزدانه‌ای ۵۲۶

پیوست (الف): واحدها در سیستم متریک و تبدیل آنها ۵۲۹
پیوست (ب): ترکیب شیمیایی برخی مواد مهندسی ۵۳۱
پیوست (ج): خواص کششی برخی از مواد مهندسی ۵۳۲
پیوست (د): تبدیل واحدهای سختی به همدیگر ۵۳۸
پیوست (ه): چقرمگی شکست برخی از مواد مهندسی ۵۴۰
پیوست (و): تبدیل اندازه دانه به عدد ASTM ۵۴۱
پیوست (ز): خواص فیزیکی برخی از مواد مهندسی ۵۴۲
مراجع ۵۴۵
واژه‌یاب ۵۵۱

press.um.ac.ir

پیشگفتار ویرایش دوم

رفتار مکانیکی مواد شامل موضوعات گسترده‌ای از جمله: مفاهیم تنش و کرنش، آزمایش‌های مکانیکی برای تعیین خواص مواد، الاستیسیته، پلاستیسیته، عیوب شبکه‌ای نظیر جاهای خالی اتمی، نابجایی‌ها، مرزدانه‌ها، مرزهای دوقلویی و غیره، مکانیزم‌های استحکام‌دهی، مکانیزم‌های تغییرشکل، مکانیزم‌های شکست، انواع شکست، تأثیر عوامل مختلف روی نوع و استحکام شکست، و مانند آنها می‌باشد. دو واکنش عمده مواد به نیروهای خارجی، تغییرشکل و شکست می‌باشد. تغییرشکل می‌تواند الاستیک، ویسکوالاستیک (تغییرشکل الاستیک وابسته به زمان)، پلاستیک، یا خزش (تغییرشکل پلاستیک وابسته به زمان) باشد. شکست نیز ممکن است به صورت ناگهانی اتفاق بیفتد یا پس از اعمال بار نوسانی (خستگی). برای اغلب مواد، شکست وابسته به زمان است. هم تغییرشکل و هم شکست به عیوب، دما، و سرعت بارگذاری حساس هستند.

شناخت این مشخصات و ویژگی‌ها نیاز به دانستنی‌های اساسی از استحکام مواد و علم مواد دارد. فرض بر این است که خوانندگان این کتاب، مفاهیم اولیه تنش و کرنش، مقاومت مصالح و استاتیک را بدانند و آشنایی با علم مواد از جمله مفاهیم کریستالوگرافی، مشخصات محلول‌های جامد، نفوذ و استحاله‌های فازی داشته باشند.

قطعات مهندسی معمولاً تحت بارگذاری مکانیکی قرار دارند. از این رو، آشنایی با رفتار و خواص مکانیکی مواد برای دانشجویان مهندسی مواد و متالورژی و مکانیک و نیز مهندسینی که روی طراحی مواد کار می‌کنند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از نوشتن این کتاب، آشنا کردن خوانندگان با خواص مکانیکی مواد می‌باشد. به این منظور، مطالب این کتاب به نحوی تدوین شده است که اصول و مکانیزم‌های مورد نظر را به بهترین شکل و به سادگی و صراحت مطرح نماید. با وجودی که این کتاب به صورت عمقی مطالب را بیان

press.iran.ac.ir

می کند و نه فقط معرفی و مقدماتی، ولی در عین حال به صورتی ساده نگاشته شده است. به‌این دلیل از تصاویر، نمودارها و جدول‌های متعددی استفاده شده است تا تجسم و درک مفاهیم را راحت‌تر نماید.

اگرچه به علت استقبال خوانندگان عزیز در نُه سال گذشته، این کتاب پنج بار تجدید چاپ شد ولی زمان آن فرا رسید تا مطالب آن مورد بازنگری قرار گیرد. در این بازنگری، ایرادات و اشکالات جزیی کتاب برطرف و سعی شد با افزودن مطالب جدیدی به آن محتوای کتاب به‌روز شود. این تغییرات در قالب ویرایش دوم کتاب صورت پذیرفت.

در پایان، ضمن تشکر از عزیزانی که با ارائه نظرات و پیشنهادات خود، این‌جانب را در اعمال بازنگری و تهیه ویرایش دوم یاری دادند، امیدوارم همچون گذشته این کتاب مورد توجه و استفاده دانشجویان و مهندسین قرار گیرد.

سید عبدالکریم سجادی
دانشگاه فردوسی مشهد
تابستان ۱۳۹۳

press.um.ac.ir

پیشگفتار ویراست اول

واکنش مواد در برابر اعمال نیرو یا تنش را رفتار مکانیکی یا خواص مکانیکی مواد می‌گویند. منشاء اعمال نیرو یا تنش ممکن است مکانیکی یا حرارتی باشد. از طرفی نحوه اعمال آنها نیز می‌تواند متفاوت باشد به عنوان مثال، آنها می‌توانند حالت استاتیکی یا دینامیکی و نوسانی داشته باشند. همچنین جهت اعمال آنها نیز ممکن است کششی، فشاری، پیچشی، خمشی و یا ترکیبی از آنها باشد. از طرف دیگر، این نیروها می‌توانند در شرایط محیطی مختلفی اعمال شوند. مواد در برابر هر کدام از این نیروها به طریق خاصی پاسخ می‌دهند که شناخت آنها اهمیت زیادی در طراحی، انتخاب و ساخت قطعات دارد.

رفتار مکانیکی مواد متاثر از ریزساختار آنها می‌باشد بنابراین، برای شناخت دقیق رفتار مواد در برابر نیروها و تنش‌های خارجی و یا داخلی لازم است که جنبه‌های ریزساختاری و متالورژی آنها مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. به همین دلیل در فصل‌های مختلف کتاب، رفتار مکانیکی مواد با توجه به خصوصیات و مشخصات ریزساختاری آنها توضیح داده شده است.

این کتاب بر اساس عناوینی که از طرف وزارت آموزش، تحقیقات و فناوری برای دروس خواص مکانیکی مواد ۱ و ۲ رشته مهندسی متالورژی و مواد گرایش متالورژی صنعتی ارائه گردیده تنظیم و تدوین شده است. این مجموعه بر آن است تا مفاهیم مرتبط با این موضوعات را به شکلی ساده و روان به خوانندگان منتقل نماید. منابع مورد استفاده در تهیه این کتاب، مراجع معتبر داخلی و خارجی و نتایج تحقیقات و پژوهش‌های متعدد نویسنده می‌باشد. از این روی، دانشجویان دوره‌های کاردانی، کارشناسی و تحصیلات تکمیلی رشته مهندسی متالورژی می‌توانند از این کتاب بهره‌ها گیرند. همچنین مطالعه این کتاب به محققین واحدهای تحقیق و توسعه شرکت‌ها و مراکز تحقیقاتی توصیه می‌گردد.

کتاب حاضر مشتمل بر شانزده فصل است که با بیان مفهوم تنش و کرنش آغاز می‌شود و

press.iran.ac.ir

سپس به روش‌های انجام آزمایش‌های مکانیکی می‌پردازد. در ادامه، عیوب کریستالی، تئوری نابجائی‌ها، انواع آنها، واکنش‌ها و برخوردهای بین آنها، میادین نیرو، تنش و انرژی و نقش آنها در تغییرفرم پلاستیکی نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. مکانیزم‌های استحکام‌دهی مواد مانند: تشکیل محلول جامد، ریز کردن دانه، تشکیل فازهای ثانویه و رسوب سختی، تشکیل ماده مرکب یا کمپوزیت و انجام عملیات حرارتی و استحاله فازی از جمله موضوعات دیگر این کتاب است. مفهوم شکست، علل و انواع و تئوری‌های شکست و روش‌های تعیین مقاومت به شکست ماده (چقرمگی) نیز در این کتاب به تفصیل مورد مطالعه قرار می‌گیرد. رفتار مکانیکی مواد در بارگذاری نوسانی (خستگی) از جمله عناوین مطرح شده در این کتاب می‌باشد. در نهایت، کتاب با شرح خزش و مکانیزم‌های مختلف آن و مواد مقاوم در دماهای بالا به پایان می‌رسد.

بدیهی است نخستین کسی که می‌باید با کمال خضوع و از اعماق جان از او تشکر کرد خداوند عالم و قادر است که توانایی ویرایش این کتاب را به این‌جانب عطا فرمود. از الطاف بی‌پایان و بی‌شمار او که همه مخلوقات را فرا گرفته است شاکرم. از همسر و فرزندانم که صبورانه دشواری‌های زمان تالیف و تدوین این کتاب را تحمل نمودند سپاسگزارم. در تهیه این کتاب از نظریات و پیشنهادهای اساتید محترم گروه مهندسی متالورژی و مواد دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شده است که به این وسیله از همه آنها تشکر و قدردانی می‌کنم. از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه جناب آقای دکتر رحیمی زاده و همکاران ایشان که امکان چاپ و نشر این کتاب را فراهم نمودند نیز تشکر می‌نمایم. همچنین از تلاش‌های زایدالوصف سرکار خانم زهرا قریشی که زحمت تایپ متون کتاب را متقبل شدند تشکر می‌کنم.

سید عبدالکریم سجادی
دانشگاه فردوسی مشهد
بهار ۱۳۸۴

press.um.ac.ir

فصل ۱

تنش[1] و کرنش[2]

تنش و کرنش دو مفهوم مکانیکی هستند که در قطعاتی که تحت تاثیر نیروهای داخلی و یا خارجی قرار دارند به‌وجود می‌آیند. آنها می‌توانند ماهیت الاستیکی و یا پلاستیکی داشته باشند. دانستن این مفاهیم از جنبه‌های مختلف متالورژی مکانیکی اهمیت دارد. در حالت الاستیک و یا پلاستیک روابط مختلفی بین آنها برقرار است. در این فصل ضمن آشنایی با مفاهیم آنها، روابط ریاضی برای محاسبه مقادیر آنها ارائه می‌شود. علاوه بر روابط ریاضی، از دایره مور نیز می‌توان با داشتن مؤلفه‌های تنشی در جهت‌های مختلف در یک نقطه، مؤلفه‌های اصلی آنها را محاسبه نمود. همچنین، روابط بین آن دو در حالت الاستیک نیز در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۱) مفهوم تنش

اگر میله‌ای با سطح مقطع A تحت نیروی کششی P قرار گیرد و برشی از این جسم در نظر گرفته شود، در آن نیروی مقاومت داخلی برابر با $\int \sigma dA$ به‌وجود می‌آید که با نیروی خارجی P. مقابله می‌کند. شکل ۱-۱ تصویر جسم آزاد میله را نشان می‌دهد. بنابراین:

$$P = \int \sigma dA \qquad (۱-۱)$$

که در آن σ تنش محوری یا عمود به صفحه می‌باشد و A نیز سطح مقطع میله است. اگر توزیع تنش روی سطح مقطع یکنواخت باشد خواهیم داشت:

$$P = \sigma \int dA = \sigma A \rightarrow \sigma = P / A \qquad (۲-۱)$$

1- Stress
2- Strain

press.iran.ac.ir

ولی معمولاً تنش روی سطح مقطع به‌طور یکنواخت توزیع نمی‌شود و بنابراین تنش در رابطه بالا به‌صورت متوسط تنش می‌باشد. عواملی چون وجود ناهمسانگردی[1] بین‌دانه‌ها در آلیاژهای چند بلوره (پلی کریستال)[2]، حضور فازهای مختلف در آلیاژ و نحوه‌ی بارگذاری (مثلاً اگر نیروی اعمالی درست در مرکز نمونه نباشد) باعث غیریکنواختی تنش روی سطح مقطع می‌شوند.

شکل ۱-۱: تصویر جسم آزاد میله تحت نیروی خارجی P.

تنش به دو طریق محاسبه می گردد: مهندسی و حقیقی. تنش مهندسی را با s نشان می‌دهند که برابر است با نسبت نیرو به سطح مقطع اولیه. در مقابل، تنش حقیقی برابر است با نسبت نیرو به سطح مقطع لحظه‌ای که آن را با σ نشان می‌دهند. از طرفی تنش ممکن است عمودی[3] یا برشی[4] باشد. تنش عمودی در امتداد عمود به سطح مقطع یا صفحه مورد نظر اعمال می‌شود و تنش برشی در صفحه مورد نظر یا سطح مقطع اعمال می گردد که آن را با τ نشان می‌دهند.

واحد تنش در سیستم بین المللی SI ، نیوتن بر مترمربع (N/m^2) است که به نام پاسکال (Pa) معروف می‌باشد و واحد بزرگتر $N/mm^2 = MN/m^2$ که برابر با 10^6Pa است و آن را با MPa نشان می‌دهند. واحد دیگری نیز برای تنش استفاده می‌شود که همان پوند بر اینچ مربع (lb/in^2) می‌باشد که با psi نشان می‌دهند یا ۱۰۰۰ lb/in^2 که با ksi مشخص می کنند. بین دو واحد تنش MPa و psi رابطه زیر برقرار است:

$$۱ \text{ MPa} = ۱۴۵ \text{ psi}$$

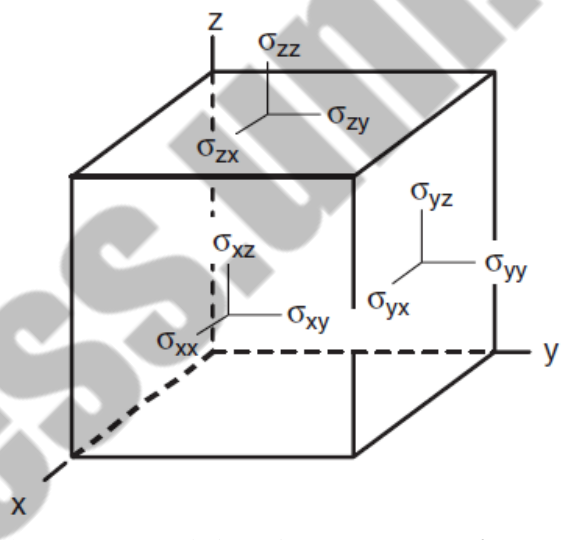
۱-۲) تنش در یک نقطه

تنش‌ها در یک نقطه به‌صورت مؤلفه‌های عمودی و برشی وجود دارند. شکل ۱-۲ [۱] این

1 - Anisotropy
2 - Polycrystal
3- Normal or Axial Stress
4- Shear Stress

press.um.ac.ir

تنش‌ها را روی وجوه یک مکعب با ابعاد واحد نشان می‌دهد. σ_{xx} یا σ_x تنش عمودی در صفحه x و در جهت x می‌باشد. چون این تنش در صفحه‌ای عمود به جهت x اعمال می‌شود پس عمودی است. طبق قرارداد، مقادیر تنش‌های عمودی بزرگتر از صفر از نوع کششی و کمتر از صفر، فشاری می‌باشند. برای تنش‌های برشی از دو اندیس استفاده می‌شود. اندیس اول صفحه‌ای را مشخص می‌کند که تنش در آن اعمال می‌شود و اندیس دوم جهت اعمال تنش را تعیین می‌نماید. چون یک صفحه معمولاً با عمودش مشخص می‌شود بنابراین اولین اندیس نشان‌دهنده این عمود می‌باشد. برای مثال، τ_{yz} تنش برشی روی صفحه عمود به محور y و در جهت z می‌باشد. همچنین، تنش برشی τ_{yx} روی صفحه عمود به محور y و در جهت x قرار دارد. یک تنش برشی وقتی مثبت است که در جهت مثبت روی صفحه مثبت مکعب واحد اعمال شود و یا در جهت منفی روی صفحه منفی مکعب اعمال شود. بنابراین تمام تنش‌های برشی نشان داده شده در شکل ۱-۳ (الف) مثبت و تنش‌های برشی نشان داده شده در شکل ۱-۳ (ب) منفی هستند[۱] .



شکل ۱-۲: مؤلفه‌های عمودی و برشی تنش اعمالی روی یک نقطه[۱].

با توجه به شکل ۱-۲، با وجود سه تنش در هر صفحه مکعب جمعاً ۱۸ مؤلفه‌ی تنش در هر نقطه اعمال می‌شود. اما چون صفحات دو به دو متناظر هستند بنابراین فقط سه صفحه از آنها در نظر گرفته می‌شود یا به‌عبارتی ۹ مؤلفه‌ی تنشی وجود دارد که عبارتند از: σ_x، σ_y، σ_z، τ_{xy}، τ_{xz}، τ_{yx}، τ_{yz}، τ_{zx} و τ_{zy}.

اگر فرض شود که مساحت سطوح مکعب به اندازه‌ای کوچک باشد که تغییر تنش روی آن

press.um.ac.ir

صفحات ناچیز باشد با محاسبه لنگر حاصل از نیروهای اعمالی نسبت به محور z مشاهده می‌شود:

$$(\tau_{xy}\,\Delta y\Delta z)\,\Delta x = (\tau_{yx}\,\Delta x\Delta z)\,\Delta y \;\longrightarrow\longrightarrow\; \tau_{xy} = \tau_{yx} \qquad (۳-۱)$$

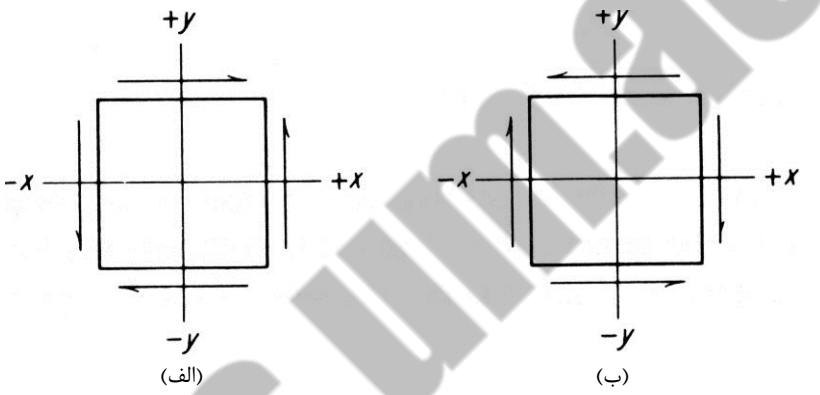
و یا با محاسبه لنگر نسبت به محور x مشاهده می‌شود:

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} \qquad (۴-۱)$$

و نیز با محاسبه لنگر نسبت به محور y مشاهده می‌شود:

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} \qquad (۵-۱)$$

بنابراین، حالت یا شرایط تنش[1] شش مؤلفه دارد: سه مؤلفه عمودی: σ_x، σ_y، σ_z و سه مؤلفه برشی: τ_{xy}، τ_{xz}، τ_{yz}.



شکل ۱-۳: الف) تنش‌های برشی مثبت، ب) تنش‌های برشی منفی[۱].

۱-۳) حالت‌های تنش در شرایط دو بُعدی (تنش‌صفحه‌ای)[2]

با در نظر گرفتن حالت دو بُعدی تنش خیلی از مسائل آسان می‌شود. چنین حالتی وقتی به‌وجود می‌آید که یک بُعد از قطعه نسبت به دو بُعد دیگر خیلی کوچک باشد، مانند ورقی که تنشی در جهت عمود به صفحه آن اعمال نشود. در این حالت سیستم تنشی شامل دو تنش عمودی σ_x و σ_y و یک تنش برشی τ_{xy} می‌باشد. شکل ۱-۴ [۱] یک ورق نازک که ضخامتش عمود به صفحه کاغذ می‌باشد را نشان می‌دهد. به منظور دانستن حالت تنش در نقطه O، لازم است که مؤلفه‌های تنش در آن نقطه برای هر سیستم مختصاتی که از آن نقطه می‌گذرد مشخص باشد. به این خاطر، یک صفحه‌ای مایل، که عمود به صفحه کاغذ باشد، در نظر گرفته می‌شود به‌طوری‌که عمود بر آن

1- State of Stress
2- Plane Stress

press.umaci.ir