شکل دهی فلزات

(ویرایش دوم)

www.ketab.ir

پدیدآورنده:

حسین تویسرکانی

عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی مواد

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشگاه صنعتی اصفهان
مرکز نشر

شماره کتاب ۶۳ گروه فنی و مهندسی ۳۴

شکل دهی فلزات

پدیدآورنده	حسین تویسرکانی
حروف‌چینی و صفحه آرایی	عفت صابری
طراح جلد	مرضیه خردمند
لیتوگرافی، چاپ و صحافی	چاپخانه دانشگاه صنعتی اصفهان
ناشر	مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان
چاپ و نوبت چاپ	پاییز ۱۳۹۴
شمارگان	۱۵۰۰ جلد
شابک	۹۷۸-۹۶۴-۸۴۷۶-۸۴-۲
قیمت	۱۶۲۰۰۰ ریال

سرشناسه	تویسرکانی، حسین، ۱۳۳۲ -
عنوان و نام پدیدآور	شکل‌دهی فلزات / تالیف حسین تویسرکانی.
وضعیت ویراست	ویراست ۲
مشخصات نشر	اصفهان : دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	یازده، ۴۶۱ ص.: مصور (رنگی)، جدول (رنگی)، نمودار (رنگی).
فروست	دانشگاه صنعتی اصفهان؛ ۶۳ گروه فنی و مهندسی؛ ۳۴.
شابک	978-964-8476-84-2
وضعیت فهرست نویسی	فیپا
یادداشت	ص.ع. به انگلیسی: Hossein Tuysserkani, Metal forming.
یادداشت	چاپ چهارم.
یادداشت	ویراست قبلی کتاب حاضر با عنوان "شکل‌دادن فلزات" توسط همین ناشر در سال ۱۳۸۱ منتشر شده است.
یادداشت	واژه‌نامه.
یادداشت	کتابنامه: ص. ۴۴۷.
یادداشت	نمایه.
عنوان دیگر	شکل دادن فلزات.
موضوع	فلزکاری
شناسه افزوده	دانشگاه صنعتی اصفهان. مرکز نشر
رده بندی کنگره	۱۳۹۲ ۸ش۹ت/TS۲۰۵
رده بندی دیویی	۶۷۱/۳
شماره کتابشناسی ملی	۳۳۷۱۵۲۶

حق چاپ برای مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان محفوظ است.

اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان ـ مرکز نشر ـ کدپستی ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱. تلفن: ۱۰-۳۳۹۱۲۵۰۹(۰۳۱) دورنگار: ۳۳۹۱۲۵۵۲ (۰۳۱)
برای خرید اینترنتی کلیه کتاب‌های منتشره مرکز نشر می‌توانید به وبگاه http://publication.iut.ac.ir مراجعه و یا مستقیما از کتابفروشی مرکز نشر واقع در کتابخانه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان (تلفن ۳۳۹۱۳۹۵۲) خریداری فرمائید.

www.ketab.ir

به نام پروردگار هستی بخش

پیشگفتار (ویرایش دوم)

حمد و سپاس فراوان پروردگار جهان بیکران هستی را که توانایی و فرصت ویرایش دوم این کتاب را به اینجانب عنایت فرمود. در این ویرایش ماماگری ها و ویراستاری مجدد مثال ها و تمرین هایی به آن اضافه و تغییراتی در متن و شکل های آن داده شد. امید است که مورد استفاده دانشپژوهان قرار گیرد.

در اینجا باز لازم می دانم از آقای دکتر حمید نجارآذری، استادیار سابق دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان برای مطالعه متن اولیه این کتاب پیش از چاپ اول و پیشنهادات مفید ایشان و آقای دکتر علی کریمی طاهری، استاد دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی شریف و همچنین خانم آتوسا سعادتی برای ویراستاری پیش از چاپ اول و خانم عفت صابری برای زحمات تایپ و صفحه آرایی و آقای دکتر محمدرضا کوشش، رئیس مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان و همچنین تمامی پرسنل مرکز نشر و چاپخانه دانشگاه صنعتی اصفهان تشکر و قدردانی نمایم. همچنین باز از همسر و فرزندانم، که صبورانه مشکلات ناشی از صرف وقت طولانی مدت برای ویرایش دوم این کتاب و دو کتاب دیگرم را با تحمل فراوان پذیرفته و شرایط مناسب را برای اینجانب فراهم نمودند، سپاسگزاری نمایم.

حسین تویسرکانی
عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مواد
دانشگاه صنعتی اصفهان

www.ketab.ir

فهرست مطالب

پیشگفتار

مقدمه ۱

فصل اول: تعریف و اهداف شکل‌دهی ۳

فصل دوم: تنش و کرنش ۷

۲. ۱ تنش ۷

۲. ۲ تنسور تنش ۹

۲. ۳ تنش‌های اصلی ۱۰

۲. ۳. ۱ تنش‌های اصلی در حالت تنش دومحوری یا صفحه‌ای ۱۲

۲. ۳. ۲ تعیین تنش‌های اصلی و تنش‌های عمودی و برشی به کمک دایره مور ۱۳

۲. ۴ تغییرشکل نسبی یا کرنش ۱۶

۲. ۵ کرنش دوبعدی یا صفحه‌ای برای جابجایی‌های جزئی ۲۰

۲. ۶ تنسور کرنش برشی سه‌محوری ۲۲

مسائل ۲۴

فصل سوم: تغییرشکل پلاستیکی مواد شکل‌پذیر و معیارهای تسلیم ۲۷

۳. ۱ تغییرشکل پلاستیکی مواد شکل‌پذیر ۲۷

۳. ۲ معیارهای تسلیم یا شرایط سیلان ۳۰

۳. ۲. ۱ معیار ترسکا ۳۱

www.ketab.ir

۳. ۲. ۲ معیار فن میزز ۳۲
۳. ۲. ۳ حالت‌های خاص تنش و مقایسه معیار ترسکا و فن میزز در مورد آنها ۳۳
۳. ۲. ۴ تنش مؤثر ۳۸
۳. ۲. ۵ کرنش مؤثر ۳۹
۳. ۲. ۶ کرنش در محدوده الاستیکی و پلاستیکی ۳۹
مسائل ۴۵

فصل چهارم: تنش سیلان، نمودار تنش-کرنش و شکل‌پذیری ۴۷
۴. ۱ تنش سیلان ۴۷
۴. ۲ نمودار تنش سیلان یا تنش- تغییرطول نسبی (کرنش) ۴۸
۴. ۲. ۱ آزمایش کشش ۴۸
۴. ۲. ۱. ۲ آزمایش فشار ۵۳
۴. ۲. ۲. ۱ فشار تک‌محوری بر روی نمونهٔ استوانه‌ای‌شکل ۵۴
۴. ۲. ۲ آزمایش فشار با کرنش صفحه‌ای ۵۷
۴. ۲. ۳ آزمایش فوژداری یا کشش دو محوری متوازن ۵۹
۴. ۲. ۴ آزمایش پیچش ۶۰
۴. ۲. ۵ عوامل مؤثر بر نمودار تنش سیلان یا تنش-کرنش ۶۲
۴. ۲. ۵. ۱ تأثیر جنس و ریزساختار جسم ۶۲
۴. ۲. ۵. ۲ تأثیر دما ۶۳
۴. ۲. ۵. ۳ تأثیر آهنگ کرنش و دما ۶۵
۴. ۳ ناپایداری و تمرکز موضعی سیلان در تغییرشکل پلاستیکی ۷۰
۴. ۳. ۱ ناپایداری و تمرکز موضعی سیلان در کشش تک محوری ۷۰
۴. ۳. ۲ ناپایداری و تمرکز موضعی سیلان در آزمایش فشار تک‌محوری ۷۱
۴. ۳. ۳ ناپایداری و تمرکز موضعی سیلان در کشش دومحوری متوازن ۷۲
۴. ۳. ۴ ناپایداری در مخزن کروی‌شکل جدار نازک تحت فشار داخلی ۷۳
۴. ۳. ۵ مفهوم ناپایداری ۷۵
۴. ۴ تغییرشکل سرد و گرم ۷۶
۴. ۵ بازیابی و تبلور مجدد ۷۷
۴. ۵. ۱ بازیابی و تبلور مجدد استاتیکی ۷۸
۴. ۵. ۱. ۱ بازیابی استاتیکی ۷۹
۴. ۵. ۱. ۲ تبلور مجدد استاتیکی ۸۰
۴. ۵. ۱. ۳ رشد دانه و تبلور مجدد ثانویه ۸۱
۴. ۵. ۲ بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی ۸۲
۴. ۵. ۲. ۱ بازیابی دینامیکی ۸۲
۴. ۵. ۲. ۲ تبلور مجدد دینامیکی ۸۵
مسائل ۸۷

www.ketab.ir

فصل ۵: تعیین نیرو و کار یا انرژی لازم برای تغییرشکل ۹۱
۵. ۱ نیروی لازم برای تغییرشکل همگن ۹۱
۵. ۲ کار یا انرژی لازم برای تغییرشکل همگن (کار ایدآل) و ارزیابی نیرو به‌کمک رابطهٔ کار ۹۳
۵. ۳ وجود اصطکاک، کار اضافی و بازدهی کار یا انرژی مکانیکی ۹۷
۵. ۴ افزایش دما در فرایندهای شکل‌دهی ۹۸
۵. ۵ تعیین نیروی فشار در حالت کرنش صفحه‌ای با وجود اصطکاک کم ۹۹
۵. ۶ تعیین مقدار متوسط نیروی فشار در عملیات فشار با کرنش صفحه‌ای ۱۰۳
۵. ۷ تعیین نیروی فشار در حالت کرنش صفحه‌ای با شرایط اصطکاک زیاد ۱۰۴
۵. ۸ تعیین نیروی فشار لازم برای صفحه مسطح نازک مدور با اصطکاک کم ۱۰۷
مسائل ۱۱۱

فصل ششم: نورد ۱۱۱
۶. ۱ دستگاه‌های نورد ۱۱۱
۶. ۲ نام‌گذاری دستگاه‌های نورد ۱۱۷
۶. ۳ تقسیم‌بندی فرایند نورد ۱۱۷
۶. ۳. ۱ نورد گرم ۱۱۸
۶. ۳. ۲ نورد سرد ۱۱۸
۶. ۳. ۳ خط نورد گرم و سرد ۱۱۸
۶. ۴ تعیین نیروی لازم برای نورد ۱۲۰
۶. ۴. ۱ تعیین نیرو به کمک ارزیابی تنش‌های موضعی در جزء کوچکی از منطقه تغییرشکل ۱۲۴
۶. ۴. ۲ تعیین نیروی نورد با وجود نیروی اضافی ۱۳۲
۶. ۴. ۳ تعیین نیرو به روش اکلاند برای نورد سرد ۱۳۳
۶. ۴. ۴ روش سیمز ۱۳۴
۶. ۴. ۵ روش استفاده از روابط فشار تخت ۱۳۵
۶. ۴. ۶ روش استفاده از تغییرشکل همگن ۱۳۵
۶. ۵ محاسبه گشتاور و توان غلتک ۱۳۶
۶. ۵. ۱ گشتاور غلتک ۱۳۶
۶. ۵. ۲ توان غلتک ۱۳۷
۶. ۶ شرط کشیده‌شدن قطعه به داخل دهانه میان دو غلتک در فرایند نورد ۱۳۹
۶. ۷ حداکثر کاهش ضخامت ممکن در هر دفعه عبور ۱۳۹
۶. ۸ خمش غلتک‌ها و راه‌های مقابله با آن ۱۴۰
۶. ۹ نمودار تنظیم دهانه بین دو غلتک ۱۴۴
۶. ۱۰ نورد پروفیل‌ها (نورد کالیبر) ۱۴۸
۶. ۱۰. ۱ تعریف کالیبر ۱۴۹
۶. ۱۱ نورد مفتول ۱۵۱

www.ketab.ir

۶. ۱۲ نورد لوله ۱۵۲
۶. ۱۲. ۱ سوراخکاری یا سنبه‌کاری شمش‌ها ۱۵۳
۶. ۱۲. ۲ روش پیلگر ۱۵۴
۶. ۱۲. ۳ روش نورد با سنبه (توپی) ثابت ۱۵۶
۶. ۱۲. ۴ روش نورد با سنبه متحرک در قفسه‌های پیوسته ۱۵۷
۶. ۱۲. ۵ نورد به‌منظور تصحیح ابعاد ۱۵۷
۶. ۱۳ نورد عرضی ۱۵۸
۶. ۱۴ نورد مایل یا اریبی ۱۵۹
۶. ۱۵ نورد محوری- شعاعی ۱۶۰
۶. ۱۶ فرایند نورد ترمومکانیکی ۱۶۰
۶. ۱۷ نورد کنترل‌شده با تبلور مجدد ۱۶۱
۶. ۱۸ سرد کردن سریع از دمای نورد نهایی ۱۶۳
۶. ۱۹ عیوب نورد ۱۶۳
۶. ۱۹. ۱ عیوب سطح نورد ۱۶۳
۶. ۱۹. ۲ عیوب پروفیل‌ها ۱۶۴
مسائل ۱۶۷

فصل هفتم: کشش ۱۶۹
۷. ۱ کشش تسمه از داخل قالب‌های گوه‌ای شکل ۱۷۰
۷. ۲ کشش میله، مفتول و سیم ۱۷۳
۷. ۳ محاسبه نیرو و کار یا انرژی در کشش میله، مفتول و سیم ۱۷۳
۷. ۳. ۱ محاسبه نیروی کشش ایدآل ۱۷۳
۷. ۳. ۲ محاسبه نیروی کشش مفتول از طریق محاسبه تنش موضعی ۱۷۵
۷. ۳. ۲. ۱ محاسبه نیروی کشش مفتول یا سیم با توجه به اصطکاک ۱۷۵
۷. ۳. ۲. ۲ محاسبه تنش و نیروی کشش مفتول یا سیم بدون اصطکاک ($\mu = 0$) ۱۷۸
۷. ۴ محاسبه نیروی کشش مفتول یا سیم با توجه به مؤلفه‌های مختلف انرژی به‌کار رفته در فرایند ۱۷۹
۱) کار یا انرژی ایدآل (برای تغییرشکل همگن) ۱۷۹
۲) کار یا انرژی اصطکاک ۱۷۹
۳) کار یا انرژی تغییرشکل برشی ۱۸۱
۷. ۵ میزان بازدهی کار یا انرژی مکانیکی در فرایند کشش مفتول و سیم ۱۸۲
۷. ۶ تعیین مقدار بهینه زاویهٔ قالب ۱۸۳
۷. ۷ حداکثر کاهش سطح مقطع در یک عبور از داخل قالب در کشش مفتول ۱۸۶
۷. ۸ تأثیر کشش به عقب ۱۸۶
۷. ۹ کشش لوله‌ها ۱۸۸

www.ketab.ir

۷. ۹. ۱ کشش توخالی آزاد یا کشش بدون توپی ۱۸۹
۷. ۹. ۱. ۱ محاسبه نیرو در کشش لوله توخالی آزاد ۱۸۹
۷. ۹. ۲ کشش لوله با سمبه (توپی) ثابت ۱۹۰
۷. ۹. ۲. ۱ محاسبه نیروی لازم برای کشش لوله با توپی ثابت مخروطی‌شکل ... ۱۹۱
۷. ۹. ۲. ۲ محاسبه نیروی کشش برای فرایند کشش لوله با توپی استوانه‌ای ۱۹۳
۷. ۹. ۳ کشش لوله با توپی معلق (شناور) ۱۹۴
۷. ۹. ۴ کشش لوله با میله (ماندرل) متحرک از درون قالب مخروطی‌شکل ۱۹۴
۷. ۹. ۴. ۱ محاسبه تنش و نیرو برای کشش لوله با میله
متحرک از درون قالب مخروطی‌شکل ۱۹۵
۷. ۹. ۵ کشش پشت‌سرهم لوله‌ها بر روی یک سنبه ۱۹۶
۷. ۱۰ نکات کاربردی در فرایند کشش ۱۹۷
۷. ۱۱ تأثیر دما در فرایند کشش ۱۹۸
۷. ۱۲ خواص مکانیکی ۱۹۹
۷. ۱۳ روانکاری در فرایند کشش ۱۹۹
۷. ۱۴ عیوب کشش ۲۰۰
۷. ۱۵ ابزار کشش ۲۰۱
مسائل ۲۰۴

فصل هشتم: اکستروژن ۲۰۷
۸. ۱ روش‌های مختلف اکستروژن ۲۰۸
۸. ۲ مزایا و معایب اکستروژن مستقیم و غیرمستقیم ۲۱۰
۸. ۲. ۱ مزایای اکستروژن مستقیم ۲۱۰
۸. ۲. ۲ معایب اکستروژن مستقیم ۲۱۱
۸. ۲. ۳ مزایای اکستروژن غیرمستقیم ۲۱۱
۸. ۲. ۴ معایب اکستروژن غیرمستقیم ۲۱۱
۸. ۳ چگونگی سیلان ماده در فرایند اکستروژن مستقیم توپر
مؤلفه‌های مختلف انرژی به‌کار رفته در فرایند ۲۱۱
۸. ۴ تعیین نیروی لازم در اکستروژن ۲۱۴
۸. ۴. ۱ محاسبه نیرو از طریق استفاده از تنش‌های مؤثر مؤلفه‌های مختلف
در اکستروژن سرد قطعه با مقطع دایره‌ای‌شکل توپر ۲۱۴
۸. ۴. ۲ محاسبه نیرو در اکستروژن غیرمستقیم ۲۱۷
۸. ۴. ۳ محاسبه نیرو با استفاده از نظریه پلاستیسیته زیبل ۲۱۷
۸. ۵ اکستروژن توخالی ۲۱۹
۸. ۵. ۱ نیروی لازم در اکستروژن توخالی ۲۲۰
۸. ۶ اکستروژن غیرمستقیم فنجانی ۲۲۱
۸. ۶. ۱ تعیین نیرو در اکستروژن غیرمستقیم فنجانی ۲۲۱

www.ketab.ir

۸.۶.۲ تعیین نیرو به‌کمک مدلسازی ۲۲۲
۸.۶.۳ محاسبه نیرو به‌کمک معادلات تحلیلی ۲۲۵
۸.۷ اکستروژن عرضی ۲۲۷
۸.۷.۱ نیروی مورد نیاز در اکستروژن عرضی ۲۲۸
۸.۸ اکستروژن نیمه‌گرم ۲۲۸
۸.۹ اکستروژن هیدرواستاتیکی ۲۳۱
۸.۱۰ تأثیر دما بر اکستروژن داغ ۲۳۳
۸.۱۱ ریزساختار در اکستروژن گرم ۲۳۵
۸.۱۲ روانکاری در فرایند اکستروژن گرم ۲۳۹
۸.۱۳ روانکاری در اکستروژن سرد ۲۴۲
۸.۱۴ عیوب ممکن در محصولات اکستروژن ۲۴۳
۸.۱۵ رفتار مواد اکستروژن‌پذیر ۲۴۶
۸.۱۶ مواد اکستروژن سرد ۲۵۳
مسائل ۲۵۸

فصل ۹: آهنگری یا فورجینگ ۲۵۹
۹.۱ آهنگری با قالب باز ۲۵۹
۹.۲ آهنگری با قالب باز به‌صورت شکلی ۲۶۰
۹.۳ آهنگری با قالب بسته ۲۶۲
۹.۴ خصوصیات محصولات فورجینگ با قالب بسته ۲۶۶
۹.۵ عوامل مهم مؤثر بر استحکام محصولات فورجینگ ۲۶۶
۹.۶ تأثیر دما ۲۶۶
۹.۷ چگونگی سیلان در آهنگری با قالب بسته ۲۶۸
۹.۸ تنش، نیرو، کار ۲۷۱
۹.۹ انتخاب مواد برای عملیات فورجینگ ۲۸۲
۹.۱۰ دمای فورجینگ داغ یا گرم ۲۸۳
۹.۱۱ قابلیت عملیات آهنگری یا پتک و پرسپذیری در فرایند آهنگری ۲۸۶
۹.۱۲ روانکاری در فرایند آهنگری ۲۸۶
۹.۱۳ فرایند کار در فورجینگ ۲۸۷
۹.۱۴ عملیات حرارتی در فرایند آهنگری داغ ۲۸۸
۹.۱۵ روش‌های خاص فورجینگ ۲۸۹
۹.۱۵.۱ فورجینگ دقیق ۲۸۹
۹.۱۵.۲ فورجینگ فوق‌العاده دقیق ۲۸۹
۹.۱۵.۳ فورجینگ بدون پلیسه ۲۹۰
۹.۱۶ دستگاه‌های آهنگری ۲۹۰
مسائل ۳۰۶

www.ketab.ir

فصل ۱۰: شکل‌دهی ورق‌های فلزی ۳۰۷
۱۰. ۱ کشش عمیق ۳۰۷
۱۰. ۱. ۱ اصول اساسی در کشش عمیق ۳۰۸
۱۰. ۱. ۲ محاسبه نیرو در فرایند کشش عمیق ۳۰۸
۱۰. ۱. ۳ حد کشش و عوامل مؤثر بر آن ۳۱۱
۱۰. ۲ نمودار حد تغییرشکل در کشش عمیق ۳۱۳
۱۰. ۳ روش‌های آزمایش شکل‌پذیری ورق ۳۱۷
۱۰. ۳. ۱ آزمایش کشش فنجانی ۳۱۷
۱۰. ۳. ۲ آزمایش کشش دوبعدی اریشزن ۳۱۷
۱۰. ۴ ناهمسانگردی ۳۱۸
۱۰. ۵ تأثیر ناهمسانگردی در کشش عمیق ۳۲۱
۱۰. ۶ کشش عمیق چند مرحله‌ای ۳۲۳
۱۰. ۷ کشش عمیق به منظور کاهش ضخامت جداره قطعه توخالی (اتوکاری) ۳۲۴
۱۰. ۸ کشش عمیق با نیروی لایه‌گیر و محیط مؤثر ۳۲۵
۱۰. ۹ شکل‌دهی انفجاری ۳۲۶
۱۰. ۱۰ شکل‌دهی الکترومغناطیسی ۳۲۷
۱۰. ۱۱ شکل‌دهی کششی ۳۲۸
۱۰. ۱۲ شکل‌دهی چرخشی ۳۲۹
۱۰. ۱۳ خواص ورق‌های فلزی ۳۳۰
۱۰. ۱۳. ۱ ورق‌های فولادی کم کربن ۳۳۱
۱۰. ۱۳. ۲ ورق‌های فولادی کم کربن بدون عناصر بین‌نشینی یا فولادهای IF ۳۳۳
۱۰. ۱۳. ۳ اثر شکل‌پذیری ناشی از تبدیل ۳۳۸
۱۰. ۱۳. ۴ ورق‌های فولادی زنگ نزن ۳۳۹
۱۰. ۱۳. ۵ ورق‌های آلومینیمی ۳۴۱
۱۰. ۱۳. ۶ ورق‌های مسی و برنجی ۳۴۴
۱۰. ۱۳. ۷ تغییرشکل ورق‌ها از آلیاژهای با شبکه کریستالی هگزاگونال فشرده ۳۴۶

فصل یازدهم: شکل‌پذیری ۳۴۷
۱۱. ۱ عوامل مؤثر بر شکل‌پذیری ۳۴۷
۱۱. ۱. ۱ تأثیر دما و آهنگ کرنش ۳۵۰
۱۱. ۱. ۲ عوامل متالورژیکی ۳۵۲
۱۱. ۱. ۳ تأثیر تنش هیدرواستاتیکی ۳۵۵

فصل دوازدهم: ارزیابی نیرو با استفاده از نظریه میدان خط لغزش ۳۶۱
۱۲. ۱ تنش‌ها و خطوط لغزش با توجه به شرایط مرزی ۳۶۸
۱۲. ۲ کاربرد میدان خط لغزش برای سیستم استاتیکی فروبردن صفحه‌های

www.ketab.ir

تخت بدون اصطکاک بر سطح فلز در حالت کرنش صفحه‌ای ۳۷۲
۱۲. ۲. ۱ ضخامت صفحه فلزی یا تسمه برابر عرض صفحه پرس (b = h) ۳۷۳
۱۲. ۲. ۲ عرض صفحه پرس مضـرب صحیحی از
ضخامت تسمه (... و ۴ و ۳ و ۲ = b/h) ۳۷۳
۱۲. ۲. ۳ عرض صفحه پرس بیشتر از ضخامت تسمه
(b/h > ۱، اما b/h عدد صحیح نباشد) ۳۷۴
۱۲. ۲. ۴ ضخامت تسمه بیشتر از عرض صفحه پرس $\left(۰/۱ < \frac{b}{h} < ۱\right)$ ۳۷۴
۱۲. ۲. ۵ فرو بردن تکسنبه‌ای به شکل صفحه مسطح
تخت در قطعه فلزی با ضخامت زیاد (h/b > ۱۰) ۳۷۵
۱۲. ۳ اهمیت سرعت در میدان خط لغزش ۳۷۸
۱۲. ۳ معادلات سرعت گیرینگر ۳۷۸
۱۲. ۴ نمودارهای سرعت یا هودوگراف ۳۸۰
۱۲. ۴. ۱ راه‌حل‌های ساده میدان خط لغزش برای کشش تسمه بدون اصطکاک ۳۸۱
۱۲. ۴. ۲ میدان خط لغزش برای کاهش مقطع کمتر از $\frac{۲\sin\alpha}{۱+۲\sin\alpha}$.
طراحی برای توسعه میدان‌های خط لغزش از شبکه‌های شعاعی (بادبزنی) ۳۸۶
۱۲. ۴. ۳ میدان خط لغزش برای کاهش‌های مقطع کمتر از
$\frac{۲\sin\alpha}{۱+۲\sin\alpha}$ ترسیم هودوگراف ۳۸۷
۱۲. ۴. ۴ میدان خط لغزش برای کاهش‌های سطح مقطع کمتر از
$\frac{۲\sin\alpha}{۱+۲\sin\alpha}$. تعیین تنش با استفاده از میدان خط لغزش ۳۸۹
۱۲. ۵ ضریب کار اضافی بر حسب عوامل هندسی ۳۹۲
۱۲. ۶ تعیین تنش کششی با کرنش صفحه‌ای، با وجود اصطکاک،
کار اضافی و سختی کرنشی ۳۹۴
۱۲. ۶. ۱ راه‌حل میدان خط لغزش با وجود اصطکاک ۳۹۴
۱۲. ۶. ۲ کار اضافی برای سختی کرنشی، بدون اصطکاک ۳۹۶
۱۲. ۷ راه‌حل‌های میدان خط لغزش برای اکستروژن با کرنش صفحه‌ای ۳۹۷
۱۲. ۸ اتلاف انرژی در میدان خط لغزش ۴۰۱
۱۲. ۹ راه‌حل‌های میدان خط لغزش برای اکستروژن با قالب مخروطی‌شکل ۴۰۲
۱۲. ۹. ۱ اکستروژن بدون اصطکاک، با $r = \frac{۲\sin\alpha}{۱+۲\sin\alpha}$ با نیم زاویه قالب $\alpha = ۹۰^\circ$ ۴۰۲
۱۲. ۹. ۲ اکستروژن بدون اصطکاک، در حالت $r < \frac{۲\sin\alpha}{۱+۲\sin\alpha}$ ۴۰۳
۱۲. ۹. ۳ اکستروژن بدون اصطکاک، در حالت $r > \frac{۲\sin\alpha}{۱+۲\sin\alpha}$ ۴۰۳
۱۲. ۹. ۴ میدان‌های خط لغزش برای اکستروژن از داخل قالب‌های مربعی‌شکل ۴۰۵
۱۲. ۱۰ پیچ‌خوردگی (به‌هم‌خوردگی) فلز ۴۱۱
مسائل ۴۱۳

www.ketab.ir

فصل سیزدهم: ارزیابی نیرو از طریق تحلیل کران بالایی ۴۱۷
۱۳. ۱ تحلیل کران بالایی ۴۱۸
۱۳. ۲ کاربرد تحلیل کران بالایی در کرنش صفحه‌ای ۴۱۸
۱۳. ۳ کاربرد نظریه کران بالایی در اکستروژن بدون اصطکاک
با شرایط تغییرشکل صفحه‌ای ۴۲۲
۱۳. ۴ موارد استفاده تحلیل کران بالایی در فرو بردن سنبه تخت در قطعه فلزی
(شرایط کرنش صفحه‌ای) در شرایط بدون اصطکاک ۴۲۸
۱۳. ۵ کاربرد تحلیل کران بالایی در عملیات فشار در حالت کرنش
صفحه‌ای با اصطکاک چسبنده ۴۳۰
۱۳. ۶ تحلیل‌های کران بالایی متداول برای فشردن در حالت کرنش صفحه‌ای ۴۳۲
۱۳. ۷ راه‌حل‌های کران بالایی برای فشار با صفحه‌های فشار مسطح ۴۳۴
۱۳. ۸ روش تحلیل کران بالایی مرکب ۴۳۵
۱۳. ۹ کاربرد تحلیل کران بالایی برای کشش تسمه یا ورق ۴۳۸
۱۳. ۱۰ کاربرد تحلیل کران بالایی در کشش مفتول با تقارن محوری ۴۴۰
مسائل ۴۴۲

منابع ۴۴۷
واژه‌نامه فارسی و انگلیسی ۴۴۹
واژه‌نامه ۴۵۵
ضمیمه ۴۶۱

www.ketab.ir

مقدمه

کلیه قطعات صنعتی با شکل هندسی مورد نظر معمولاً با به‌کارگیری چند و یا حداقل یک فرایند تولید می‌شوند. یکی از فرایندهای تولید قطعات صنعتی با شکل نهایی معین فرایند ریخته‌گری است. در این فرایند ماده (اعم از فلزی یا غیرفلزی) پس از ذوب کامل و سیلان به‌داخل یک قالب، که به شکل نهایی قطعه تهیه شده است، پس از انجماد قطعه صلب با شکل نهایی مورد نظر به‌دست می‌آید. اما مطالعه و بررسی این فرایند شکل‌دهی و تمامی روش‌های آن به درس ریخته‌گری و بررسی فرایندهای مختلف تولید قطعات صلب با استفاده از فشردن (پرس) ذرات پودر ماده در قالب به متالورژی پودر مربوط می‌شود.

در شکل‌دهی فلزات معمولاً فرایندهایی بررسی می‌شود که در آن ماده یا قطعهٔ صلب اولیه با شکل هندسی ساده، که از طریق ریخته‌گری به‌دست آمده است، با اعمال نیرو تغییرشکل داده می‌شود. این قطعهٔ صلب به‌عنوان شمش اولیه در طی چند مرحله عملیات مکانیکی با اعمال نیرو به آن تغییرشکل می‌یابد تا به شکل نهایی مورد نظر برسد. به همین جهت به شکل‌دهی واژه تغییرشکل دادن هم به‌کار می‌رود.

البته در اینجا لازم است به این نکته اشاره شود که در اواخر قرن بیستم با پیشرفت نظری و تکنولوژی در شکل‌دهی فلزات با توجه به مسألهٔ صرفه‌جویی هرچه بیشتر در مصرف انرژی فرایند دیگری در شکل‌دهی مورد توجه و بررسی قرار گرفت. در این فرایند شکل‌دهی به‌جای استفاده از قطعهٔ صلب با شکل هندسی ساده مستقیماً از مادهٔ مذاب استفاده می‌شود. این فرایند از ادغام فرایند ریخته‌گری با فرایند نورد (فرایندی از شکل‌دهی) به‌دست آمده است که برای تولید ورق و یا انواع ساده‌ای از پروفیل‌ها به‌کار می‌رود.

امروزه نیروی محرکه برای توسعه و پیشرفت در کشورهای صنعتی توانایی و میل به رقابت در عرصهٔ تجارت جهانی است. برای رسیدن به این هدف باید تا حد امکان با کاهش هزینه‌های

www.ketab.ir

تولید، اما با توجه به حفظ کیفیت خوب محصول و حتی افزایش مستمر آن برای کسب شهرت همراه با کسب اعتماد مصرف‌کنندگان کوشش کنند. البته کاهش هزینه‌ها با توجه به افزایش قیمت سوخت و انرژی و مواد اولیه مستلزم صرفه‌جویی هرچه بیشتر در مصرف انرژی، دورریز کمتر مواد اولیه، انتخاب فرایندهای تولید مناسب و پیشرفته، طراحی و به‌کارگیری ابزار تولید مناسب با بازدهی بیشتر همراه با پرسنل آزموده و فعال است. اما چه خوب و زیبا بود که در این عرصهٔ رقابت جهانی اقدامات صاحبان و مسئولان صنایع در همهٔ کشورها برای توسعه و پیشرفت تکنولوژی با کاهش هزینه‌های تولید فقط به‌منظوره سود بیشتر نبوده، بلکه با توجه به شأن و کرامت انسان‌ها و حفظ محیط‌زیست همراه می‌بود. به امید آن روزی که رشد انسان‌ها و مسئولان تمام کشورها به حدی برسد که در این زمینه با همکاری یکدیگر به توافقات عملی دست یابند.

www.ketab.ir