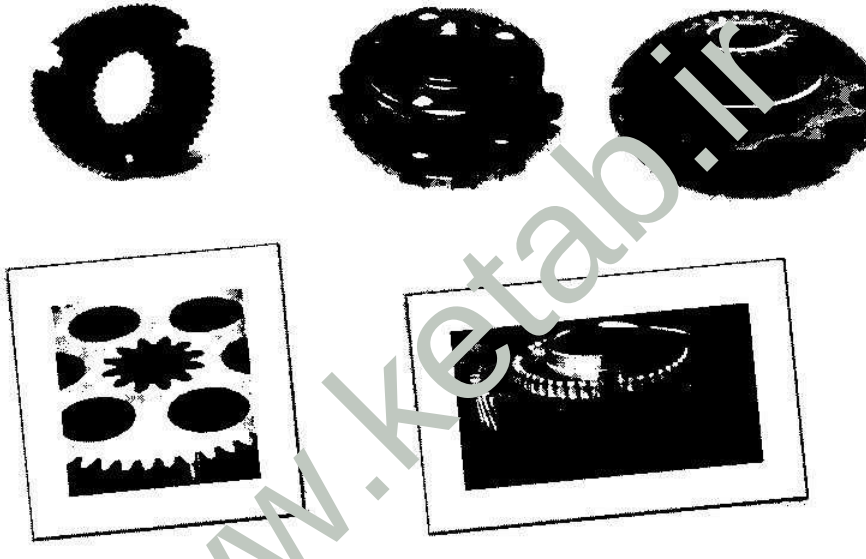
رفتار مکانیکی و خستگی قطعات متخلخل تف‌جوشی‌شده



www.ketab.ir

تألیف:

دکتر حمید خرسند، دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دکتر حسن عبدوس، عضو هیات علمی دانشگاه سمنان

سرشناسه	: خرسند، حمید، ۱۳۵۲ -
عنوان و نام پدیدآور	: رفتار مکانیکی و خستگی قطعات متخلخل تف جوشی شده/ تألیف حمید خرسند، حسن عبدوس.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، انتشارات، ۱۳۹٤
مشخصات ظاهری	: ۱۷۴ ص.: مصور (بخشی رنگی).
شابک	: ۱۳۰۰۰۰ ریال 978-600-7867-17-4:
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۱۵۵ - ۱۶۰.
یادداشت	: نمایه.
موضوع	: متالورژی گردفلز
موضوع	: مواد -- خواص مکانیکی
شناسه افزوده	: عبدوس، حسن، ۱۳۵۹ -
شناسه افزوده	: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. انتشارات
رده بندی کنگره	: ۱۳۹٤ ۷ر٤خ/TN٦٩٥
رده بندی دیویی	: ۶۷۱/۳۷
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۰۳۸۳۹۹

ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی http://publication.kntu.ac.ir

نام کتاب: رفتار مکانیکی و خستگی قطعات متخلخل تف جوشی شده

تألیف: دکتر حمید خرسند، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، حسن عبدوس

نوبت چاپ: اول

تاریخ چاپ: آبانماه ۱۳۹۴

تیراژ: ۲۵۰ جلد

قیمت: ۱۳۰۰۰ تومان

کد کتاب: ۴۰۳

شابک: ۴-۱۷-۷۸۶۷-۶۰۰-۹۷۸ ISBN: 978- 600-7867- 17-4

صحافی: گرنامی چاپ و لیتوگرافی: چاپ اول

آدرس و تلفن مرکز پخش و فروش: خیابان ولیعصر(عج)، بالاتر از میدان ونک، تقاطع میرداماد، روبروی ساختمان اسکان (۸۸۷۷۲۲۷۷-۰۲۱)

(حق چاپ برای ناشر محفوظ است)

www.ketab.ir

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۱
فصل اول، متالورژی پودر	۵
۱-۱- معرفی فرآیند	۵
۱-۲- پودر، مراحل آماده سازی/ انواع روش‌های آلیاژسازی	۸
۱-۳- فشردن	۱۶
۱-۳-۱- فشردن در قالب (سنبه و ماتریس)	۱۶
۱-۳-۲- فشردن گرم	۲۰
۱-۳-۳- قالب‌گیری تزریقی پودر	۲۱
۱-۳-۴- فشردن همه جانبه سرد	۲۲
۱-۳-۵- فشردن همه جانبه داغ	۲۳
۱-۳-۶- آهنگری پودر	۲۵
۱-۳-۷- آکستروژن پودر	۲۶
۱-۴- تف‌جوشی	۲۷
۱-۴-۱- سازوکارهای تف‌جوشی	۳۱
۱-۴-۲- تف‌جوشی حالت جامد	۳۲
۱-۴-۳- انواع روش‌های تف‌جوشی ارتقا یافته	۳۳
۱-۴-۳-۱- تف‌جوشی فعال‌شده	۳۵
۱-۴-۳-۲- تف‌جوشی فاز مایع	۳۶
۱-۴-۳-۳- تف‌جوشی بالای خط انجماد	۳۹
**********	
فصل دوم، خواص مکانیکی قطعات متخلخل	۴۱
۲-۱- ساختار قطعات متالورژی پودر	۴۱
۲-۱-۱- تخلخل	۴۱
۲-۱-۲- ریزساختار	۴۷
۲-۲- ارتباط تخلخل و خواص مکانیکی	۴۸
۲-۲-۱- اثر تخلخل بر استحکام کششی	۴۸
۲-۲-۲- اثر تخلخل بر استحکام تسلیم	۴۹
۲-۲-۳- اثر تخلخل بر ازدیاد طول نسبی و ضرایب الاستیک	۵۰
۲-۲-۴- اثر تخلخل بر سختی	۵۲
۲-۲-۵- اثر تخلخل بر مقاومت سایشی	۵۳

www.ketab.ir

۲-۲-۶- اثر تخلخل بر استحکام خستگی ۵۶
۲-۳- اثر عناصر آلیاژی بر خواص مکانیکی ۵۸
۲-۴- اثر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی ۶۱
****
فصل سوم، رفتار خستگی قطعات متخلخل ۶۵
۳-۱- تشریح عمومی فرآیند خستگی ۶۵
۳-۱-۱- منحنی‌های تنش بر حسب عمر (S-N) ۶۸
۳-۱-۲- تنش میانگین ۷۱
۳-۱-۳- طبیعت فیزیکی تخریب خستگی ۷۲
۳-۱-۴- مشخصات سطوح شکست خستگی ۷۷
۳-۲- فرآیند خستگی قطعات متالورژی پودر ۸۰
۳-۳- آزمون‌های خستگی و نمودارهای S-N ۸۱
۳-۴- تنش مواد متخلخل در برابر تنش‌های متناوب ۸۲
۳-۵- ارتباط بین استحکام کششی و استحکام خستگی ۹۱
۳-۶- اثر نوع و اندازه ذرات پودر اولیه ۹۳
۳-۷- نقش حفرات در جوانه‌زنی و رشد ترک خستگی ۹۴
۳-۸- سطح مقطع موثر تحمل بار ۱۰۸
۳-۹- ریزساختار و عناصر آلیاژی ۱۱۲
۳-۱۰- اثر تنش میانگین بر رفتار خستگی قطعات متخلخل ۱۳۰
۳-۱۱- اثر شرایط سطحی و عملیات حرارتی ۱۳۴
۳-۱۲- سازوکار شکست خستگی، سطوح شکست و شکست نگاری ۱۳۷
****
منابع و مآخذ ۱۵۵
فهرست راهنما ۱۶۱

www.ketab.ir

پیش‌گفتار

آبی که بیاسود، زمینش بخورد زود دریا شود آن رود که پیوسته روان است

امروزه بسیاری از صنایع انبوه‌ساز و بالاخص صنایع رو به توسعه، همانند صنعت خودروسازی، در صدد گسترش و توسعه روش‌هایی در ساخت و تولید هستند که با کاهش هزینه و صرفه‌جویی، قادر به ارائه محصولی با کمترین مراحلِ ممکنِ ساخت، دقت ابعادی بالا و خواص مهندسی مطلوب باشند. یکی از مهمترین فرآیندها که از دیرباز نیز مورد توجه بشر بوده است، بهره‌گیری از پودر فلزات به عنوان ماده اولیه، شکل‌دهی آن تحت نیروهای عمدتاً مکانیکی و سپس حرارت‌دهی یا تفجوشی با هدف ارتقا چگالی و بهبود خواص خشته پودر، می‌باشد. فناوری مذکور به متالورژی پودر[1] موسوم است. از طرفی، با توجه به اهمیت پودر فلزات و محدودیت‌هایی که از نظر توزیع اندازه و شکل ذرات وجود دارد و همچنین به دلیل عدم عبور قطعه ساخته شده از حالت مذاب کامل، دستیابی به چگالی کامل در نمونه‌های تفجوشیده امری دشوار است. لذا تخلخل به عنوان یکی از اجزای جدایی‌ناپذیر ریزساختار این مواد، مطرح می‌باشد. در این راستا، مطالعات و تحقیقات مفصلی انجام پذیرفته که از آن جمله می‌توان به استفاده از روش‌های نوین شکل‌دهی پودر، انتخاب مناسب توزیع ذرات پودر اولیه، استفاده از نانو ذرات، تفجوشی‌های تسهیل شده آهنگری پودر، فشردن گرم، اکستروژن و غیره در راستای رسیدن به چگالی کامل، اشاره نمود. شایان ذکر است که اعمال فرآیندهای مذکور به طور گسترده و فراگیر برای همه قطعات، با توجه به مسائل اقتصادی و بحث قیمت تمام شده، قابل اجرا نمی‌باشد. با وجود اینکه کاربرد متالورژی پودر در بسیاری از زمینه‌ها با موفقیت کامل همراه می‌باشد، ساخت قطعات از طریق این فناوری به ویژه برای شرایط نرویس‌دهی سخت، شامل اعمال بارهای شدید استاتیکی، ضربه‌ای و دینامیکی با محدودیت‌های جدی روبرو است. لذا لازم است در این زمینه و با هدف دستیابی به خواص مطلوب تمهیدات لازم اندیشیده شود.

از سوی دیگر، صنعت متالورژی پودر جهت پیگیری و تداوم عملکرد اقتصادی در بسیاری از زمینه‌ها ناگزیر است تا گستره محصولات خود را از اجزای کاملاً متخلخل همانند فیلترها و صافی‌ها به قطعات با خواص و عملکرد مهندسی و در عین حال با تیراژ مناسب سوق دهد. به عنوان یک مثال مفید، می‌توان به شاتون موتورهای درون‌سوز اشاره نمود که در حال حاضر با دقت بسیار بالا و خواص بی‌نظیر و لحاظ جنبه‌های اقتصادی خصوصاً در ایالات متحده از طریق متالورژی پودر، تهیه می‌شود. بنابراین با توجه به مزیت‌های این فرآیند، طریقه ساخت بسیاری از قطعات صنعتی که توسط روش‌های سنتی و مرسوم به صورت غیراقتصادی و با ضایعات بالا تولید می‌شدند، با فناوری متالورژی پودر

[1] - Powder Metallurgy (PM)

www.ketab.ir

جایگزین شده و یا در حال جایگزینی می‌باشند. نکته حائز اهمیت این است که در اغلب این کاربردها که بعضاً با تیراژ بالا نیز همراه می‌باشند، شرایط به گونه‌ای است که قطعات تف‌جوشی‌شده با بارگذاری تناوبی و از نوع خستگی مواجه هستند. اغلب شکست‌های گزارش شده برای قطعات تحت تنش مربوط به حالاتی است که اعمال نیروهای تناوبی حداقل به عنوان یکی از عوامل دخیل، مطرح می‌باشند. برای رفع این نقیصه، قدم اول شناخت کافی مهندسان، طراحان و صنعتگران از خصوصیات فرآیند و تسلط بر متغیرها و عواملی است که خواسته یا ناخواسته می‌توانند بر رفتار مکانیکی و بالاخص مقاومت خستگی آنها تاثیرگذار باشند.

در این حوزه تاکنون در کشور تحقیقات مختلف و متنوعی در دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و به ندرت در کارخانجات صنعتی انجام پذیرفته است. این در حالی است که مجموعه‌ای نوشتاری به طور خاص در ارتباط با خواص مکانیکی و از همه مهم‌تر رفتار خستگی قطعات متخلخل متالورژی پودر، منتشر نشده است. مولفین کتاب حاضر در دو دهه اخیر تجربیات ارزنده‌ای در راستای طراحی، ساخت و بررسی رفتار قطعات متالورژی پودر کسب نموده‌اند. مطالعات و تحقیقات صورت پذیرفته در این حوزه نشان می‌دهد که تخلخل، ریزساختار، عناصر آلیاژی، تنش متوسط، عملیات حرارتی و اعمال پوشش‌های سطحی از جمله مهمترین عوامل موثر بر خواص خستگی، محسوب می‌شوند. در نوشتار پیش‌رو، حتی الامکان سعی شده است که علاوه بر بیان کلیات مربوط به خستگی فلزات و آلیاژها به طور کاربردی به موارد تاثیرگذار بر رفتار خستگی قطعاتِ متخلخل شامل موارد فوق، پرداخته شود. امید است کتاب حاضر مورد توجه و استفاده طراحان، مهندسان، اساتید بزرگوار، دانشجویان و صنعتگران عزیز این حوزه قرار گرفته و به نحوی از منابع علمی و کاربردی لازم و مورد نیاز را برای ایشان فراهم سازد. همچنین پیش زمینه‌ای برای ادامه مطالعه، تحقیق و پژوهش در این راستا، فراهم آورد. شایان ذکر است که نویسندگان در تالیف نوشتار حاضر، خویش را مصون از خطا نمی‌دانند. لذا انتظار می‌رود خوانندگان گرامی، ایشان را از نظرات، انتقادات و پیشنهادات سازنده بهره‌مند فرمایند.

حمید خرسند - حسن عبدوس، ۱۳۹۱

www.ketab.ir

مقدمه

انتخاب روش بهینه به منظورِ ساختِ قطعات با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی، تیراژ تولید، کیفیت و با هدف کسبِ سهمِ بیشترِ بازارِ فروش از جمله موضوعات بسیار مهم در صنعت روبه رشد امروز دنیا محسوب می‌شود. در میان فناوری‌های مختلف قطعه‌سازی، متالورژی پودر از کارایی گسترده‌ای برخوردار است. تاریخچهٔ این فرآیند بیانگر قدمت دیرینه آن است. استفاده از پودر فلزات از زمان‌های قدیم و در حدود ۳۰۰۰ سال پیش از میلاد مسیح در برخی از نقاط دنیا، معمول بوده است. جاذبه‌های گسترده و خواص متنوع محصولات تولیدی از طریق فرآیند متالورژی پودر، منجر به استفادهٔ روزافزون از آن، در ساخت قطعات مهندسی گردیده است. همانگونه که مشخص شده است استحکام قطعات متالورژی پودر نسبت به مواد کارپذیر[1] به دلیل حضور تخلخل و حفرات، کمتر می‌باشد. همچنین محدودیت اعمال نیرو بر قطعات متخلخل، به ویژه در جهت سوم قطعه (عمود بر مقطع)، وجود دارد. با این وجود بنا به دلایلی نظیر کنواختی نسبی خواص مکانیکی و ساختاری، افزایش دقت ابعادی، کاهش هزینهٔ ماشینکاری، توانایی تولید قطعات با بهتر، سطح نهایی تمیزتر، کاهش وزن، احاطهٔ کامل بر ترکیب شیمیایی و منحصر به فرد بودن تولید برای برخی از مواد و قطعات، توسعهٔ آن به خصوص در کشورهای پیشرفته رو به فزونی است. همچنین امکان اتوماسیون بخش عمده مراحل تولید، انرژی مصرفی کم و میزان بهره‌گیری بالا از مواد اولیه بدون به هدر رفتن آن‌ها موجب شده که آهنگ رشد و توسعه این فرآیند نسبت به سایر روش‌های تولید در دهه‌های اخیر، افزایش یابد. امروزه امکان تهیه بسیاری از قطعات، که پیشتر توسط فرآیندهایی مانند ماشینکاری، ریخته‌گری، جوشکاری و یا فورج تهیه می‌شدند از طریق متالورژی پودر، فراهم شده است. در دوران اخیر مزایای منحصر به فرد این روش به همراه وجود تخلخلِ ذاتی که منجر به تنزل خواص می‌گردد، موجب شده است تا افزایش خواص مکانیکی قطعات متخلخل تفجوشی‌شده، مورد توجه بسیاری از محققین و صنعتگران قرار گیرد. نتیجه این بررسی‌ها منجر به ابداع فرآیندهای نوین شکل‌دهی ذراتِ پودر مانند فشردن گرم[2]، تزریق پودر فلز در قالب[3] و آهنگری پودر[4] گردیده است. به دلیل همین نوآوری‌ها است که این فرآیند در مقایسه با سایر روش‌های مرسومِ تولید، روش نوینی محسوب می‌شود.

با توجه به خصوصیت تولید قطعات از طریق پودر فلز، معمولاً کاربرد آن در صنایعی است که فرآیند ساخت با سایر روش‌ها امکان‌پذیر نبوده و یا مستلزم مراحل زیاد و در نتیجه صرف هزینه‌های گزاف می‌باشد. یکی از صنایع مطرح و مهم مرتبط با متالورژی پودر، صنعت اتومبیل‌سازی است. تمایل

1 - Wrought Material
2 - Warm Compaction
3 - Powder Injection Molding
4 - Powder Forge

www.ketab.ir

طراحان و مهندسان خودرو به کاهش قیمت، افزایش کیفیت و انبوه‌سازی سبب شده که صنعت خودروسازی به مهم‌ترین مصرف‌کننده محصولات متالورژی پودر، بدل شود. آمارها نشان می‌دهند که بیش از ۷۵ درصد از قطعات متالورژی پودر در این صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. تولید انبوه قطعات متالورژی پودر در صنعت خودروسازی از سال ۱۹۳۰ آغاز شده است. پس از سال ۱۹۸۶ بیش از ۸۰۰ میلیون شاتون با روشِ فورجِ پودر، تولید و در اتومبیل‌ها جایگزین شاتون‌های ساخته شده با روش فورج معمولی شدند. امروزه بیش از نیمی از شاتون‌ها در ایالات متحده از طریق این فرآیند، تولید می‌شوند. شرکت جنرال موتورز[5] شاتون‌های ساخته شده با این روش را از سال ۲۰۰۴ در موتورهای V4 خود به کار می‌برد. طبق گزارش بازار فلزات آمریکا، چنانچه این شرکت براساس برنامه خود، در کلِ موتورهایِ تولیدی V4 از شاتون‌های متالورژی پودر مصرف کند، سالانه بیش از ۲۷۰۰ تن به مصرف پودر فولاد در این کشور افزوده می‌شود.

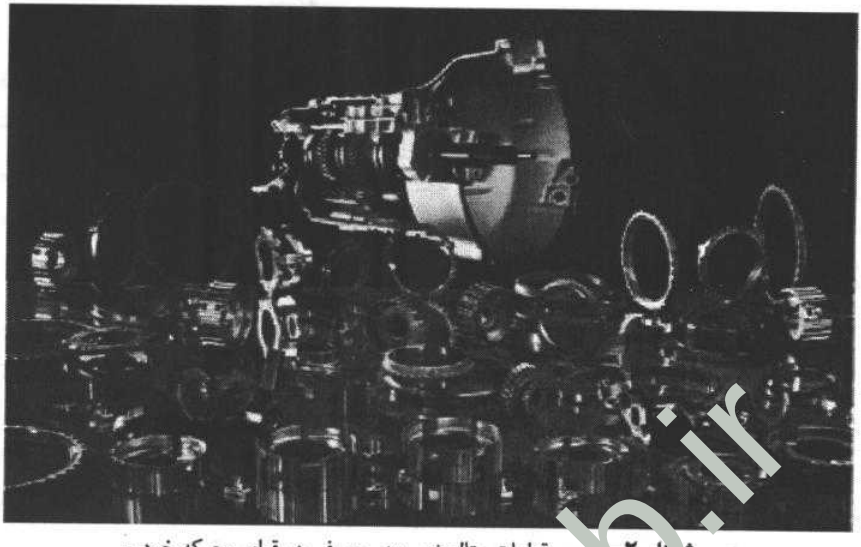
وابستگی ارتباط تنگاتنگ و غیر قابل انکار این فرآیند تولید با صنعت خودروسازی به حدی است که در سال ۲۰۰۱ بر اثر رکود اقتصاد ملی و به دنبال آن کاهشِ تولیدِ اتومبیل در ایالات متحده آمریکا، این صنعت اولین بازوال رشد را پس از سال‌ها رشد پی در پی، تجربه کرد. بنابراین متالورژی پودر گسترش روزافزون خود در بسیاری از موارد را مدیون و مرهون صنعت اتومبیل‌سازی دنیا می‌باشد.

اجزای سوپاپ و سرسیلندر (مانند بوش راهنمای گیت)، انواع چرخدنده‌های قوای محرکه، چرخ زنجیر، دنده پینیون و شاتون از مهم‌ترین قطعاتی محسوب می‌شوند که ساخت آن‌ها با فرآیند متالورژی پودر گسترش زیادی یافته است. نمونه‌هایی از قطعات متالورژی پودر مورد مصرف در خودرو در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل‌های ۲ و ۳ نیز به ترتیب قطعاتی از قوای محرکه و چرخدنده‌های خودرو که با فرآیند متالورژی پودر تهیه می‌شوند، قابل مشاهده هستند.

شکل ۱- نمونه‌هایی از قطعات مورد مصرف در اتومبیل و تهیه‌شده توسط متالورژی پودر.

5 - General Motors (GM)

www.ketab.ir



شکل ۲- تصویر قطعات متالورژی پودر مصرفی در قوای محرکه خودرو.

شکل ۳- تصویر چرخدنده‌های متالورژی پودر مصرفی در صنعت خودرو.

www.ketab.ir

اکثر قطعات متالورژی پودر، بالاخص اجزایی که در اتومبیل به کار برده می‌شوند، تحت بارگذاری‌های دینامیکی در حین سرویس‌دهی قرار دارند. لازم به ذکر است که حدود ۸۰ درصد از قطعات تف‌جوشی‌شده که در معرض این نوع بارگذاری‌ها قرار دارند را قطعات متالورژی پودر آهنی و فولادی تشکیل می‌دهند. بنابراین با توجه به ویژگی منحصر به فرد و متخلخل مواد تف‌جوشی‌شده،

بررسی و ارتقاء رفتار دینامیکی و به ویژه رفتار خستگی[۶] فولادهای متالورژی پودر در راستای گسترش بهره‌مندی از آن‌ها در شرایط سرویس‌دهی تحت تنش، ضروری به نظر می‌رسد. به عبارت دیگر، برتری فرآیند متالورژی پودر در رقابت با سایر روش‌های تولید در گروِ افزایشِ امکان جایگزینی اجزای تولید شده بدین روش با قطعاتی است که از طریق سایر فرآیندها، تهیه می‌شوند. این امر به ویژه درکاربردهای تحت تنش بالا و در معرض خستگی، بیشتر مورد توجه قرار دارد. بنابراین در این راستا، بررسی رفتار خستگی فولادهای تهیه شده از طریق متالورژی پودر و همچنین ارزیابیِ تاثیر عوامل مختلف و شرایط تولید بر خصوصیات مذکور، بسیار دارای اهمیت است.

در ادامه در نظر است تا در فصل اول به معرفی و شناسایی کامل فرآیند متالورژی پودر، مراحل ساخت از قبیل: پودرهای مورد استفاده، اصول فشردن و سازوکارهای تف‌جوشی[۷] پرداخته شود. در فصل دوم تخلخل و ویژگی‌های آن و همچنین انواع ریزساختار قطعات فولادی متالورژی پودر مورد توجه و ارزیابی قرار خواهند گرفت. در ادامه این فصل، تاثیر تخلخل بر خواص مکانیکی همانند استحکام کششی، استحکام تسلیم، ازدیاد طول نسبی، مدول کشسان[۸]، مقاومت سایشی و خستگی بیان خواهد شد. بخش انتهایی فصل دوم به تاثیر عناصر آلیاژی و همچنین عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی مواد متخلخل تف‌جوشی‌شده اختصاص یافته است.

در ابتدای فصل سوم اصول کلی خستگی فلزات از قبیل: تشریح فرآیند خستگی، انواع تنش‌های اعمالی، آثار تنش متوسط، طبیعت فیزیکی فرآیند خستگی و مشخصات سطوح شکست، مورد بررسی و مرور قرار می‌گیرند. پس از بیان اصول کلی خستگی، ادامه این فصل به بررسی و ارزیابی جامع واکنش موادِ متخلخل متالورژی پودر در برابر اعمال تنش‌های متناوب، می‌پردازد. در این بخش حداکثر کوشش انجام پذیرفته تا این ویژگی مکانیکی به همراه عوامل موثر بر آن به طور کامل و به تفصیل تشریح شوند. آزمون‌های خستگی و نمودارهای S-N، واکنش مواد متخلخل در برابر اعمال نیروهای متناوب (سخت‌شدن و نرم‌شدن چرخه‌ای و کرنش پلاستیک)، اثر خواص کششی و خستگی، اثر اندازه پودر اولیه، نقش حفرات در جوانه‌زنی و اشاعه ترک خستگی، تاثیر ریزساختار و عناصر آلیاژی، آثار تنش متوسط، شرایط سطحی و عملیات حرارتی، سازوکار شکست و بالاخره شکست‌نگاریِ قطعاتِ متخلخل از مهم‌ترین موارد مورد بحث خواهند بود.

6 - Fatigue
7 - Sintering Mechanisms
8 - Elastic Module

www.ketab.ir