

بسم الله الرحمن الرحيم

تولید لوله‌های نانوساختار به روش تغییر شکل پلاستیک شدید

مؤلفین:

دکتر قادر فرجی

عضو هیئت علمی دانشکده فنی دانشگاه تهران

دکتر جواد شهبازی کهن

دکتری دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

مهندس حسام تراب زاده کاشی

کارشناسی ارشد دانشگاه تهران



انتشارات شبازی



سرشناسه  
عنوان و نام پدیدآور : تولید لوله‌های نانوساختار به روش تغییر شکل پلاستیک شدید/مؤلفین: قادر، فرجی، حسام تراب‌زاده کاشی، جواد شهبازی کرمی.

مشخصات نشر : تهران: انتشارات شهبازی، ۱۳۹۶.

مشخصات ظاهری : ۱۲۰ ص

شابک : 978-600-8155-26-3: ۱۵۰۰۰ ریال

وضعیت فهرست نویسی : فیا

یادداشت : Nanotubes نانولوله‌ها

موضوع : تغییر شکل (مکانیک) (Deformation (Mechanics)

موضوع : نانوساختارها (Nanostructures)

شماره افزوده : شهبازی کرمی، جواد، ۱۳۶۴ -

شماره افزوده : تراب‌زاده کاشی، حسام، ۱۳۶۷ -

رده بندی کنگره : TA ۴۱۸/۹۱۳۰۴۱۳۹۶

رده بندی دی‌بی : ۶۲۰

شماره کتابشناسی : ۴۱۳۰۴۱۳۹۶

عنوان ..... تولید لوله‌های نانوساختار به روش تغییر شکل پلاستیک شدید

مؤلفین: ..... قادر فرجی، حسام تراب زاده کاشی، جواد شهبازی کرمی

ناشر: ..... انتشارات شهبازی

مدیر مسئول انتشارات: ..... جواد شهبازی کرمی

ناظر فنی: ..... سید حمید سجادی

حروفچینی و صفحه آرایی: ..... قاسمی (رها)

طراحی جلد: ..... مجتبی فرهادی

چاپ و صحافی: ..... چاپ گنجینه نگار

نوبت چاپ: ..... اول ۱۳۹۶

شمارگان: ..... ۵۰۰ جلد

قیمت: ..... ۱۵۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۸۱۵۵-۲۶-۳ ISBN: 978-600-8155-26-3

تلفن: ۴۴۱۳۸۶۴۴ همراه: ۰۹۱۲۱۸۳۴۱۴۴

ایمیل: [ShahbaziPub@gmail.com](mailto:ShahbaziPub@gmail.com) وب سایت: [WWW.ShahbaziPub.ir](http://WWW.ShahbaziPub.ir)

نماینده‌گی فروش تهران: بخش علوم پویا، میدان انقلاب، خیابان اردیبهشت (متیری جاوید)، نبش کوچه نوروژ، پلاک ۵۱، واحد ۱، تلفن: ۶۶۴۱۹۵۶۷-۶۶۹۶۰۷۷۳ تلفکس: ۶۶۹۶۰۷۷۲

توجه: کلیه حقوق مادی و معنوی چاپ و نشر، طرح روی جلد و عنوان کتاب با توجه به قانون حمایت حقوق مؤلفان، مصنفان و هنرمندان، مصوب سال ۱۳۴۸ برای انتشارات شهبازی محفوظ است. هرگونه استفاده بدون مجوز کتبی از ناشر تخلف بوده و بر اساس بند (۵) ماده ۲۳ قانون قابل پیگیری در محاکم قضایی می باشد.

## پیشگفتار مؤلفین:

توسعه مواد جدید پیشران اصلی رشد صنایع و فناوری‌های مختلف می‌باشد. رشد بسیاری از صنایع خصوصاً صنایع هوایی، خودرو و کشتی‌سازی مرهون توسعه فناوری‌های تولید مواد با استحکام به وزن بالا می‌باشد. در سال‌های اخیر تولید مواد فلزی فوق ریزدانه و نانوساختار به دلیل خواص مکانیکی فوق‌العاده این مواد مورد توجه بسیاری از محققان و دانشمندان بوده است. به علت اینکه فناوری‌های تغییر شکل پلاستیک شدید جزء جدیدترین علوم بوده، کمبود کتاب خصوصاً به زبان فارسی در این زمینه علمی به طور ملموسی احساس می‌گردد. در این کتاب روش‌های تولید فلزات نانو ساختار با استحکام به وزن بالا ارائه شده و معیارهای مهم انتخاب روش‌ها بررسی می‌شود. این کتاب حاصل بیش از ده سال تجربه و تلاش نویسندگان در این حوزه می‌باشد که بیش از ۱۰ مقاله علمی پژوهشی در بالاترین سطح ژورنال‌های بین‌المللی به چاپ رسانده‌اند. کتاب می‌تواند به عنوان مرجع درسی در رشته‌های مهندسی خصوصاً مهندسی مکانیک، مهندسی مواد و نانو فناوری باشد. همچنین می‌تواند به عنوان مرجعی مناسب در صنایع مختلف توسط مهندسان این مطالعه و استفاده گردد. در پایان از خوانندگان گرانقدر تقاضا می‌شود هر گونه پیشنهاد و وارد نقص را جهت بهبود کتاب حاضر به نویسندگان اطلاع رسانی نمایند.

قادر فرجی - حسام تراب زاده - جواد شهبازی

تابستان ۱۳۹۶

## فهرست

### فصل اول - مقدمه‌ای بر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید و مواد نانوساختار

- ۱-۱- مقدمه ..... ۱  
 ۲-۱- تفاوت روش‌های SPD با روش‌های سنتی ..... ۴  
 ۳-۱- ویژگی روش‌های SPD ..... ۶  
 ۱-۳-۱- کرنش پلاستیک معادل و کرنش برشی ..... ۷  
 ۲-۳-۱- فشار هیدروستاتیک ..... ۱۱

### فصل دوم - روش‌های تولید لوله‌های فوق ریزدانه و نانوساختار

- ۱-۲- مقدمه ..... ۱۵  
 ۱-۲-۱- روش فشار در کانال زاویه‌دار (ECA) برای قطعات توخالی ..... ۱۶  
 ۲-۲- بیچش لوله در فشار بالا (HPT) ..... ۱۸  
 ۳-۲- اتصال تجمعی با چرخش (CSP) ..... ۱۹  
 ۴-۲- فشار در کانال لوله‌ای (TCP) ..... ۲۲  
 ۵-۲- فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای (PCAP) ..... ۲۴  
 ۶-۲- فشار در کانال زاویه‌دار لوله‌ای موازی (PTCAP) ..... ۲۷  
 ۷-۲- برش لوله در فشار بالا (THPS) ..... ۲۹  
 ۸-۲- ترکیبی PTCAP ..... ۳۰  
 ۹-۲- روش افزایش و کاهش تناوبی قطر (CFS) ..... ۳۱  
 ۱۰-۲- تراکم و روزنرانی متناوب لوله (TCEC) ..... ۳۳  
 ۱۱-۲- انبساط و روزنرانی متناوب لوله (TCEE) ..... ۳۴  
 ۱۲-۲- انقباض و انبساط متناوب لوله (RTES) ..... ۳۶  
 ۱۳-۲- استحکام‌دهی لوله توسط لاستیک (RPTS) ..... ۳۷  
 ۱۴-۲- سایر روش‌های ترکیبی ..... ۳۸  
 ۱۵-۲- محدودیت‌های کلی روش‌های تولید لوله‌های فوق ریزدانه ..... ۴۰  
 ۱۶-۲- بررسی کرنش پلاستیک معادل و فشار هیدروستاتیک در روش‌های معرفی شده ..... ۴۱

### فصل سوم - تغییرات ریزساختاری مواد در روش‌های تولید لوله فوق ریزدانه

- ۱-۳- مقدمه ..... ۴۳  
 ۲-۳- مکانیزم‌های اصلاح دانه‌بندی در روش‌های SPD ..... ۴۶  
 ۱-۲-۳- تکثیر و انتقال نابجایی‌ها (MMD) ..... ۴۶  
 ۲-۲-۳- تقاطع باندهای برشی ریز (MSB) ..... ۴۷  
 ۳-۲-۳- دوقلوبی ..... ۴۸  
 ۴-۲-۳- تبلور مجدد دینامیکی ..... ۴۹  
 ۳-۳- روش‌های بررسی تغییرات ریزساختار ..... ۵۲  
 ۱-۳-۳- میکروسکوپ نوری (OM) ..... ۵۲  
 ۲-۳-۳- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ..... ۵۵  
 ۳-۳-۳- تکنیک پراش الکترون برگشتی (EBSD) ..... ۵۸

|    |                                                                   |
|----|-------------------------------------------------------------------|
| ۶۰ | ۴-۳-۲- میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM).....                        |
| ۶۲ | ۴-۳- مشخصه‌های اصلی ریزساختار مواد فوق ریزدانه و نانوساختار.....  |
| ۶۲ | ۴-۳-۱- مرزدانه‌ها با زاویه زیاد (HAGB).....                       |
| ۶۳ | ۴-۳-۲- یافت کریستالوگرافی.....                                    |
| ۶۴ | ۴-۳-۵- تغییرات ریزساختاری مواد مختلف بر اثر روش‌های SPD لوله..... |
| ۶۴ | ۴-۳-۵-۱- منیزیم و آلیاژهای آن.....                                |
| ۶۶ | ۴-۳-۵-۲- آلومینیوم و آلیاژهای آن.....                             |
| ۷۱ | ۴-۳-۵-۳- مس و آلیاژهای آن.....                                    |

## فصل چهارم - بررسی خواص لوله‌های فوق ریزدانه و نانوساختار..... ۷۵

|    |                                             |
|----|---------------------------------------------|
| ۷۵ | ۴-۱- مقدمه.....                             |
| ۷۶ | ۴-۲- روش‌های بررسی خواص مکانیکی مواد.....   |
| ۷۶ | ۴-۲-۱- آزمون کشش.....                       |
| ۷۹ | ۴-۲-۲- میکروسختی سنجی.....                  |
| ۸۱ | ۴-۲-۲- آزمون هیدرومالجینگ.....              |
| ۸۴ | ۴-۳- تغییرات خواص لوله‌های فوق ریزدانه..... |
| ۸۴ | ۴-۳-۱- استحکام.....                         |
| ۹۰ | ۴-۳-۳- سختی.....                            |
| ۹۳ | ۴-۳-۴- سوپر پلاستیکیت.....                  |
| ۹۵ | ۴-۳-۵- عمر خستگی.....                       |
| ۹۶ | ۴-۳-۵- خوردگی.....                          |
| ۹۶ | ۴-۳-۶- سایر خواص.....                       |

## فصل پنجم - جمع‌بندی مطالب..... ۹۹

|     |                     |
|-----|---------------------|
| ۹۹  | ۵-۱- مقدمه.....     |
| ۹۹  | ۵-۲- جمع‌بندی.....  |
| ۱۰۰ | ۵-۳- پیشنهادها..... |

## فصل ششم - منابع کتاب..... ۱۰۱