



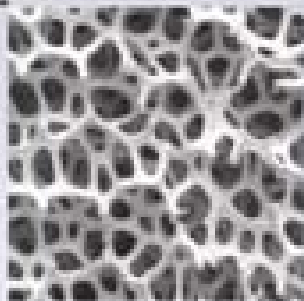
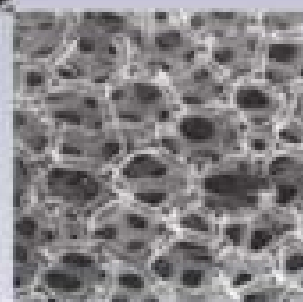
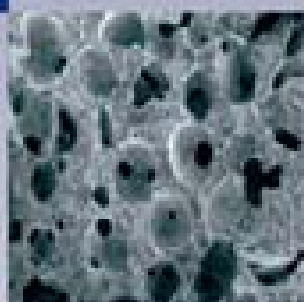
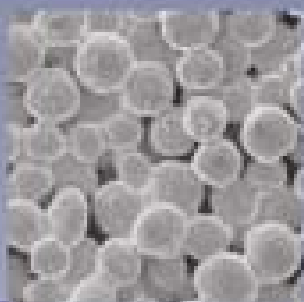
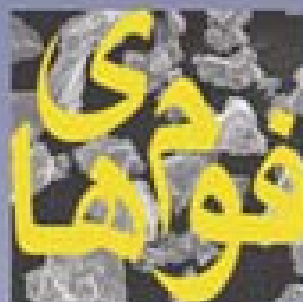
از مجموعه:  
مواد و فرآیندهای پیشرفته

فوم های فلزی

دکتر مهدی دیواندری

مهندس علیرضا وحید گلپایگانی

دکتر حمید رضا شاهوردی



دکتر حمید رضا شاهوردی  
دانشگاه تربیت مدرس

مهندس علیرضا وحید گلپایگانی  
دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر مهدی دیواندری  
دانشگاه علم و صنعت ایران

# فوم‌های فلزی

تألیف:

دکتر مهدی دیواندری (دانشگاه علم و صنعت ایران)

مهندس علیرضا وحید گلپایگانی (دانشگاه علم و صنعت ایران)

دکتر حمید رضا شاهرودی (دانشگاه تربیت مدرس)

فوم‌های فلزی

دیوانداری، مهدی- وحید گلپایگانی علیرضا- شاهرودی حمیدرضا، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۵.

۳۰۴ ص. : مصور، جدول، نمودار. - (مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران-۴۵۳)

ISBN ۹۶۴-۴۵۴-۱۴۴-۸ ریال ۷۵۰۰۰

فهرست‌نویسی بر اساس اطلاعات فیپا.

پشت جلد به انگلیسی:

Divandari M. (and others), Metal Foams

الف. فوم‌های فلزی. ب. دیوانداری، مهدی، ۱۳۸۵. ج. دانشگاه علم و صنعت ایران مرکز.

کتابخانه ملی ایران

- مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران-تهران- نارمک-  
صنوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۶۵
- تلفن: ۷۷۴۵۱۱۸۶-۷۷۴۵۱۱۸۶ دور نویس: ۷۷۴۵۱۱۸۶
- فروشگاه شماره ۱: میدان انقلاب - خیابان شهید منیری  
جاوید (اردیبهشت)- پلاک ۱۸۲ تلفن: ۶۶۴۶۶۹۰۰
- پست الکترونیک: [Publication@sun.iust.ac.ir](mailto:Publication@sun.iust.ac.ir)



نام کتاب: فوم‌های فلزی

تألیف: دکتر مهدی دیوانداری، مهندس علیرضا وحید گلپایگانی و دکتر حمید رضا شاهرودی

طرح روی جلد: علی دیوانداری

طراحی داخلی: امین طرح

چاپ دوم: ۱۳۸۹

شمارگان: ۱۰۰۰ جلد

قیمت: ۷۵۰۰۰ ریال

شماره انتشارات: ۴۵۳

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران

ISBN : 964 - 454 - 144 - 8

شابک: ۹۶۴-۴۵۴-۱۴۴-۸

این کتاب با سرمایه‌گذاری مشترک به چاپ رسیده است.

## پیشگفتار

اگر بتوان جهان را به دو بخش مادی و معنوی تقسیم کرد، آنگاه می‌توان گفت که موضوع مورد بحث رشته علم و مهندسی مواد بخش مادی جهان است. البته این تقسیم‌بندی کلانی است. چنان کلان است که هر ماده قابل روئیت را پوشش می‌دهد و بنا بر این تنها شامل فلزات و غیرفلزات، آنچنانکه برخی افراد تقسیم کرده‌اند، نمی‌گردد. در طبقه‌بندی جدید، مواد به گروه‌های شش‌گانه زیر تقسیم می‌شوند:

- ۱- فلزات
- ۲- سرامیک‌ها
- ۳- بسپارها (پلیمرها)
- ۴- کامپوزیت‌ها
- ۵- مواد فومی (متخلخل)
- ۶- مواد طبیعی

هر کدام از این مواد جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند. در این مجموعه نام جدیدی، یعنی مواد فومی، ظاهر گردیده که در طبقه‌بندی‌های قدیم مواد مطرح نبوده است. میتوان گفت که این نوع تفکیک و طبقه‌بندی جدید بوده و نشان دهنده بروز و ظهور خانواده‌ای جدید از مواد می‌باشد. بنظر می‌رسد که این گروه از مواد، یعنی مواد فومی، روز بروز اهمیت بیشتری یافته و در زندگی بشر جایگاه ویژه‌ای پیدا نمایند. از ویژگی‌های این مواد سبکی زیاد، و به عبارتی نسبت وزن به حجم کم، داشتن سطح به حجم بالا و شباهت زیاد به مواد طبیعی است. این شباهت را می‌توان در استخوان، بافت مواد طبیعی، چوب درختان و بسیاری مواد طبیعی دیگر مشاهده نمود.

کتاب حاضر با هدف معرفی مواد فومی و بخش کوچکی از این مواد یعنی فوم‌های فلزی تهیه و تدوین شده است. کتاب مشتمل بر چهار فصل است. فصل اول حالت مقدمه داشته و به معرفی این مواد و تاریخچه ظهور و تحقیقات عمومی انجام شده در این زمینه اشاره دارد. فصل دوم بر

روشهای مختلف تولید این مواد تاکید داشته و انواع و اقسام روشها، شامل روشهای مبتنی بر ذوب، ریخته‌گری، متالورژی پودر و سایر روشهای متداول را به بحث می‌گذارد. خواص و ویژگیهای این خانواده از مواد موضوع فصل سوم است. خواص مکانیکی، قابلیت جذب انرژی شامل انرژی ضربه‌ای و انرژی صوتی، ویژگیهای خاص انتقال حرارتی، جزو موضوعات مورد بحث در این فصل است. همچنین قابلیت واکنش‌پذیری بالا، توانایی انتقال و یا محدود سازی انتقال انرژی الکتریکی در شرایط ویژه، عملکرد مناسب به عنوان سد حرارتی و یا محدود سازی امواج مغناطیسی، و در یک عبارت خواص فیزیکی ویژه مواد متخلخل، موضوع فصل سوم است.

کاربرد این مواد، که موتور محرک توسعه آنهاست، در فصل چهارم به تفصیل مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته و مفصل‌ترین بخش کتاب است. این فصل نشان می‌دهد که این مواد در آینده چه جایگاهی خواهند داشت. شاید بتوان نتیجه گرفت که صنایع حمل‌ونقل زمینی، ریلی، هوایی و دریایی در آینده اتکاء زیادی بر این مواد خواهند داشت. صنعت ساختمان مصرف‌کننده عمده دیگر این مواد خواهد بود. صنایع تصفیه سیالات و مواردی که سطح به حجم بالای این مواد اهمیت دارد تعیین‌کننده کاربردهای دیگر است. صنایع پزشکی، صنایع نظامی، صنایع مخابراتی و هوافضا در آینده به این مواد اتکاء خواهند داشت.

بدینوسیله از زحمات خانمها مهندس مرجان زاهدی و مهندس مریم ابویی که در ترجمه بخش از مباحث مطرح شده در فصل اول و دوم کتاب همکاری داشته‌اند تشکر و قدردانی می‌شود. امید است که این کتاب بتواند افق دید ما را نسبت به اهمیت این مواد توسعه داده و نشان دهد که توجه به رشته مهندسی مواد می‌تواند به توسعه علم و صنعت در کشور کمک شایانی نماید.

با تشکر از انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران که چاپ و نشر این کتاب را به‌عهده گرفته است و همچنین با سپاس از هنرمند برجسته آقای علی دیواندری که طراحی روی جلد را تقبل نمودند، مولفین کتاب سپاس خود را به آقایان مصطفی دیواندری و حافظ دیواندری به خاطر همکاری در طراحی و صفحه‌آرایی تقدیم می‌نمایند.

مolfan

بهار ۱۳۸۵

## مقدمه چاپ دوم

بررسی خواص فوم های فلزی و کوشش در زمینه ارائه روش های تولید جدید این مواد همچنان موضوع تحقیقات گسترده شرکت های صنعتی و تحقیقاتی و محافل دانشگاهی است. اکنون حداقل یک مجله بین المللی علمی تحت عنوان "فوم فلزی" منتشر شده و سالیانه چندین کنفرانس بین المللی تحت همین عنوان برگزار می گردد. کاربرد فوم های فلزی در صنعت خودرو و صنایع نفت و گاز و پتروشیمی و همچنین صنایع هوا فضا و کشتی سازی در حال گسترش است.

در داخل کشور انتشار چاپ اول کتاب فوم های فلزی، ضمن معرفی این خانواده جدید از مواد مهندسی، مورد استقبال دانشگاه و صنعت قرار گرفته و کارهای تحقیقاتی در زمینه تولید و بررسی خواص این مواد در دانشگاه های مختلف شروع و رو به گسترش است. مراجعات مختلف دانشجویان کارشناسی ارشد و دکتری برای کسب اطلاعات بیشتر در زمینه فوم ها به مولفین کتاب نشان داد که علاقه به تحقیق در خصوص این مواد تا چه حد در دانشگاه های مختلف کشور جدی گرفته شده است. بر طبق اطلاعات موجود در هر یک از دانشکده های مواد دانشگاه های کشور بین دو تا پنج پروژه کارشناسی ارشد و دکترا در زمینه تولید و بررسی خواص فوم های فلزی در حال انجام است.

بایستی در نظر داشت که توجه به مواد متخلخل بروی هر چهار نوع ماده، شامل فلزات، سرامیک ها، پلیمرها و کامپوزیت ها متمرکز بوده ولی سابقه نوع فلزی نسبت به انواع دیگر کمتر است. از طرفی حجم تولید آن نیز در سالهای اخیر رو به افزایش گذاشته و بنظر می رسد که زمینه مصرف فوم های فلزی، بویژه نوع تخلخل باز آن، بیشتر در صنایع نفت و گاز و نوع تخلخل بسته آن در صنعت خودرو آینده بهتری داشته باشد.

اکنون که این مقدمه بر چاپ دوم در حال نگارش است بر خود لازم می دانیم که از لطف و محبت جامعه دانشگاهی کشور به خاطر تشویق های خالصانه و همچنین از صنایع کشور به دلیل میل و پیگیری جهت تولید و عرضه این مواد در سطح کشور تقدیر و تشکر کنیم. یادآوری علاقه اساتید محترم، محققین بخش صنعت و دانشجویان دانشگاه های مختلف به تحقیق بیشتر در این زمینه نیز موجب دلگرمی است. مولفان امیدوارند که بتوانند چاپ سوم کتاب را با تغییرات مناسب و با اضافه کردن نتایج آخرین تحقیقات منتشره در سطح دنیا و کشور منتشر کنند.

شرکت همکار ما در تهیه این مجموعه - سه سیال - موفق شده است که نمونه های مختلفی از این مواد را، که ممکن است در کوتاه مدت قابل تولید در کشور نباشد، از طریق ارتباط با شرکتهای تولید کننده مختلف در سطح دنیا و همچنین تبادل اطلاعات با سایر مراکز تحقیقاتی دنیا تهیه نموده و در حال حاضر این امکان فراهم شده است که زمینه کاربردی این مواد در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی و همچنین صنعت خودرو و حمل و نقل هوایی و دریایی مورد تحقیق قرار گیرد. امیدواریم تا چاپ سوم کتاب قادر باشیم آخرین دستاوردهای کشور و جهان در این زمینه را، جهت اطلاع محققین، به یاری حق به روز کنیم.

با تشکر از همکاری:



مرکز توسعه مواد نانو و فوم سه سیال

[www.sesayal.com](http://www.sesayal.com)

برای همکاری موثر در پردازش اطلاعات و نیز مشارکت موثر در به ثمر رساندن مجموعه حاضر و نهایتاً کمک در چاپ و نشر این کتاب



بانک اطلاعات مهندسی (داده)

بامداد

[www.bamdadbank.com](http://www.bamdadbank.com)

برای همکاری موثر در جمع‌آوری و همچنین در اختیار گذاشتن بخش مهمی از اطلاعات ارائه شده در این مجموعه

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول

- ۱- تاریخچه ----- ۱
- ۱-۱- معرفی ----- ۳
- ۲-۱- سوابق پژوهش و تولید ----- ۹

### فصل دوم

- ۲- روش های تولید ----- ۱۵
- ۱-۲- فرآیندهای حالت مایع ( ذوبی ) ----- ۱۸
- ۱-۱-۲- فوم سازی مستقیم از مذاب ----- ۱۸
- ۱-۱-۱-۲- روش تزریق گاز ( Hydro/Alcan ) ----- ۱۹
- ۲-۱-۱-۲- استفاده از مواد حباب زا ( Alporas ) ----- ۲۴
- ۲-۱-۲- انجماد یونکتیکی فلز - گاز ----- ۲۷
- ۳-۱-۲- روش ذوب فشرده پودری ----- ۳۰
- ۴-۱-۲- روش های ریخته گری ----- ۳۹
- ۱-۴-۱-۲- ریخته گری دقیق با استفاده از مدل پلیمری ----- ۳۹
- ۲-۴-۱-۲- ریخته گری دقیق مدل شبکه ای پلیمری ----- ۴۱
- ۳-۴-۱-۲- ریخته گری در فضای بین گلوله ها ( ریخته گری نفوذی ) ----- ۴۲
- ۵-۱-۲- پاشش مخلوط ذوب و ذرات حبابزا ( Osprey process ) ----- ۴۹
- ۲-۲- فرآیندهای حالت جامد ----- ۵۰
- ۱-۲-۲- تف جوشی پودر یا الیاف فلزی ----- ۵۰
- ۲-۲-۲- روش تله-گاز یا ( گاز - پودر ) ----- ۵۲
- ۳-۲-۲- روش پودر سیال گازدار ( فوم سازی دوغابی ) ----- ۵۵
- ۴-۲-۲- کاربرد فضا ساز ----- ۵۶
- ۵-۲-۲- ساختارهای کروی توخالی ----- ۵۸



۶۲	-----	۶-۲-۲- کاربرد هم زمان پودر فلز/چسب
۶۴	-----	۷-۲-۲- تف جوش واکنشی
۶۴	-----	۳-۲- روش های رسوب دهی
۶۴	-----	۱-۳-۲- روش رسوب دهی الکتریکی
۶۸	-----	۲-۳-۲- رسوب بخار فلز
۶۹	-----	۴-۲- توسعه، تکامل و تنوع در روش های تولید
۷۲	-----	۱-۴-۲- پوشش فوم فلزی با فلز به روش ریخته گری تزریقی
۷۳	-----	۲-۴-۲- تولید فوم های منیزیمی کامپوزیتی

### فصل سوم

۷۵	-----	۳- خواص
۷۷	-----	۱-۳- نسبت استحکام به وزن
۸۹	-----	۲-۳- خواص حرارتی
۸۹	-----	۱-۲-۳- ضریب انتقال حرارت در فوم های فلزی
۹۳	-----	۲-۲-۳- شار حرارتی
۹۴	-----	۳-۲-۳- افت فشار
۹۵	-----	۳-۳- خواص الکتریکی
۱۰۱	-----	۴-۳- خواص صوتی
۱۰۲	-----	۱-۴-۳- جذب صدا در مواد
۱۰۳	-----	۲-۴-۳- جذب صدا در فوم های فلزی
۱۱۳	-----	۵-۳- جذب انرژی
۱۲۳	-----	۱-۵-۳- مقایسه ی فوم های فلزی و لوله های فلزی توخالی در جذب انرژی
۱۲۸	-----	۲-۵-۳- لوله های فلزی پر شده با فوم فلزی
۱۲۹	-----	۳-۵-۳- حفاظت در برابر انفجار
۱۳۲	-----	۶-۳- عملیات تکمیلی

## فصل چهارم

۱۴۷	۴- کاربرد فوم‌های فلزی
۱۵۱	۴-۱- حمل و نقل
۱۵۳	۴-۱-۱- حمل و نقل زمینی و ریلی
۱۶۹	۴-۱-۲- حمل و نقل دریایی
۱۷۴	۴-۱-۳- حمل و نقل هوایی
۱۷۶	۴-۱-۴- حمل و نقل روی برف
۱۷۷	۴-۲- صنایع ساختمانی
۲۰۱	۴-۳- کاربردهای تزئینی
۲۰۷	۴-۴- کاتالیست
۲۱۸	۴-۵- باتری
۲۲۳	۴-۶- مبدل حرارتی
۲۳۷	۴-۷- صنایع نظامی
۲۴۳	۴-۸- بیومتریال
۲۵۰	۴-۹- کاربردهای ویژه
۲۶۷	منابع
۲۷۷	پیوست‌ها
۲۸۴	واژه نامه انگلیسی - فارسی
۲۹۴	واژه نامه فارسی - انگلیسی



# فصل ۱

---

تاریخچه



# فصل ۱

## ۱- تاریخچه

### ۱-۱- معرفی

مواد فومی خانواده‌ای از مواد نو به شمار می‌روند که، با توجه ویژگی‌های منحصر به فرد، امکانات زیادی برای توسعه در سال‌های آینده خواهند داشت. جایگاه این مواد چیست و این توسعه چه مسیری داشته و خواهد داشت؟ نکته‌ای که شاید در همین ابتدا یادآوری آن جالب باشد تقسیم‌بندی مواد و تعیین جایگاه مواد فومی است. بر طبق آخرین طبقه‌بندی‌های علمی، مواد مهندسی به گروه‌های:

فلزات

سرامیک‌ها

بسیارها (پلیمرها)

کامپوزیت‌ها

مواد طبیعی

مواد فومی

تقسیم‌بندی می‌شوند. این نحوه‌ی تقسیم‌بندی در کتاب‌های علمی ده سال پیش متداول نبوده و کاملاً جدید است. چرا این مواد به حدی اهمیت یافته‌اند که به عنوان خانواده‌ای جدید مطرح شوند؟ مروری بر این موضوع می‌تواند دلایل توجه به مواد فومی (متخلخل) را روشن نماید.

مواد فومی با پایه‌ی پلیمری سال‌ها تولید شده و کاربردهای متعددی در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. فومهای پلی‌اورتان<sup>۱</sup>، پلی‌اتیلن<sup>۲</sup>، پلی‌استایرین<sup>۳</sup> و... انواعی از مواد فومی پلیمری هستند که در صنایع

---

1 - Polyurethane

2 - Polyethylene

3 - Polystyrene

بسته‌بندی، حمل و نقل، ساختمان، لوازم خانگی، مبلمان اداری و خانگی، ریخته‌گری، خودرو، تصفیه‌ی سیالات شامل گازها و مایعات و بسیاری کاربردها و مصارف دیگر مطرح بوده و با توجه به ویژگی‌هایی که دارند جایگزینی برای آنها مطرح نبوده و در سال‌های آتی نیز مصرف آنها، بر طبق آمار موجود، رو به گسترش است. زمانی که صحبت از فوم به میان می‌آید چیزی که اغلب مردم در ذهن تصور می‌کنند همان فوم پلیمری است. دلیل آن شاید رسوخ کاربرد این مواد در مصارف خانگی باشد. به ویژه آن که، حتی از سنین کودکی، این گروه از مواد در لوازم خواب و استراحت کودکان و در انواع اسباب بازی‌هایی که با آن سر و کار دارند حضور دارد. به عبارت دیگر فوم‌های پلیمری در زندگی بشر نقش بسیار پر رنگی پیدا کرده‌اند. آشنایی ما با گروه‌های دیگر فوم‌ها تا این حد عمیق و سابقه‌دار نیست.

فوم‌های سرامیکی، به عنوان گروهی دیگر از خانواده‌ی مواد فومی، در صنایع ساختمانی، فیلتراسیون در محیط‌های گازی و محلول، تصفیه مذاب‌ها، تصفیه آب، به عنوان کاتالیزور در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی و اخیراً در صنعت خودرو مطرح بوده و جایگاه ویژه‌ای دارند. ملاحظه می‌شود که عرصه کاربرد و مصرف این گروه تخصصی‌تر بوده و به جز صنایع ساختمانی در سایر عرصه‌ها عمومیت کم‌تری داشته و به طور طبیعی شناخت عموم از ویژگی‌های آنها کم‌تر است. در کشور زلزله خیزی مانند ایران توجه به این گروه از مواد فومی اهمیت زیادی داشته و شایسته توجه بیش‌تری است. کاربرد این مواد در صنایع ساختمانی می‌تواند تلفات ناشی از زلزله را در حد قابل توجهی کاهش داده و کمک شایانی به استاندارد سازی صنعت ساختمان نماید. جالب این که این مواد و کاربرد آنها در صنعت ساختمان نقش قابل ملاحظه‌ای در کاهش تبادلات حرارتی در ساختمان‌ها داشته و صرفه‌جویی زیادی در مصرف انرژی را به دنبال دارد.

گروه سوم یعنی فوم‌های فلزی به روئیت کمتر کسی رسیده و بسیاری از افرادی که در محدوده‌ی علم و مهندسی مواد فعالیت و مطالعه می‌نمایند با این مواد به تازگی آشنا شده و با ویژگی‌های تولید، خواص و کاربردهای آن کم‌تر آشنا هستند. این فوم‌ها عمدتاً از آلیاژهای آلومینیم تولید می‌شوند. هم زمان یا به تدریج فلزات و آلیاژهای دیگری مانند فولاد، مس، نیکل، سرب، روی، منیزیم، تیتانیم و سایر فلزات و آلیاژهای آنها به لحاظ قابلیت فومی شدن مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته و محدوده‌ای وسیع از کاربردهای مختلف را مطرح نموده‌اند. تحقیق در زمینه‌ی روش‌های تولید، خواص و کاربرد این مواد به سرعت در حال گسترش بوده و به نظر می‌رسد که آینده‌ی درخشانی در انتظار این خانواده و گروه از مواد خواهد بود.