

متالورژی برای همه

دانش مواد

مهدی شاهی اصل

احمد بهمنی

فرید انوشه پور

چاپ نخست

تابستان ۱۳۹۱ خورشیدی

سرشناسه: شاهدهی اصل، مهدی، ۱۳۶۰ -
 عنوان و نام پدیدآور: دانش مواد/ نویسندگان مهدی شاهدهی اصل، احمد بهمنی، فرید انوشه پور.
 مشخصات نشر: تهران: تهران: شرکت مهندسی آرتا پژوهش کاوه: هم‌پا، ۱۳۹۱.
 مشخصات ظاهری: [۶]، ۱۶۰ ص: مصور، نمودار.
 فروست: متالورژی برای همه: [۲].
 شابک: 978-600-5210-78-1
 وضعیت فهرست نویسی: فیبا
 موضوع: مهندسی مواد -- راهنمای آموزشی (عالی)
 موضوع: مواد صنعتی
 موضوع: متالورژی، ساختار اتم، بلور شناسی، آلیاژها، فلزها
 شناسه افزوده: بهمنی، احمد، ۱۳۶۱
 شناسه افزوده: انوشه پور، فرید، ۱۳۶۰ -
 رده بندی کنگره: ۴TA ۱۳۹۱۲۰۱۳۱ /
 رده بندی دیویی: ۶۲۰/۷۶۰۷۶
 شماره کتابشناسی ملی: ۲۵۱۵۶۱۸

شرکت مهندسی آرتا پژوهش کاوه - تهران
 کد پستی: ۱۳۱۹۸۱۳۷۵۶
 تلفن: ۰۲۱۶۶۳۸۶۵۱۳
 دورنگار: ۰۲۱۶۶۳۸۴۵۱۶
 تارنما: www.artaresearch.com
 رایانامه: info@artaresearch.com



نام کتاب: متالورژی برای همه: دانش مواد
 نویسندگان: مهدی شاهدهی اصل، احمد بهمنی، فرید انوشه پور
 طرح روی جلد: لیلی قاسمی
 صفحه آرای: آرتا پژوهش کاوه
 لیتوگرافی، چاپ و صحافی: فارابی
 نوبت چاپ: اول، تابستان ۱۳۹۱ خورشیدی
 شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه
 قیمت: ۷۰۰۰۰ ریال
 ناشر: شرکت مهندسی آرتا پژوهش کاوه/ نشر هم‌پا

* کلیه حقوق این اثر برای شرکت مهندسی آرتا پژوهش کاوه محفوظ است.

ISBN: 978-600-5210-78-1

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۵۲۱۰-۷۸-۱

سخن نخست

متالورژی یکی از پیشینه‌دارترین هنرها و همچنین یکی از نوین‌ترین دانش‌های مهندسی است. این نکته به خوبی، تاریخچه پر اوازه این رشته را نشان و آینده روشنی را برای آن نوید می‌دهد. متالورژی از دیرباز به عنوان مادر دانش‌های مهندسی به شمار می‌رود، زیرا بیشتر ابزارها و وسیله‌های پیرامون انسان همچون خودرو، هواپیما و سازه‌های گوناگون، از موادی ساخته شده‌اند که پژوهش‌گران این رشته، سالیان سال برای فرآوری و بهسازی ویژگی‌های آنها کوشیده‌اند. صنایع بزرگی چون هوافضا، الکترونیک و رایانه، بدون پیشرفت در متالورژی، امکان رشد و بالندگی هر چه بیشتر را ندارند و همه فرآیندهای طراحی و ساخت در پیوند با مهندسی برق، مکانیک، شیمی، عمران و صنایع، نیازمند همراهی دانش متالورژی هستند بنابراین افزون بر متخصصان این رشته، دیگران نیز بایستی تا اندازه‌ای متالورژی بدانند.

از این رو شرکت مهندسی آرتا پژوهش کاوه با درک نیاز همگان به داشتن آگاهی‌های پایه‌ای در زمینه دانش و فناوری متالورژی، تصمیم به نگارش و انتشار یک سلسله کتاب با عنوان «**متالورژی برای همه**» گرفته است. در این مجموعه کتاب‌ها تلاش شده است تا نکته‌های بنیادی و کاربردی متالورژی به شیوه‌ای ساده، روان و با کیفیت علمی، متنی و تصویری بالا در اختیار همه خوانندگان -به ویژه مهندسان و دانشجویان رشته‌های مهندسی- قرار گیرد. کتاب «**دانش مواد**» دومین شماره از این مجموعه کتاب‌ها است که امید می‌رود برای همه خوانندگان سودمند باشد.

گروه انتشارات شرکت مهندسی آرتا پژوهش کاوه

شهریور ۱۳۹۱ خورشیدی

سخن نویسندگان

«هم‌زمان با گسترش دایره دانش ما، تاریکی در برگیرنده این دایره نیز گسترده‌تر می‌شود.»
اینشتین

انسان‌ها با مواد گوناگونی سر و کار دارند که کارهای روزانه خود را به کمک آنها پیش برند. شناخت مواد، نخستین دانشی است که آدمی با به کار گیری سنگ و چوب بدان دست یافته و برای برآورده ساختن نیازهای خود، در گسترش آن کوشیده است. امروزه نیز انسان پیشرفته در تلاش است تا کاربردهای تازه‌ای برای مواد نو (همچون نیمه‌رساناها، مواد نانو و مواد زیست سازگار) بیابد. از این رو، شاخه‌ای از دانش‌های مهندسی با نام «مهندسی و علم مواد» پایه‌گذاری شده است که به صورت ویژه به مفهوم‌های بنیادی و کاربردی این مواد می‌پردازد. بر کسی پوشیده نیست که افزون بر متخصصان رشته مهندسی مواد، کسانی هم که با رشته‌های دیگر مهندسی یا حتی پزشکی و هنر سر و کار داشته باشند، به فراخور فعالیت خود به آگاهی درباره مواد و کاربردهای آن نیاز دارند. اهمیت دانش مواد و گستره کاری آن، پژوهش‌گران و نویسندگان بسیاری را بر آن داشته است که با رویکردهای گوناگون در این زمینه قلم‌فرسایی کنند. بخش بزرگی از این کتاب‌ها به شکل تخصصی درباره مواد گوناگونی چون فلزها، آلیاژها و سرامیک‌ها نوشته شده است. تلاش‌های انجام گرفته در راستای نگارش این کتاب‌ها همگی درخور ستایش است ولی گاهی زیاد بودن حجم نوشتارها و پیچیدگی برخی نکته‌ها، خواننده تازه کار را با سردرگمی روبرو می‌کند. این مساله، نویسندگان را بر آن داشت تا کتاب «دانش مواد» را با یک رویکرد تازه در ارایه مفهوم‌های کلیدی، پرهیز از پیچیدگی‌های نوشتاری و بیان دستاوردهای نوین بنگارند. از این رو، کتاب پیش رو به

نکته‌های بنیادی دانش مواد از جمله بلور شناسی و بررسی ویژگی‌ها و ارزیابی مواد گوناگون به ویژه فلزها و آلیاژها و اندکی نیز به مواد مهندسی دیگر - در چارچوب هشت فصل می‌پردازد. این کتاب به عنوان دومین شماره از مجموعه کتاب‌های «متالورژی برای همه» در قالب یک کار گروهی پیوسته و هم‌زمان با چند کتاب دیگر به نگارش درآمد. از آن جمله می‌توان به کتاب‌های «تاریخچه متالورژی»، «آلیاژهای صنعتی» و «فرآیندهای تولید» اشاره کرد که این کتاب در اصل، پیش‌نیازی برای کتاب‌های آلیاژهای صنعتی و فرآیندهای تولید است. بهره‌مندی از دانش نویسندگان کتاب‌های دیگر در نگارش این کتاب، به پویایی، دقت و سرعت پیشرفت کار کمک شایانی نمود. از این رو نویسندگان بر خود بایسته می‌دانند تا از همکاری و پشتیبانی این عزیزان به ویژه جناب آقای مهندس علی دلبری و جناب آقای مهندس بهزاد نایبی سپاس‌گزاری نمایند. همچنین از شرکت آرتا پژوهش کاوه به سبب مدیریت پروژه، ویراستاری، کشیدن یک‌دست شکل‌ها و صفحه‌آرایی کتاب و همچنین از سرکار خانم لیلی قاسمی به خاطر طراحی زیبا و نوآورانه جلد کتاب قدردانی می‌شود.

نویسندگان

شهریور ۱۳۹۱ خورشیدی

فهرست

۱	پیش‌گفتار
	فصل ۱: ساختمان اتم
۷	۱-۱- دیباچه
۷	۱-۲- عدد اتمی و عدد جرمی
۸	۱-۳- عددهای کوانتومی
۹	۱-۴- نوارهای انرژی
۱۱	۱-۵- پیوندهای شیمیایی
	فصل ۲: بلور شناسی
۱۵	۲-۱- دیباچه
۱۵	۲-۲- بلور و نابلور
۱۷	۲-۳- شبکه‌های بلوری
۲۳	۲-۴- نام‌گذاری جهت‌ها و صفحه‌های بلوری
۲۷	۲-۵- چگالی بلورها
۳۰	۲-۶- عیب‌های شبکه بلوری
	فصل ۳: آلیاژها
۳۷	۳-۱- دیباچه
۳۷	۳-۲- تعریف محلول جامد
۳۸	۳-۳- تفاوت محلول با مخلوط
۳۸	۳-۴- ریزساختار

- ۳-۵- نمودارهای فازی ۳۹
- ۳-۵-۱- انواع دگرگونی‌ها در نمودارهای فازی ۳۹
- ۳-۵-۲- نمودار فازی آهن- کربن (آلیاژهای آهنی) ۵۳

فصل ۴: آزمون‌های مکانیکی

- ۴-۱- دیباچه ۶۳
- ۴-۲- آزمون کشش ۶۳
- ۴-۳- آزمون فشار ۶۹
- ۴-۴- آزمون‌های سختی سنجی ۶۹
- ۴-۵- آزمون ضربه ۷۳
- ۴-۶- آزمون خزش ۷۴
- ۴-۷- آزمون خستگی ۷۶

فصل ۵: سازوکارهای تغییر شکل و استحکام بخشی در مواد فلزی

- ۵-۱- دیباچه ۷۹
- ۵-۲- سازوکارهای تغییر شکل ۷۹
- ۵-۳- سازوکارهای استحکام بخشی ۸۲

فصل ۶: عملیات حرارتی

- ۶-۱- دیباچه ۸۹
- ۶-۲- عملیات حرارتی فولادها ۸۹

فصل ۷: خوردگی

- ۷-۱- دیباچه ۹۷
- ۷-۲- الکتروشیمی خوردگی ۹۷
- ۷-۳- انواع خوردگی ۹۹
- ۷-۴- روش‌های پیشگیری از خوردگی ۱۰۳

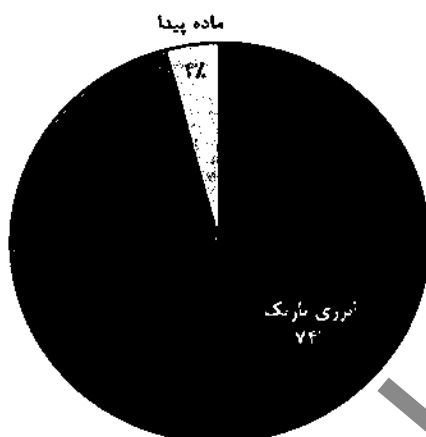
فصل ۸: مواد مهندسی دیگر

- ۸-۱- سرامیک‌ها ۱۰۷
- ۸-۲- بَسپارها ۱۱۴
- ۸-۳- چند سازه‌ها ۱۲۲
- ۸-۴- فوم‌ها ۱۲۷

پیش‌گفتار

مجموعه مواد پیدا (شناسایی شده) مانند گازها، ستارگان، سیاره‌ها، کهکشان‌ها و هر آنچه که آدمی روی کره زمین و در زندگی روزمره خود با آن سروکار دارد، تنها ۴ درصد از کل کیهان را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). یافته‌های اخیر پژوهش‌گران با بهره‌گیری از شیوه‌های نوین ستاره‌شناسی، وجود پدیده‌های رمزآلودی چون ماده تاریک و انرژی تاریک را به اثبات رسانده است. ماده تاریک که نزدیک به ۲۲ درصد از جهان را در بر می‌گیرد، ماده‌ای فرضی است که از خود نوری گسیل نمی‌کند و همچنین نور را بازتاب نمی‌دهد. از این رو، ماده تاریک را نمی‌توان دید ولی از روی اثرهای گرانشی آن بر ستاره‌ها و کهکشان‌ها، به وجودش می‌توان پی برد. انرژی تاریک نیز که نزدیک به ۷۴ درصد از گیتی را تشکیل می‌دهد، گونه‌ای انرژی فرضی و شگفت‌انگیز است که بر نرخ گسترش جهان می‌افزاید. هر چند دانشمندان توانسته‌اند وجود ماده تاریک و انرژی تاریک را به اثبات برسانند ولی هنوز توضیح روشنی درباره این پدیده‌ها ارائه نشده است. این کتاب، پیش‌درآمدی است بر آنچه که دانش بشر تا به امروز توانسته است به بخش کوچکی از ۴ درصد از جهان پیدا، آگاهی یابد.

آدمی در گذشته‌های بسیار دور، ابزارهای مورد نیاز خود را از سنگ می‌ساخت ولی با تولید مفرغ یا برنز (آلیاژ مس و قلع) در حدود ۶۰۰۰ سال پیش، عصر سنگ به پایان رسید. از برنز می‌توان به روش‌های آهنگری و ریخته‌گری، ابزارها و قطعه‌های گوناگون ساخت و با افزودن عنصرهای دیگر،

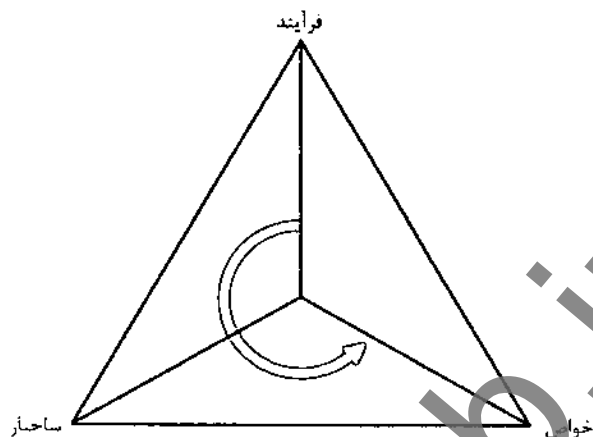


شکل (۱): سهم ماده پید، ماده تاریک و انرژی تاریک از کیهان.

آن را سخت‌تر کرد. نزدیک به ۳۰۰۰ سال پیش، عصر آهن آغاز شد و کاربرد آن تا به امروز نیز ادامه داشته است. هم‌اکنون فولاد (آلیاژ آهن و کربن) به دلیل تنوع، ویژگی‌ها و قیمت مناسبی که دارد، گزینه نخست در ساخت سازه‌ها و تجهیزات است. البته مواد دیگری مانند سرامیک‌ها، بسپارها (پلیمرها)، نیمه رساناها، چند سازه‌ها (کامپوزیت‌ها) و فوم‌ها (مواد متخلخل) نیز کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند.

در گستره پهناوری از مواد پیش روی مهندسان، تنها راه انتخاب یک ماده مناسب برای هدفی مشخص، شناخت ساختار مواد گوناگون و ارتباط آن با خواص، فرایندها و ویژگی‌های کارکردی آنها است. دانش مواد به بررسی و شناخت رابطه میان ساختار، خواص، فرایندها و کارایی مواد می‌پردازد (شکل ۲). ساختار مواد، تاثیر مستقیمی بر خواص آن دارد و با روش‌های مختلف فرآوری، ساختارهای گوناگونی در ماده ایجاد می‌شود.

مواد از دیدگاه اثرپذیری خواص از ساختار، به دو گروه دارای خواص حساس و غیر حساس به ساختار دسته‌بندی می‌شوند. برخی خواص مانند چگالی، ضریب انبساط گرمایی، گرمای ویژه و مدول کشسان، کمابیش مستقل از ساختار ماده هستند. برای نمونه چگالی آهن خالص، فولاد کم کربن، فولاد پر کربن، فولاد کم‌آلیاژ و فولاد پرآلیاژ، همگی در بازه ۷/۸ تا ۷/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب و مدول کشسان آنها در بازه ۲۰۳ تا ۲۱۵ گیگاپاسکال قرار دارد. از سوی دیگر، خواصی مانند استحکام تسلیم و استحکام کششی، شکل‌پذیری، چقرمگی شکست و مقاومت به خستگی و خزش به شدت تحت تاثیر تاریخچه عملیات حرارتی و کار مکانیکی انجام شده روی ماده (یا به



شکل (۲): سه عامل اثرگذار در دانش مواد: ساختار، فرآیند و خواص مواد.

سخن دیگر تحت تاثیر ساختار نهایی ماده قرار دارند. بنابراین، تنها با دانستن ترکیب شیمیایی یک ماده نمی‌توان این خواص را پیش‌بینی کرد.

مهم‌ترین هدف در بررسی مواد، رسیدن به جایی است که با شناخت کافی از مواد پیرامون، بتوان مادی را برای به کارگیری در یک مورد خاص تعیین کرد و سرانجام از میان آنها یکی را برگزید. در گام بعد، بهبود خواص و معرفی مادی با ویژگی‌های برتر در دستور کار قرار دارد.

دلیل مهم دیگر شناخت ویژگی‌های مواد، پیوند تنگاتنگ آنها با جنبه‌های اقتصادی تولید است. هزینه‌های لازم برای آغاز به کار یک فعالیت صنعتی به دو دسته تقسیم می‌شوند: هزینه‌های سرمایه‌گذاری که برای ساخت و راه‌اندازی آن مجموعه صرف می‌شود و هزینه‌های عملیاتی که به هنگام بهره‌برداری به مجموعه تحمیل می‌شود. اگر مهندس طراح شناخت کاملی از ویژگی‌های مواد به کار رفته در ساخت مجموعه داشته باشد، با انتخاب درست مواد می‌تواند یک موازنه منطقی میان این هزینه‌ها برقرار سازد. برای نمونه، گزینه فولاد زنگ‌نزن برای ساخت یک سازه در معرض خوردگی، با گزینه فولاد ساده برای ساخت همان سازه مقایسه می‌شود. سرمایه لازم برای خرید فولاد زنگ‌نزن، بسیار بیشتر از فولاد ساده است ولی از سوی دیگر استفاده از فولاد ساده، نیازمند به کارگیری یک سامانه حفاظت از خوردگی است که همین امر، هزینه‌های جاری مجموعه را افزایش خواهد داد.

گروه بندی مواد

مواد با توجه به کاربرد مهندسی آنها به چند گروه اصلی فلزها، سرامیک‌ها، بسپارها، چند سازه‌ها و

قوم‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند. البته گروه‌های دیگری مانند نیمه رساناها و زیست مواد (بیو مواد) را نیز می‌توان به این دسته‌بندی افزود (شکل ۳). در ادامه توضیح کوتاهی در مورد هر یک از گروه‌های یاد شده آورده می‌شود ولی در فصل‌های پیش رو، بررسی بیشتری روی آنها انجام خواهد گرفت.

(الف) فلزها

فلزها، موادی با استحکام بالا هستند که کاربرد گسترده‌ای در سازه‌های مختلف و قطعه‌های گوناگون پیدا کرده‌اند. فلزها چکش‌خوار هستند و از انعطاف پذیری خوبی برخوردارند. رسانایی الکتریکی و گرمایی بالا از ویژگی‌های مهم فلزها است. بسیاری از ویژگی‌های بی‌همتای فلزها، به وجود الکترون‌های آزاد در ساختار آنها برمی‌گردد که در هیچ کدام از گروه‌های دیگر مواد یافت نمی‌شود. فلزها نور را از خود عبور می‌دهند و در صورت صیقلی شدن سطح، دارای جلای فلزی می‌شوند.

(ب) سرامیک‌ها

بیشتر سرامیک‌ها ترکیبی از مواد فلزی و نافلزی هستند. اکسیدها، نیتریدها و کاربیدها از سرامیک‌هایی به شمار می‌روند که به صورت شن، ماسه، سیمان و شیشه در محیط پیرامون آدمی دیده می‌شوند. سرامیک‌ها کمابیش رسانایی گرمایی و الکتریکی ندارند، ترد و شکننده هستند و استحکام فشاری بالایی دارند.

(پ) بسپارها

بسپارها مولکول‌های رشته‌ای دراز بر پایه کربن و هیدروژن هستند که اغلب به صورت مواد لاستیکی و پلاستیکی تولید می‌شوند. ویژگی اصلی بسپارها انعطاف‌پذیری، سبک بودن و مقاومت به خوردگی آنها است. امروزه گستره وسیعی از خواص در بسپارهای نوین دیده می‌شود، به گونه‌ای که بسپارهایی با استحکام در حد مواد فلزی، بسپارهای رسانا و بسپارهای مقاوم به گرما تولید شده است.

(ت) چند سازه‌ها

همان گونه که از نام این مواد پیدا است، چند سازه‌ها ترکیبی از سه گروه پیشین مواد هستند. فاز زمینه چند سازه می‌تواند فلز، بسپار یا سرامیک باشد که با افزودن فاز دوم به صورت ذره‌ای، رشته‌ای یا حجمی، ترکیبی از ویژگی‌های هر دو فاز در چند سازه دیده می‌شود. چند سازه‌ها از

دیرباز مورد استفاده آدمی بوده‌اند و نمونه آن، کاهگل است که از گل به عنوان ماده زمینه و رشته‌های کاه به عنوان جزء دوم ساخته می‌شود. وجود رشته‌های کاه، موجب افزایش استحکام و جلوگیری از پیدایش ترک در دیوارهای کاهگلی می‌شود.

(ث) فوم‌ها

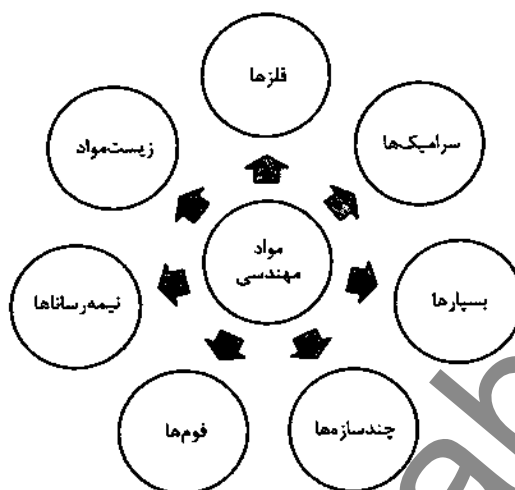
فوم، ماده‌ای است که با حبس شدن بسته‌های گازی در مایع یا جامد به وجود می‌آید. اسفنج، سنگ پا و کت صابون، نمونه‌هایی از مواد فومی به شمار می‌روند. حجم گاز در این مواد، بسیار زیاد است و حباب‌های گازی توسط لایه‌های نازکی از مواد مایع یا جامد، از یکدیگر جدا می‌افتند. جنس فوم می‌تواند فلزی، سرامیکی یا پلاستیکی باشد. نسبت استحکام به وزن و مقاومت به ضربه بالا، قابلیت جذب لرزش و صدا، امکان بازیافت دوباره و نارسانایی گرمایی از جمله ویژگی‌های این مواد مهندسی است.

(ج) نیمه رساناها

رسانایی الکتریکی نیمه رساناها به دلیل ساختار ویژه آنها، میان مواد رسانا و نارسانا قرار دارد. این مواد، پایه پیدایش صنعت الکترونیک نوین هستند که پیشرفت رادیو، تلفن، تلویزیون و رایانه را به دنبال داشته است. از شناخته شده‌ترین قطعه‌های الکترونیکی که بر پایه نیمه رساناها ساخته شده‌اند، می‌توان به ترانزیستورها، پیل‌های خورشیدی و دیودها اشاره کرد.

(چ) زیست مواد

زیست مواد در واقع، گروه مستقلی از مواد محسوب نمی‌شوند و دلیل دسته‌بندی جداگانه آنها، به سبب کاربردهای ویژه آنها در مهندسی پزشکی است. از این مواد، برای جایگزین کردن اندام‌های موجودهای زنده، کمک به کارایی بهتر اعضای بدن یا کاربردهای درمانی دیگر استفاده می‌شود. جنس این مواد می‌تواند فلز، سرامیک، پلاستیک یا چند سازه باشد که افزون بر ویژگی‌های کاربردی معمول، خواص دیگری از جمله سازگاری با بدن موجود زنده از آنها انتظار می‌رود. اندام‌های مصنوعی، پروتزها، ایمپلنت‌ها، ضربان‌سازهای قلبی و تیغ‌های جراحی از این گروه به شمار می‌روند. بخش دیگری از زیست مواد که شامل پلاستیک‌ها و سرامیک‌های زیست سازگار می‌شود، در سامانه‌های دارو رسانی کاربرد دارند. پزشکان با به کار گیری سلول‌های بنیادی و ساخت بافت‌های طبیعی جایگزین روی داربست‌های مصنوعی، اقدام به تولید بافت‌های گوناگون همچون پوست و غضروف کرده‌اند. ساخت بافت‌های پیچیده‌تر و اندام‌هایی مانند کبد، نیز در دست پژوهش است.



شکل (۳) گروه بندی مواد از دیدگاه مهندسی.