

مبانی علم و مهندسی مواد

جلد اول: علم مواد ویرایش سوم

پدیدآورندگان

ویلیام دی کلیستر

استاد وابسته مهندسی مواد

دانشگاه یوتا

دیوید جی رتویش

استاد مهندسی شیمی و پوشیمی

دانشگاه آیوا

برگردانندگان

محمد رضا طرقي نژاد

استاد دانشکده مهندسی مواد

دانشگاه صنعتی اصفهان

حامد عسگری

پژوهشگر ارشد آزمایشگاه تولید افزایشی چند مقیاسی

دانشگاه واترلو کانادا



انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان

شماره کتاب ۷۱

گروه فنی و مهندسی ۳۵

مبانی علم و مهندسی مواد

پدیدآورندگان	ویلیام دی کلیستر جی آر و دیوید جی رتویش
برگردانندگان	دکتر محمدرضا طرقي نژاد و مهندس حامد عسگری
صفحه آرا	عفت صابری
طراح جلد	بهناز نجفی فر
لیتوگرافی، چاپ و صحافی	چاپخانه دانشگاه صنعتی اصفهان
ناشر	انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان
چاپ هفتم	تابستان ۱۴۰۱
شابک دوره	۹۷۸-۹۶۴-۸۴۷۶-۵۹-۰
شابک جلد اول	۹۷۸-۹۶۴-۸۴۷۶-۶۰-۶
شمارگان	۲۰۰۰ جلد
قیمت	۱۹۰۰۰۰۰ ریال

سرشناسه	William D. Callister, ۱۹۴۰ - م
عنوان و نام پدیدآور	مبانی علم و مهندسی مواد
مشخصات نشر	اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان، انتشارات، ۱۳۹۳
مشخصات ظاهری	ج.
شابک	ج. ۱: 978-964-8476-60-6؛ ج. ۲: 978-964-8476-59-0
وضعیت فهرست نویسی	فیپای مختصر
یادداشت	این مدرک در آدرس http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است.
یادداشت	عنوان اصلی:
	Fundamentals of materials science and engineering: an, 4th ed, 2012.
شناسه افزوده	رتویش، دیوید جی.
شناسه افزوده	David G. Rethwisch,
شناسه افزوده	طرقي نژاد، محمدرضا، مترجم
شناسه افزوده	عسگری مصلح آبادی، حامد، ۱۳۶۰ - مترجم
شماره کتابشناسی ملی	۳۷۷۴۳۲۶

حق چاپ برای انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان محفوظ است.

اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان - انتشارات کدپستی ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱ تلفن: ۳۳۹۱۲۹۵۲ (۰۳۱) دورنگار: ۳۳۹۱۲۵۲۸ برای خرید اینترنتی کلیه کتابهای منتشره انتشارات می‌توانید به وبگاه <http://publication.iut.ac.ir> مراجعه و یا مستقیماً از کتابفروشی انتشارات واقع در کتابخانه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان (تلفن ۳۳۹۱۳۹۵۲) خریداری فرمائید.

تقدیم به همسر، شایان و شرمین
که همواره یاریم نموده‌اند.
(م.ر. طوقی نژاد)

و

تقدیم به همه کسانی که دوستان دارم.
(ح. عسگری)

www.ketab.ir

Values of Selected Physical Constants

Quantity	Symbol	SI Units	cgs Units
Avogadro's number	N_A	6.023×10^{23} molecules/mol	6.023×10^{23} molecules/mol
Boltzmann's constant	k	1.38×10^{-23} J/atom-K	1.38×10^{-16} erg/atom-K 8.62×10^{-5} eV/atom-K
Bohr magneton	μ_B	9.27×10^{-24} A-m ²	9.27×10^{-21} erg/gauss ^a
Electron charge	e	1.602×10^{-19} C	4.8×10^{-10} statcoul ^b
Electron mass	—	9.11×10^{-31} kg	9.11×10^{-28} g
Gas constant	R	8.31 J/mol-K	1.987 cal/mol-K
Permeability of a vacuum	μ_0	1.257×10^{-6} henry/m	unity ^a
Permittivity of a vacuum	ϵ_0	8.85×10^{-12} farad/m	unity ^b
Planck's constant	h	6.63×10^{-34} J-s	6.63×10^{-27} erg-s 4.13×10^{-15} eV-s
Velocity of light in a vacuum	c	3×10^8 m/s	3×10^{10} cm/s

^a In cgs-emu units.

^b In cgs-esu units.

Unit Abbreviations

A = ampere	in. = inch	N = newton
Å = angstrom	J = joule	nm = nanometer
Btu = British thermal unit	K = degrees Kelvin	P = poise
C = Coulomb	kg = kilogram	Pa = Pascal
°C = degrees Celsius	lb _f = pound force	s = second
cal = calorie (gram)	lb _m = pound mass	T = temperature
cm = centimeter	m = meter	μm = micrometer
eV = electron volt	Mg = megagram	(micron)
°F = degrees Fahrenheit	mm = millimeter	W = watt
ft = foot	mol = mole	psi = pounds per square
g = gram	MPa = megapascal	inch

SI Multiple and Submultiple Prefixes

Factor by Which Multiplied	Prefix	Symbol
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^{-2}	centi ^a	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p

^a Avoided when possible.

Element	Symbol	Atomic Number	Atomic Weight (amu)	Density of Solid, 20°C (g/cm ³)	Crystal Structure, 20°C	Atomic Radius (nm)	Ionic Radius (nm)	Most Common Valence	Melting Point (°C)
Aluminum	Al	13	26.98	2.71	FCC	0.143	0.053	3+	660.4
Argon	Ar	18	39.95	—	—	—	—	Inert	-189.2
Barium	Ba	56	137.33	3.5	BCC	0.217	0.136	2+	725
Beryllium	Be	4	9.012	1.85	HCP	0.114	0.035	2+	1278
Boron	B	5	10.81	2.34	Rhomb.	—	0.023	3+	2300
Bromine	Br	35	79.90	—	—	—	0.196	1-	-7.2
Cadmium	Cd	48	112.41	8.65	HCP	0.149	0.095	2+	321
Calcium	Ca	20	40.08	1.55	FCC	0.197	0.100	2+	839
Carbon	C	6	12.011	2.25	Hex.	0.071	~0.016	4+	(sublimes at 3367)
Cesium	Cs	55	132.91	1.87	BCC	0.265	0.170	1+	28.4
Chlorine	Cl	17	35.45	—	—	—	0.181	1-	-101
Chromium	Cr	24	52.00	7.19	BCC	0.125	0.063	3+	1875
Cobalt	Co	27	58.93	8.9	HCP	0.125	0.072	2+	1495
Copper	Cu	29	63.55	8.94	FCC	0.128	0.096	1+	1085
Fluorine	F	9	19.00	—	—	—	0.133	1-	-220
Gallium	Ga	31	69.72	5.90	Ortho.	0.122	0.062	3+	29.8
Germanium	Ge	32	72.64	5.32	Dia. cubic	0.122	0.053	4+	937
Gold	Au	79	196.97	19.32	FCC	0.144	0.137	1+	1064
Helium	He	2	4.003	—	—	—	—	Inert	-272 (at 26 atm)
Hydrogen	H	1	1.008	—	—	—	0.154	1+	-259
Iodine	I	53	126.91	4.93	Ortho.	0.136	0.220	1-	114
Iron	Fe	26	55.85	7.87	BCC	0.124	0.077	2+	1538
Lead	Pb	82	207.2	11.35	FCC	0.175	0.120	2+	327
Lithium	Li	3	6.94	0.534	BCC	0.152	0.068	1+	181
Magnesium	Mg	12	24.31	1.74	HCP	0.160	0.072	2+	649
Manganese	Mn	25	54.94	7.44	Cubic	0.112	0.067	2+	1244
Mercury	Hg	80	200.59	—	—	—	0.110	2+	-38.8
Molybdenum	Mo	42	95.94	10.22	BCC	0.136	0.070	4+	2617
Neon	Ne	10	20.18	—	—	—	—	Inert	-248.7
Nickel	Ni	28	58.69	8.90	FCC	0.125	0.069	2+	1455
Niobium	Nb	41	92.91	8.57	BCC	0.143	0.069	5+	2468
Nitrogen	N	7	14.007	—	—	—	0.01-0.02	5+	-209.9
Oxygen	O	8	16.00	—	—	—	0.140	2-	-218.4
Phosphorus	P	15	30.97	1.82	Ortho.	0.109	0.035	5+	44.1
Platinum	Pt	78	195.08	21.45	FCC	0.139	0.080	2+	1772
Potassium	K	19	39.10	0.862	BCC	0.231	0.138	1+	63
Silicon	Si	14	28.09	2.33	Dia. cubic	0.118	0.040	4+	1410
Silver	Ag	47	107.87	10.49	FCC	0.144	0.126	1+	962
Sodium	Na	11	22.99	0.971	BCC	0.186	0.102	1+	98
Sulfur	S	16	32.06	2.07	Ortho.	0.106	0.184	2-	113
Tin	Sn	50	118.71	7.27	Tetra.	0.151	0.071	4+	232
Titanium	Ti	22	47.87	4.51	HCP	0.145	0.068	4+	1668
Tungsten	W	74	183.84	19.3	BCC	0.137	0.070	4+	3410
Vanadium	V	23	50.94	6.1	BCC	0.132	0.059	5+	1890
Zinc	Zn	30	65.41	7.13	HCP	0.133	0.074	2+	420
Zirconium	Zr	40	91.22	6.51	HCP	0.159	0.079	4+	1852

مقدمه نویسندگان

در چاپ سوم، اهداف و راه کارهای تدریس علم و مهندسی مواد، که در چاپ‌های قبل ارائه شده‌اند، حفظ شده و ادامه داده شده‌اند. اولین و مهم‌ترین هدف، ارائه مبانی بنیادین برای دانشجویانی است که به تازگی دروس ریاضی، فیزیک و شیمی خود را به پایان رسانیده‌اند. جهت نیل به این هدف، از عبارات و تعاریفی استفاده شده که برای دانشجویانی که اولین بار با اصول علم و مهندسی مواد مواجه می‌شوند آشنا بوده و همچنین تعاریف و عبارات ناآشنا نیز توضیح داده شده است.

هدف دوم، ارائه موضوع به شیوه‌ای منطقی، از مفاهیم ساده به سمت مفاهیم پیچیده‌تر است. هر فصل، براساس مفاهیم و محتوای فصل قبل تنظیم شده است.

هدف سوم، یا فلسفه سوم، آن است که موضوعات یا مفاهیم به صورت کافی توضیح داده شوند به طوری که دانشجویان این مفاهیم را درک کرده و نیازی به مراجعه به سایر منابع و مراجع نداشته باشند؛ در برخی موارد، از حالات عملی استفاده شده است. مباحث نیز در حد امکان شفاف بوده و در سطح مناسبی از درک دانشجویان می‌باشد.

هدف چهارم، استفاده از مواردی است که در فرآیند یادگیری مفاهیم مؤثر هستند:

- تصاویر متعدد، که رنگی هستند و می‌توانند در درک بیشتر فرایندها مؤثر باشند.
- اهداف آموزشی، که به دانشجویان نشان می‌دهد در هر فصل چه مواردی از اهمیت بیشتری برخوردار است.
- بخش‌هایی نظیر «علت مطالعه...» و «مواد مهم» نیز در رابطه با مباحث قرار داده شده‌اند.
- عبارات کلیدی و توضیح روابط کلیدی که در حاشیه مباحث، برجسته شده‌اند.
- پرسش‌های انتهای فصل و مسأله‌های کاربردی که جهت توسعه و افزایش درک دانشجویان نسبت به مفاهیم و بالا بردن مهارت‌های آنها طراحی شده است.
- پاسخ به مسأله‌های انتخابی، که جهت آگاهی دانشجویان از صحت برخی جواب‌ها قرار داده شده است.

- خلاصه، لیست نشانه‌ها و مراجع که جهت درک بیشتر مفاهیم و موضوعات می‌باشند.

هدف پنجم، افزایش راندمان آموزش و یادگیری، با استفاده از تکنولوژی‌های جدیدی است که امروزه در دسترس اساتید و دانشجویان قرار دارد.

دو دسته‌بندی کلی در زمینه علم و مهندسی مواد وجود دارد: یک دسته‌بندی «متداول» بوده و دیگری «اصلی و ریشه‌ای» می‌باشد. در روش «ریشه‌ای»، یک ساختار، مشخصه و یا خاصیت معین برای هر سه نوع ماده، قبل از ورود به بحث درباره سایر ساختار، مشخصه، خاصیت ارائه می‌شود. و در این کتاب نیز به همین گونه عمل شده است:



برخی از اساتید، چنین سازماندهی را به دلایل زیر ترجیح می‌دهند:

(۱) دانشجویان می‌توانند تفاوت‌های ساختاری و خواص انواع مختلف مواد را درک کنند، و (۲) وقتی صحبت از خواص و فرآوری می‌شود، انواع مختلف مواد باید بررسی شوند.

در روش «متداول» ساختارها، مشخصه‌ها و خواص فلزات در ابتدا بررسی شده و سپس مباحث مشابهی برای سرامیک‌ها و پلی‌مرها آورده می‌شود. کتاب دیگری از همین نویسندگان، با نام «علم و مهندسی مواد»، چاپ هفتم، بدین صورت سازماندهی شده است.

نکات جدید در این چاپ

محتوای جدید - تصحیح شده

برخی تغییرات مهم در این چاپ اعمال شده است. یکی از این تغییرات، افزودن برخی بخش‌های جدید و تصحیح یا تقویت سایر بخش‌هاست. مباحث و بخش‌های جدید در این چاپ عبارت‌اند از:

- نمودارهای فازي تک جزیی (بخش ۱۰-۶)
- آهن گرافیتی فشرده (بخش ۱۳-۲)
- ریخته‌گری بدون حفره (بخش ۱۴-۳)
- وابستگی دمایی عیوب فرانکل و شاتکی (بخش ۵-۳)
- تبلور شیشه - سرامیک، بر حسب نمودارهای استحاله سرمایشی پیوسته (بخش ۱۳-۵)
- نفوذپذیری در پلی‌مرها (بخش ۶-۷)

بخش‌های تصحیح و تقویت شده نیز عبارت‌اند از:

- در فصل اول، در زمینه انواع مواد، مقایسه‌هایی به صورت نمودارهای میله‌ای انجام شده است.
- در بخش ساختارهای پلی‌مری و عبارات مربوطه، تصحیحاتی انجام شده است (بخش‌های ۴-۳ تا ۴-۸).
- حذف بحث در مورد مدل فرینجند-میسل (در بخش ۴-۱۲ چاپ دوم).
- بحث بیشتر در مورد عیوب پلی‌مرها.
- مقایسه (۱) محدوده اندازه ابعاد برای عناصر ساختاری مختلف، و (۲) محدوده قدرت تفکیک برای روش‌های میکروسکوپی مختلف (بخش ۵-۱۲).
- به روزرسانی روش‌های آزمایش سختی (بخش ۷-۱۶).

- تصحیح بحث در مورد بردارهای برگرز (بخش ۵-۸).
- بحث جدید پیرامون دلایل وابستگی دمای تبلور مجدد به خلوص فلز (بخش ۸-۱۳).
- بحث در مورد تغییر شکل پلی مرهای نیمه بلوری (بخش ۸-۱۷).
- انتقال برخی از جزییات مکانیک شکست (بخش ۹-۵) به بخش Web Module.
- بحث مفصل در مورد آزمون های غیرمخرب (بخش ۹-۵).
- انتقال برخی جزییات در زمینه شروع و اشاعه ترک (بخش ۹-۱۲) و بخش مربوط به نرخ اشاعه ترک (بخش ۹-۱۲) به Web Module.
- بحث تکمیلی در زمینه چسب های پلی مری (بخش ۱۳-۱۵).
- به روزرسانی بحث درباره فرایند ساخت شیشه ورقی شکل (بخش ۱۴-۷).
- تصحیح بحث پلی مریزاسیون (بخش ۱۴-۱۱) و ساخت فیبرها و فیلم ها (بخش ۱۴-۱۵).
- تصحیح بحث تجزیه پلی مرها (بخش ۱۶-۱۲).

مواد مهم

در بخش «مواد مهم»، در مورد مواد مشهور و کاربرد آنها بحث شده است. این بخش، مرتبط با مباحث فصل ها بوده و شامل موارد زیر است:

- بطری نوشابه های گازدار
- آب (افزایش حجم آن در اثر انجماد)
- قلع (دگرگونی آلومینیوم آن)
- کاتالیزورها (و عیوب سطحی)
- آلومینیوم در اتصالات مدارهای مجتمع
- لحیم های بدون سرب
- آلیاژهای حافظه دار
- آلیاژهای فلزی مورد استفاده در سکه های اروپایی
- نانولوله های کربنی
- سرامیک های پیزوالکتریک
- فیلم های پلی مری انقباضی
- توپ های بیلارد فنولیک
- نانو کامپوزیت ها در توپ های تنیس
- سیم های الکتریکی آلومینیومی
- آلیاژهای اینوار
- آلیاژ آهن - سیلیسیم مورد استفاده در هسته های ترانسفورماتور
- دیودهای منتشرکننده نور

بخش های خاص در وبسایت کتاب

برخی بخش های خاص در وبسایت کتاب وجود دارد و قسمت هایی از کتاب را، که صرفاً به صورت عنوان در کتاب ذکر شده، توضیح داده است که مرتبط با چهارشاخه مهندسی یعنی مکانیک، عمران، شیمی و برق است و تا حدودی مواد زیستی را نیز در بر می گیرد. همچنین بسیاری از موارد عملی مطالعه شده در بخش «ملاحظات طراحی و انتخاب مواد» در یکی از این بخش ها دیده می شود.

تغییرات چارچوب مطالب

یک سری تغییرات دیگر نیز، نسبت به چاپ دوم، صورت گرفته است. اول آن که، هیچ گونه لوح فشرده ای همراه کتاب نیست؛ تمام بخش های الکترونیکی در وبسایت کتاب موجود است (www.wiley.com/college/callister). همچنین، از آنجایی که پنج فصل از چاپ دوم به صورت الکترونیکی است، در چاپ سوم، تمام فصل ها به صورت چاپی (در کتاب) گنجانده شده است. علاوه بر این، تقریباً نیمی از مسأله های انتهای فصل و پرسش ها به وبسایت منتقل شده است. با این کار از حجم کتاب کاسته شده و درعین حال مسأله ها و پرسش ها در اختیار اساتید و دانشجویان قرار دارد.

منابع آموزشی برای دانشجویان

برخی عناصر آموزشی مهم دیگر نیز جهت یادگیری بهتر دانشجویان از این کتاب فراهم شده است که عبارت اند از:

۱- **VMSE: علم و مهندسی مواد مجازی.** این بخش، تعمیم یافته برنامه نرم افزاری است که در چاپ قبل نیز وجود داشت. این بخش، شامل شبیه سازی های کامپیوتری و تصاویر متحرکی است که درک مفاهیم کلیدی علم مواد را افزایش داده و همچنین بانک اطلاعاتی خوبی در زمینه خواص / هزینه مواد است. دانشجویان می توانند با وارد کردن کد ثبت نام (که در جلد کتاب موجود است) به **VMSE** دسترسی داشته باشند.

در کتاب، هر جا که مطلبی در **VMSE** موجود باشد، توسط یک علامت در حاشیه مشخص شده است که به صورت زیر می باشد:



نمودارهای فازی



بلورشناسی و ساختمان بلوری فازی



نفوذ



ساختمان های بلوری سرامیکی



آزمون کشش



ساختارهای پلی مری



استحکام دهی محلول جامد



نابجایی ها

۲- پاسخ به پرسش های مفهومی: دانشجویان می توانند با مراجعه به وبسایت به پاسخ صحیح پرسش ها دست یابند.

۳- دسترسی مستقیم به پرسش های خودآزمایی: در این بخش، مسأله هایی مشابه با کتاب مطرح شده است که مطابق با بخش های مختلف کتاب هستند و دانشجویان می توانند جواب یا حل مسأله را وارد کرده و فوراً از درست یا غلط بودن آن آگاهی یابند. دانشجویان می توانند از این منبع الکترونیکی جهت بررسی سطح یادگیری خود استفاده کنند.

۴- پیوست روش های آموزشی: با پاسخ دادن به یک پرسشنامه ۴۴ سؤالی، می توان از نظر استفاده کنندگان کتاب آگاهی یافت.

۵- اهداف آموزشی توسعه یافته: علاوه بر اهداف آموزشی مشخص شده در ابتدای هر فصل، لیستی از سایر اهداف نیز تهیه شده است که می تواند دانشجویان را در تمرکز بیشتر بر مطالب و عمق یادگیری آنها یاری دهد.

۶- اتصال به سایر منابع: این اتصال ها، با توجه به نرم افزارها، بانک های اطلاعاتی مختلف، اینترنت و... دسته بندی شده اند.

«سایت اساتید و مدرسان» (www.wiley.com/college/callister) برای مدرسانی که این کتاب را تدریس می‌کنند در دسترس می‌باشد. لطفاً به سایت مراجعه و ثبت‌نام کنید.

منابع موجود به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- حل مسأله‌ها: حل کامل پرسش‌ها و مسأله‌های انتهای هر فصل.
- ۲- جداول، تصاویر و شکل‌هایی که در کتاب موجود است. این تصاویر و شکل‌ها به دو صورت PDF و JPEG هستند و اساتید می‌توانند از آنها پرینت گرفته و در کلاس استفاده کنند.
- ۳- اسلایدهای PowerPoint: این اسلایدها، که توسط پیتر آندرسون (دانشگاه ایالتی اوهایو) آماده شده است، براساس موضوعات کتاب تنظیم شده و شامل مطالب کتاب و سایر منابع و همچنین تصاویر و جداول است. اساتید می‌توانند این اسلایدها را تصحیح کرده و مناسب با نیازهای کلاس تنظیم نمایند.
- ۴- لیست فعالیت‌های کلاسی و آزمایش‌ها: در این بخش به توضیح اصول و قواعد بحث شده در کتاب پرداخته می‌شود؛ مراجع نیز جهت بهره‌برداری بهتر از این بخش تهیه شده‌اند.
- ۵- راهنمای تبدیل: این راهنما، برای هر تکلیف یا سؤال (با شماره)، مشخص‌کننده مکان سؤال در چاپ قبلی و فعلی می‌باشد. برخی مسأله‌ها نیز کامل‌تر شده‌اند که در این راهنما به آنها نیز اشاره شده است.
- ۶- سرفصل‌های پیشنهادی برای رشته‌های مختلف مهندسی: اساتید می‌توانند از این بخش جهت تدریس کتاب برای شاخه‌های مختلف استفاده کنند.

WileyPLUS

این بخش، به شما اساتید امکان می‌دهد که فضایی را فراهم سازید تا دانشجویان به تجربیات کافی دست‌یافته و به حداکثر پتانسیل خود برسند. با کمک این بخش، دانشجویان آماده‌تر شده و راحت‌تر و مستعدتر به کوییزها و تکالیف می‌پردازند و منابع کامل‌تری جهت آموزش در اختیار دارند. همچنین رایانه مطالب برای شما بسیار ساده‌تر شده و سیستم ارزیابی دقیق‌تری نیز خواهید داشت و پیشرفت مطالب و کلاس را مدیریت خواهید کرد.

ویلیام دی کلیستر، جی آر
دیوید جی رتویش

پیش‌گفتار مترجمان

بسم الله الرحمن الرحيم

علم و مهندسی مواد یکی از جذاب‌ترین و کاربردی‌ترین شاخه‌های علم است که در زمینه انواع مواد مهندسی شامل فلزات، سرامیک‌ها، پلی‌مرها، مواد الکترونیکی، نیمه‌رساناها، مواد مغناطیسی، مواد نوری و مواد زیستی فعالیت می‌کند. در این رشته ارتباط میان ساختمان مواد و روش ساخت آنها با خواص و کاربرد آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کتاب حاضر یکی از مراجعی است که به‌طور گسترده در اکثر دانشگاه‌های دنیا تدریس می‌گردد. از آنجایی که این کتاب بسیار جامع و حجیم می‌باشد در دو جلد مجزا تهیه گردیده است. جلد اول مربوط به علم مواد است که شامل ۱۱ فصل است. در فصل اول به معرفی علم و مهندسی مواد می‌پردازد. در فصل دوم ساختمان اتمی و پیوندهای بین‌اتمی بحث شده و در فصل سوم به معرفی ساختمان فلزات و سرامیک‌ها پرداخته می‌شود. ساختمان پلی‌مرها نیز در فصل چهارم معرفی می‌گردند. عیوب در جامدات و نفوذ به ترتیب در فصل‌های ۵ و ۶ آورده شده‌اند. فصل‌های ۷ تا ۹ مربوط به خواص مکانیکی، تغییر شکل، مکانیزم‌های استحکام‌دهی و شکست است. نمودارها و استحاله‌های فازی نیز در فصول ۱۰ و ۱۱ بررسی می‌گردند.

جلد دوم کتاب که شامل ۷ فصل است به مواد مهندسی و خواص آنها مربوط می‌شود. فصل اول این جلد، فصل ۱۲، به خواص نوری و فصل ۱۳ به انواع مواد و کاربرد آنها اختصاص دارد. سنتز، تولید و فراوری مواد در فصل ۱۴ و کامپوزیت‌ها در فصل ۱۵ آورده شده‌اند. فصول ۱۶ تا ۱۹ به خوردگی و تخریب فلزات، خواص گرمایی، خواص مغناطیسی و خواص نوری اختصاص دارد. موضوعات اقتصادی، محیطی و اجتماعی در علم و مهندسی مواد نیز در فصل ۲۰ بحث گردیده‌اند.

کتاب فوق که ترجمه ویرایش سوم (۲۰۰۸) کتاب لاتین می‌باشد، تنها کتاب علم و مهندسی مواد در کشور است که برای درک بهتر مطالب و وضوح بیشتر شکل‌ها به صورت دو رنگ چاپ شده است. همچنین در حاشیه برخی از صفحات علامتی آمده است که مربوط به "علم و مهندسی مواد مجازی" یا (Virtual Materials Science and Engineering) است که با علامت VMSE مشخص شده است. اساتید و دانشجویان محترم می‌توانند جهت دسترسی به فایل‌های نمایشی در زمینه مطالب مربوطه، به همین قسمت در لوح فشرده همراه کتاب مراجعه نمایند. همچنین پرسش‌ها و مسأله‌های اضافی فصول به همراه پاسخ به سؤالات مفهومی نیز در لوح فشرده جمع‌آوری شده است.

برای اساتید و مدرسان محترم لوح فشرده جداگانه‌ای که شامل پاسخ تشریحی پرسش‌ها و مسأله‌های فصول، حل مسأله‌های اضافی، پاسخ به سؤالات مفهومی و اسلایدهای آموزشی تمام فصول تهیه شده است که با درخواست رسمی برای این عزیزان ارسال می‌گردد. علاوه بر موارد فوق شکل‌های ۴ رنگ نیز جهت استفاده در کلاس درس نیز در لوح فشرده قرار داده شده است.

در پایان، از خداوند بزرگ که توانایی ترجمه کتاب را به اینجانبان عطا نمود سپاسگزاریم. از خانواده‌هایمان که صبورانه صرف وقت برای ترجمه کتاب را تحمل نمودند، متشکریم. در ترجمه این کتاب از نظرات و پیشنهادهای جناب آقای دکتر فخرالدین اشرفی‌زاده استفاده شده است که بدینوسیله از ایشان تشکر و قدردانی می‌شود. از خانم‌ها مهندس سمیه پاسبانی و مهندس فریده سلیمی‌انفرد و آقایان مهندس روح‌الله جماعتی کناری، مهندس محمدرضا رضایی، مهندس سعید خادم‌زاده، مهندس آرین اقبالی، مهندس حسن زارع که زحمت بازخوانی کتاب را بر عهده گرفتند سپاسگزاریم. ویرایش ادبی کتاب را سرکار خانم آتوسا سعادت‌تی با صرف وقت و دقت بسیار انجام داده‌اند که لازم است از ایشان نیز قدردانی به عمل آید. از رئیس مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان جناب آقای مهندس مرنندی و همکاران ایشان که امکان چاپ و نشر کتاب را فراهم نمودند نیز تشکر می‌نماییم. همچنین از جناب آقای دکتر رسول نصر اصفهانی، معاون محترم پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی اصفهان سپاسگزاریم. همچنین از تلاش‌های سرکار خانم ثریا رمضانی که زحمت تایپ متون کتاب را متقبل شدند متشکریم. تلاش بسیاری صورت گرفته تا کتاب عاری از اشتباه باشد، ولی قطعاً چنین نیست و رفع کاستی‌های موجود به راهنمایی دوستان و صاحب‌نظران نیاز دارد که موجب کمال امتنان خواهد بود.

پاییز ۱۳۸۹

www.ketab.ir

فصل ۱ آشنایی با علم و مهندسی مواد

۲	اهداف علمی - آموزشی	
۲	چشم انداز تاریخی	۱-۱
۲	علم و مهندسی مواد	۲-۱
۴	علت مطالعه علم و مهندسی مواد چیست؟	۳-۱
۵	دسته بندی مواد	۴-۱
۹	مواد پیرامون ما	۵-۱
۱۲	نیاز به مواد جدید	۶-۱
۱۳	مراجع	
۱۴	پرسش	

فصل ۲ ساختمان و پیوند اتمی در جامدات

۱۶	اهداف علمی - آموزشی	
۱۶	مقدمه	۱-۲
۱۶	ساختمان اتمی	
۱۶	مفاهیم پایه	۲-۲
۱۷	الکترون ها در اتم	۳-۲
۲۳	جدول تناوبی	۴-۲
۲۴	پیوند اتمی در جامدات	
۲۴	نیرو و انرژی پیوندی	۵-۲
۲۷	پیوندهای اتمی اولیه	۶-۲
۳۱	پیوند ثانویه یا پیوند واندروالس	۷-۲
۳۴	مولکول ها	۸-۲
۳۴	خلاصه	
۳۵	اصطلاحات و مفاهیم مهم	
۳۵	مراجع	
۳۵	پرسش ها و مسأله ها	

۱۰۳	شیمی مولکول‌های پلی‌مری	۴-۴	فصل ۳ ساختمان فلزات و سرامیک‌ها	
۱۰۸	وزن مولکولی	۵-۴		
۱۱۰	شکل مولکولی	۶-۴	۳۸ اهداف علمی - آموزشی	
۱۱۲	ساختمان مولکولی	۷-۴	۳۸ مقدمه	۱-۳
۱۱۴	آرایش مولکولی	۸-۴	۳۸ ساختمان‌های بلوری	
۱۱۷	پلی‌مرهای ترموپلاستیک و ترموست	۹-۴	۳۸ مفاهیم پایه	۲-۳
۱۱۸	کوپلی‌مرها	۱۰-۴	۳۹ واحد شبکه	۳-۳
۱۲۰	بلورینگی پلی‌مر	۱۱-۴	۴۰ ساختمان‌های بلوری فلزی	۴-۳
۱۲۳	بلورهای پلی‌مری	۱۲-۴	۴۵ محاسبه چگالی فلزات	۵-۳
۱۲۵	خلاصه		۴۵ ساختمان‌های بلوری سرامیکی	۶-۳
۱۲۶	اصطلاحات و مفاهیم مهم		۵۳ محاسبه چگالی برای مواد سرامیکی	۷-۳
۱۲۷	مراجع		۵۵ سرامیک‌های سیلیکاتی	۸-۳
۱۲۷	پرسش‌ها و مسأله‌ها		۵۹ کربن	۹-۳
			۶۲ چند شبکه‌ای و آلوتروپی	۱۰-۳
			۶۲ سیستم‌های بلوری	۱۱-۳
			۶۴ نقاط، جهات و صفحات بلوری	
			۶۵ مختصات نقطه	۱۲-۳
			۶۷ جهات بلوری	۱۳-۳
			۷۰ صفحات بلوری	۱۴-۳
			۷۶ چگالی خطی و صفحاتی	۱۵-۳
			۷۷ ساختمان‌های بلوری مترک	۱۶-۳
			مواد بلوری و غیربلوری	
			۸۱ تک بلورها	۱۷-۳
			۸۱ مواد چند بلور	۱۸-۳
			۸۳ ناهمسانگردی	۱۹-۳
			پراش پرتو ایکس: تعیین	۲۰-۳
			ساختمان‌های بلوری	
			۸۸ جامدات غیربلوری	۲۱-۳
			۹۰ خلاصه	
			۹۲ اصطلاحات و مفاهیم مهم	
			۹۳ مراجع	
			۹۳ پرسش‌ها و مسأله‌ها	
			فصل ۴ ساختمان پلی‌مرها	
			۱۰۰ اهداف علمی - آموزشی	
			۱۰۰ مقدمه	۱-۴
			۱۰۰ مولکول‌های هیدروکربنی	۲-۴
			۱۰۲ مولکول‌های پلی‌مری	۳-۴

فصل ۶ نفوذ در جامدات

۲۲۴	تغییر شکل ماکروسکوپی	۱۴-۷	اهداف علمی - آموزشی	۱۶۸
۲۲۵	تغییر شکل ویسکو الاستیک	۱۵-۷	۱-۶ مقدمه	۱۶۸
	بررسی سختی و دیگر خواص		۲-۶ مکانیزم های نفوذ	۱۶۹
۲۲۸	مکانیکی		۳-۶ نفوذ حالت پایدار	۱۷۱
۲۲۸	سختی	۱۶-۷	۴-۶ نفوذ حالت ناپایدار	۱۷۳
۲۳۵	سختی مواد سرامیکی	۱۷-۷	۵-۶ عوامل موثر بر نفوذ	۱۷۸
۲۳۶	استحکام پارگی و سختی پلی مرها	۱۸-۷	۶-۶ سایر مسیرهای نفوذ	۱۸۴
	تغییر پذیری خواص و ضرایب		۷-۶ نفوذ در مواد یونی و پلی مری	۱۸۴
۲۳۶	طراحی / اطمینان		خلاصه	۱۸۸
۲۳۶	تغییر پذیری خواص مواد	۱۹-۷	اصطلاحات و مفاهیم مهم	۱۸۹
۲۳۸	ضرایب طراحی / اطمینان	۲۰-۷	مراجع	۱۸۹
۲۴۰	خلاصه		پرسش ها و مسأله ها	۱۸۹
۲۴۲	اصطلاحات و مفاهیم مهم			
۲۴۲	مراجع			
۲۴۳	پرسش ها و مسأله ها			

فصل ۷ خواص مکانیکی

فصل ۸ مکانیزم های تغییر شکل و استحکام دهی

	اهداف علمی - آموزشی	۱۹۴	اهداف علمی - آموزشی	۱۹۴
	۱-۷ مقدمه	۱۹۴	۱-۷ مقدمه	۱۹۴
	۲-۷ مفهوم تنش و کرنش	۱۹۵	۲-۷ مفهوم تنش و کرنش	۱۹۵
	تغییر شکل الاستیک	۱۹۶	تغییر شکل الاستیک	۱۹۶
۲۵۲	اهداف علمی - آموزشی	۱۹۹	۳-۷ رفتار تنش - کرنش	۱۹۹
۲۵۲	مقدمه	۲۰۲	۴-۷ رفتار غیر الاستیکی	۲۰۲
۲۵۲	مکانیزم های تغییر شکل فلزات	۲۰۳	۵-۷ خواص الاستیکی مواد	۲۰۳
۲۵۲	تاریخچه	۲۰۶	رفتار مکانیکی - فلزات	۲۰۶
۲۵۳	مفاهیم اساسی در مورد نابجایی ها	۲۰۶	۶-۷ خواص کششی	۲۰۶
۲۵۵	مشخصه های نابجایی ها	۲۱۴	۷-۷ تنش و کرنش حقیقی	۲۱۴
۲۵۶	سیستم های لغزشی	۲۱۸	۸-۷ بازیابی الاستیک پس از تغییر شکل پلاستیک	۲۱۸
۲۵۸	لغزش در تک بلورها	۲۱۸	۹-۷ تغییر شکل فشاری، برشی و پیچشی	۲۱۸
	تغییر شکل پلاستیک فلزات	۲۱۹	رفتار مکانیکی - سرامیک ها	۲۱۹
۲۶۳	چند بلور	۲۱۹	۱۰-۷ استحکام خمشی	۲۱۹
۲۶۴	تغییر شکل توسط دوقلوبی	۲۲۰	۱۱-۷ رفتار الاستیک	۲۲۰
۲۶۶	مکانیزم های استحکام دهی در فلزات	۲۲۱	۱۲-۷ تأثیر تخلخل بر خواص مکانیکی سرامیک ها	۲۲۱
	استحکام دهی توسط کاهش اندازه دانه	۲۲۲	رفتار مکانیکی - پلی مرها	۲۲۲
۲۶۶	اندازه دانه	۲۲۲	۱۳-۷ رفتار تنش - کرنش	۲۲۲
۲۶۷	استحکام دهی توسط محلول جامد			
۲۶۸	کرنش سختی			
۲۷۲	بازیابی، تبلور مجدد و رشد دانه			
۲۷۳	بازیابی			

۳۳۶	اثرات تنش و دما	۱۶-۹	۲۷۳	تبلور مجدد	۱۳-۸
۳۳۸	روش های تخمین اطلاعات	۱۷-۹	۲۷۸	رشد دانه	۱۴-۸
۳۳۹	آلیاژهای دما بالا	۱۸-۹		مکانیزم های تغییر شکل در	
۳۳۹	خزش در مواد سرامیکی و پلی مری	۱۹-۹	۲۷۹	مواد سرامیکی	
۳۴۰	خلاصه		۲۷۹	سرامیک های بلوری	۱۵-۸
۳۴۲	اصطلاحات و مفاهیم مهم		۲۸۰	سرامیک های غیر بلوری	۱۶-۸
۳۴۲	مراجع			مکانیزم های تغییر شکل و	
۳۴۳	پرسش ها و مسأله ها		۲۸۱	استحکام دهی پلی مرها	

فصل ۱۰ نمودارهای فازی

۳۴۸	اهداف علمی - آموزشی		۲۸۳	پلی مرهای نیمه بلوری	
۳۴۸	مقدمه	۱-۱۰	۲۸۷	تغییر شکل الاستومرها	۱۹-۸
۳۴۸	تعاریف و مفاهیم اساسی		۲۹۰	خلاصه	
۳۴۹	حد حلالیت	۲-۱۰	۲۹۲	اصطلاحات و مفاهیم مهم	
۳۴۹	فازها	۳-۱۰	۲۹۲	مراجع	
۳۵۰	ریز ساختار	۴-۱۰	۲۹۲	پرسش ها و مسأله ها	
۳۵۰	تعادل فازی	۵-۱۰			
۳۵۱	نمودارهای فازی یک جزیی (یگانه)	۶-۱۰			

فصل ۹ انحراف مواد

۳۵۳	نمودارهای فازی دوتایی		۲۹۸	اهداف علمی - آموزشی	
۳۵۳	سیستم های ایزومورف دوتایی	۷-۱۰	۲۹۸	مقدمه	۱-۹
۳۵۴	تحلیل نمودارهای فازی	۸-۱۰	۲۹۸	شکست	
	توسعه ریز ساختار در آلیاژهای		۲۹۸	مبانی شکست	۲-۹
۳۵۹	ایزومورف		۲۹۹	شکست نرم	۳-۹
	خواص مکانیکی آلیاژهای	۱۰-۱۰	۳۰۲	شکست ترد	۴-۹
۳۶۳	ایزومورف		۳۰۵	اصول مکانیک شکست	۵-۹
۳۶۳	سیستم های یوتکتیک دوتایی	۱۱-۱۰	۳۱۳	شکست ترد سرامیک ها	۶-۹
	توسعه ریز ساختار در آلیاژهای	۱۲-۱۰	۳۱۶	شکست پلی مرها	۷-۹
۳۶۸	یوتکتیک		۳۱۹	آزمون شکست ضربه	۸-۹
	نمودارهای تعادلی حاوی	۱۳-۱۰	۳۲۳	خستگی	
۳۷۵	ترکیبات یا فازهای میانی		۳۲۳	تنش های چرخه ای	۹-۹
۳۷۸	واکنش های یوتکتوید و پری تکتیک	۱۴-۱۰	۳۲۴	منحنی S-N	۱۰-۹
۳۷۹	دگرگونی های فازی متجانس	۱۵-۱۰	۳۲۷	خستگی در مواد پلی مری	۱۱-۹
۳۸۰	نمودارهای فازی سرامیک ها	۱۶-۱۰	۳۲۸	آغاز و انتشار ترک	۱۲-۹
۳۸۴	نمودارهای فازی سه تایی	۱۷-۱۰	۳۳۰	عوامل مؤثر بر عمر خستگی	۱۳-۹
۳۸۴	قانون فازی گیبس	۱۸-۱۰	۳۳۳	اثرات محیطی	۱۴-۹
۳۸۶	سیستم آهن - کربن		۳۳۴	خزش	
	نمودار فازی آهن - کاربید آهن	۱۹-۱۰	۳۳۴	رفتار عمومی خزش	۱۵-۹
۳۸۶	(Fe-Fe ₃ C)				

۴۳۳	رفتار مکانیکی آلیاژهای آهن-کربن	۷-۱۱	۲۰-۱۰	توسعه ریزساختار در آلیاژهای آهن - کربن
۴۳۷	مارتنزیت تمپر شده	۸-۱۱	۳۸۸	تأثیر سایر عناصر آلیاژی
	مرور دگرگونی فازها و خواص	۹-۱۱	۳۹۶	خلاصه
۴۴۰	مکانیکی آلیاژهای آهن - کربن		۳۹۸	اصطلاحات و مفاهیم مهم
۴۴۰	رسوب سختی		۳۹۹	مراجع
۴۴۰	عملیات حرارتی	۱۰-۱۱	۴۰۰	پرسش‌ها و مسأله‌ها
۴۴۶	مکانیزم سخت شوندگی	۱۱-۱۱	۴۰۰	
۴۴۹	ملاحظات مختلف	۱۲-۱۱		
	پدیده‌های تبلور، ذوب و انتقال			
۴۴۹	شیشه‌ای در پلی‌مرها		۴۰۶	اهداف علمی - آموزشی
۴۴۹	تبلور	۱۳-۱۱	۴۰۶	مقدمه
۴۵۰	ذوب	۱۴-۱۱	۴۰۶	دگرگونی فازها در فلزات
۴۵۱	انتقال شیشه‌ای	۱۵-۱۱	۴۰۷	مفاهیم اساسی
۴۵۱	دمای ذوب و انتقال شیشه‌ای	۱۶-۱۱	۴۰۷	سینتیک دگرگونی فازها
	عوامل مؤثر بر دمای ذوب و	۱۷-۱۱	۴۱۸	حالات شبه پایدار و تعادلی
۴۵۲	انتقال شیشه‌ای			تغییرات ریزساختاری و خواص
۴۵۴	خلاصه		۴۱۸	آلیاژهای آهن - کربن
۴۵۶	اصطلاحات و مفاهیم مهم		۴۱۹	نمودارهای دگرگونی مهم دما
۴۵۶	مراجع		۴۱۹	نمودارهای دگرگونی مهم دما
۴۵۷	پرسش‌ها و مسأله‌ها		۴۲۹	پیوسته

فصل ۱۱ دگرگونی فازها

فهرست نمادها

شماره بخش‌هایی که یک نماد تعریف یا توضیح داده شده در پرانتز داده شده است.

d_{hkl} = فاصله بین صفحه‌ای برای صفحاتی با اندیس‌های h, k, l (۲۰-۳) میلر	A = مساحت
E = انرژی (۵-۲)	$\text{\AA}$ = واحد آنگستروم
E = مدول الاستیک یا مدول یانگ (۷-۳)	A_i = وزن اتمی واحد i (۲-۲)
$E_p(t)$ = مدول افت تنش	APF = فاکتور تراکم اتمی (۴-۳)
%EL = انعطاف‌پذیری، به درصد ازدیاد طول (۶-۷)	a = پارامتر شبکه: طول محور x واحد شبکه (۴-۳)
erf = تابع خطای گوسی (۴-۶)	a = طول ترک سطحی (۵-۴)
$\exp = e$ = پایه لگاریتم طبیعی	at% = درصد اتمی (۶-۵)
F = نیرو، بین اتمی یا مکانیکی (۲-۷ و ۵-۲)	BCC = ساختمان بلوری مکعب مرکزدار (۴-۳)
FCC = ساختمان بلوری مکعب وجه مرکزدار (۴-۳)	b = پارامتر شبکه: طول محور y واحد شبکه (۱۱-۳)
G = مدول برشی (۳-۷)	b = بردار برگرز (۷-۵)
HB = سختی برینل (۱۶-۷)	C_i = غلظت (ترکیب) جز i بر اساس درصد وزنی (۶-۵)
HCP = ساختمان بلوری هگزا گونال متراکم (۴-۳)	C'_i = غلظت (ترکیب) جز i بر اساس درصد اتمی (۶-۵)
HK = سختی نوپ (۱۶-۷)	CVN = چارپی با شیار V (۸-۹)
HRF, HRB = سختی راکول: مقیاس‌های F و B (۱۶-۷)	%CW = درصد کار سرد (۱۱-۸)
HR15N, HR45W = سختی راکول سطحی: مقیاس‌های 15N و 45W	c = پارامتر شبکه: طول محور z واحد شبکه (۱۱-۳)
	D = ضریب نفوذ (۳-۶)
	DP = درجه پلی‌مریزاسیون (۱۵-۴)
	d = قطر
	d = میانگین قطر دانه (۹-۸)

TEM = میکروسکوپ الکترونی عبوری

TS = استحکام کششی (۶-۷)

t = زمان

t_r = عمر پارگی (۱۵-۹)

U_r = مدول ارتجاعی (۶-۷)

$[uvw]$ = اندیس‌هایی برای جهت بلوری (۱۳-۳)

V_C = حجم واحد شبکه (۴-۳)

V_i = کسر حجمی فاز i (۸-۱۰)

U = سرعت

vol% = درصد حجمی

w_i = کسر وزنی فاز (۸-۱۰)

wt% = درصد وزنی (۶-۵)

x = طول

x = مختصات فضایی

Y = پارامتر یا تابع بدون بعد در بیان

چقرمگی شکست (۵-۹)

y = مختصات فضایی

z = مختصات فضایی

α = پارامتر شبکه‌ای: زاویه بین محور y - z

در واحد شبکه (۱۱-۳)

γ = اسامی فازها

β = پارامتر شبکه‌ای: زاویه بین محور x - z

در واحد شبکه (۱۱-۳)

γ = پارامتر شبکه‌ای: زاویه بین محور x - y

در واحد شبکه (۱۱-۳)

γ = تنش برشی (۲-۷)

ε = کرنش مهندسی (۲-۷)

ε_s = کرنش خزشی پایدار (۱۶-۹)

ε_T = کرنش حقیقی (۷-۷)

η = ویسکوزیته (۱۶-۸)

θ = زاویه پراش براگ (۲۰-۳)

λ = طول موج پرتو الکترومغناطیس

(۲۰-۳)

ν = ضریب پواسان (۵-۷)

ρ = چگالی (۵-۳)

ρ_t = شعاع انحنای نوک ترک (۵-۹)

(۱۶-۷)

HV = سختی ویکرز (۱۶-۷)

(hkl) = اندیس میلر برای یک صفحه بلوری

(۱۴-۳)

J = شار نفوذی (۳-۶)

K_c = چقرمگی شکست (۵-۹)

K_{Ic} = چقرمگی شکست در حالت کرنش

صفحه‌ای برای حالت I جابجایی ترک

سطحی (۵-۹)

k = ثابت بولتزمن (۲-۵)

L = طول

$\ln$ = لگاریتم طبیعی

$\log$ = لگاریتم بر مبنای ۱۰

$\bar{M}_n$ = میانگین عددی وزن مولکولی پلی‌مر

(۴-۵)

$\bar{M}_w$ = میانگین وزنی وزن مولکولی پلی‌مر

(۴-۵)

mol% = درصد مولی

N = تعداد چرخه‌های خستگی (۱۰-۹)

N_A = عدد آووگادرو

n = عدد کوانتوم اصلی (۳-۲)

n = تعداد اتم‌ها در واحد شبکه (۵-۳)

n' = برای سرامیک‌ها، تعداد واحدهای فرمول

در یک واحد شبکه (۷-۳)

Q = انرژی اکتیواسیون

R = شعاع اتمی (۴-۳)

R = ثابت گاز

RA% = انعطاف‌پذیری، به درصد کاهش در

سطح مقطع (۶-۷)

r = فاصله بین اتمی (۵-۲)

r_c, r_A = شعاع یونی آنیون و کاتیون (۶-۳)

S = دامنه تنش خستگی (۱۰-۹)

SEM = میکروسکوپ الکترونی روبشی

T = دما

T_g = دمای تبدیل شیشه‌ای (۱۵-۱۱)

T_m = دمای ذوب

شانزده

زیر نویس ها

σ = تنش مهندسی، فشاری یا کششی (۲-۷)	c = ترکیب
σ_c = تنش بحرانی برای انتشار ترک (۵-۹)	f = نهایی
σ_{fs} = استحکام خمشی (۱۰-۷)	f = در شکست
σ_m = تنش حداکثر (۵-۹)	m = حداکثر
σ_m = تنش میانگین (۹-۹)	min = حداقل
σ_T = تنش حقیقی (۷-۷)	0 = اولیه
σ_w = تنش کاری یا امن (۲۰-۷)	0 = در تعادل
σ_y = استحکام تسلیم (۶-۷)	0 = در خلأ
τ = تنش برشی (۲-۷)	
τ_{crss} = مؤلفه تنش برشی بحرانی	

www.ketab.ir