

مشخصات مکانیکی فولاد در دمای بالا

محل ضرب مهرهای تحت کنترل - منسوخ							۰۳
							۰۲
							۰۱
				امیر ساعدی	وحید پاچیده	مشخصات مکانیکی فولاد در دمای بالا	۰۰
	تاریخ انتشار	تصویب	تأیید	بررسی	تهیه	شرح	REV

	مشخصات مکانیکی فولاد در دمای بالا									
	صفحه: ۲		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	
	آذرماه ۹۴								۰۱	

فهرست مطالب

- ۱-مقدمه ای بر مشخصات مکانیکی تحت آتش ۳
- ۲-مشخصات مکانیکی حرارتی فولاد ۳
- ۲-۱- مشخصات حرارتی فولاد بر اساس BS 5950 ۴
- ۲-۲- خصوصیات حرارتی فولاد براساس Euro code 3 ۶
- ۳-ضریب انبساط حرارتی ۷
- ۴-مؤلفه های کرنش در دمای بالا ۸

مشخصات مکانیکی فولاد در دمای بالا										 گروه مهندسين
صفحه: ۳		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	پروژه:	
آذرماه ۹۴								۰۱		

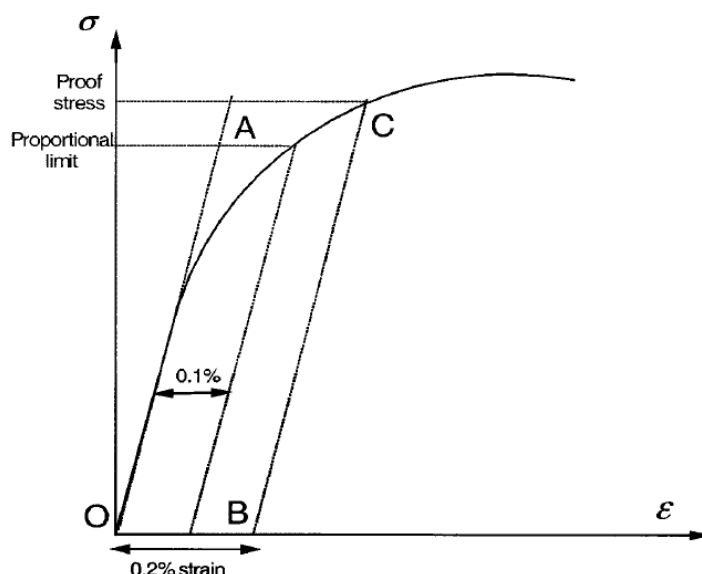
۱- مقدمه ای بر مشخصات مکانیکی تحت آتش

مشخصات مکانیکی مصالح فولادی در دماهای بالا از اوایل دهه ۱۹۵۰ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشات مشخصات مکانیکی تنها در صورتی که شرایط مختلف آزمایش مشخص و اندازه گیری شده باشد، به صورت صحیح ارائه می شود. آزمایشهای تعیین کننده مشخصات مصالح فولادی در دمای بالا در دو شرایط مختلف دمایی طبقه بندی می شوند. آزمایشات در شرایط *Steady state* و همچنین آزمایشات در شرایط *transient state* . Kirby & Preston (1988) جزئیات آزمایشات در حالت پایدار و گذرا را توصیف کردند. بر اساس گزارشات ارائه شده توسط John (1977) ساختمان شیمیایی فولاد، میزان کربن، نوع و مقادیر سایر الیاژها، نحوه تولید (که شامل رویه های عملیات حرارتی یا نورد گرم و سرد می باشد)، به میزان قابل توجهی بر رفتار فولاد در دماهای بالا تحت تاثیر گذار می باشد.

۲- مشخصات مکانیکی حرارتی فولاد

پیشرفتهای قابل ملاحظه ای در توصیف تحلیلی مشخصات مکانیکی فولاد در دماهای بالا صورت گرفته است. معمولاً، رابطه دما - تنش - کرنش توسط دو خصیصه به نام مدول الاستیسیته و مقاومت تسلیم توصیف می شود. مدول الاستیسیته به عنوان شیب اولیه منحنی تنش - کرنش تعریف می گردد. که با افزایش دما، کاهش می یابد. منحنی های دما - تنش - کرنش در دمای بالا، نقطه تسلیم مشخصی ندارند که بعنوان تنش تسلیم تعریف شود. بنابراین مقاومت مؤثر تسلیم، معیاری است که غالباً متناظر با کرنش غیرخطی ۰٫۲٪ است. مفهوم تنش در شکل ۱ نشان داده شده است. اگر خط مماس "OA" در مبدأ در منحنی تنش - کرنش کشیده شود و خط "BC" به موازات آن به گونه ای ترسیم گردد که فاصله "OB"، ۰٫۲٪ شود، آنگاه تنش در نقطه C، تنش موثر ۰٫۲٪ نامیده می شود. به بیان دیگر، تنش موثر ۰٫۲٪، تنش مورد نیاز برای ایجاد یک کرنش ماندگار ۰٫۲٪ است.

مشخصات مکانیکی فولاد در دمای بالا										 گروه مهندسين دانشگاه تهران
صفحه: ۴		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	پروژه:	
آذرماه ۹۴								۰۱		



شکل ۱: رفتار مصالح در تنش موثر ۰,۲٪ در دمای بالا

اطلاعات جمع آوری شده از آزمایش های آتش، گستره وسیعی از مدل های ریاضی را در توصیف نتایج تجربی ارائه می دهند. حداقل بخشی از این تنوع به سبب روش های اندازه گیری و شرایط آزمایش است که می تواند خزش حرارتی را تحت تاثیر قراردادده و منجر به اختلاف اساسی در نتایج روابط دما-تنش- کرنش شود. *Anderberg(1983)* گزارش کرد که اگر خزش به حساب آورده شود، مدول الاستیسیته کمتر است. میزان مدول الاستیسیته و تنش موثر تسلیم فولاد با افزایش دما کاهش می یابد. این خصوصیات مکانیکی به عنوان تابعی در برابر دما توسط الزامات مختلفی فرموله می شوند، همچنان که از سوی *BS5950, ECCS, Brockenbrough* (1970) بیان شده اند.

خصوصیات مصالح فولادی در دماهای بالا در تحقیق فعلی مطابق با *Euro code 3, BS 5950* اعمال می شوند. *Euro code 3*، نسخه بروز شده *ECCS (1983)* است. در این مراجع تا دمای ۴۰۰ مطابقت خوبی میان مدل های مختلف مشاهده می گردد ولیکن بالاتر از این سطح دمایی، مشخصات حرارتی بر طبق *ECCS* اندکی پایین تر از مقادیر آنها بر طبق *BS 5950* است.

۲-۱- مشخصات حرارتی فولاد بر اساس BS 5950

در *BS 5950*، اطلاعات دما-تنش-کرنش توسط آزمایش های که در حالت گذارا انجام شده اند به دست آمده است. در این آزمایشات نرخ گرمایش به صورت تجربی $10^{\circ}C/min$ در نظر گرفته می شود. برای این نرخ

مشخصات مکانیکی فولاد در دمای بالا										
صفحه: ۵		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	پروژه:	
آذرماه ۹۴								۰۱		

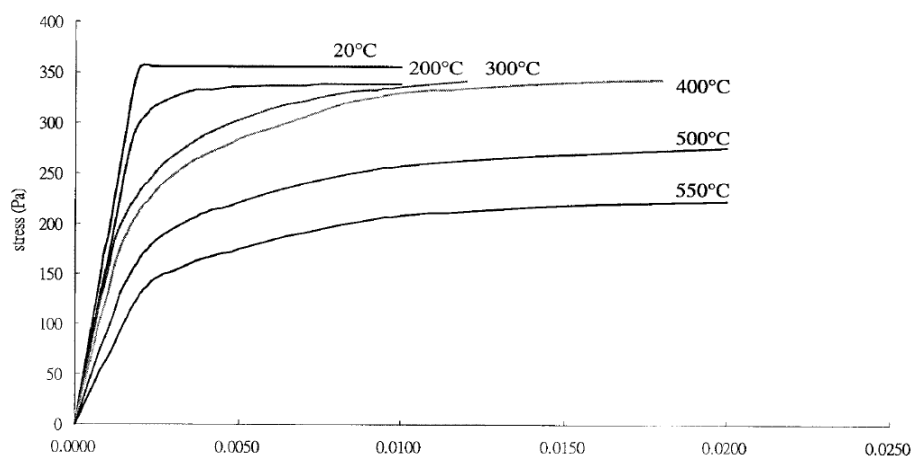
پایین گرمایش، نتایج حاصله از آزمایش گذرا، مقاومت‌های پایین تری را ارائه می دهد اما ادعا می شود که این مقادیر واقعی تر هستند.

در جدول ۱ روابط مربوط به تنش و کرنش و همچنین مدول الاستیسیته ارائه شده اند.

رابطه دما- تنش - کرنش برای فولاد گرید ۴۳ در شکل ۲ مطابق با BS 5950 به صورت گرافیکی نشان داده می شود.

جدول ۱: رابطه دما - تنش - کرنش براساس بخش ۸ از BS5950

محدوده دما	تنش موثر تسلیم	مدول الاستیسیته
$80^{\circ}C < T \leq 200^{\circ}C$	$\sigma_{y20} \left[0.975 - 0.034 \frac{T}{350} \right]$	$E_{20} \left[1 - 2.8 \left(\frac{T - 20}{1485} \right)^2 \right]$
$200^{\circ}C < T \leq 400^{\circ}C$	<i>Ditto</i>	<i>Ditto</i>
$400^{\circ}C < T \leq 550^{\circ}C$	$\sigma_{y20} \left[1.553 - 0.155 \frac{T}{100} \right]$	<i>Ditto</i>
$550^{\circ}C < T \leq 600^{\circ}C$	$\sigma_{y20} \left[2.34 - 0.22 \frac{T}{70} \right]$	$E_{20} \left[1 - 3.0 \left(\frac{T - 20}{1463} \right)^2 \right]$
$600^{\circ}C < T \leq 690^{\circ}C$	$\sigma_{y20} \left[1.374 - 0.078 \frac{T}{50} \right]$	<i>Ditto</i>
$690^{\circ}C < T \leq 800^{\circ}C$	$\sigma_{y20} \left[1.12 - 0.128 \frac{T}{100} \right]$	<i>Ditto</i>



شکل ۲: منحنی های دما- تنش - کرنش برای فولاد گرید ۴۳ براساس BS5950

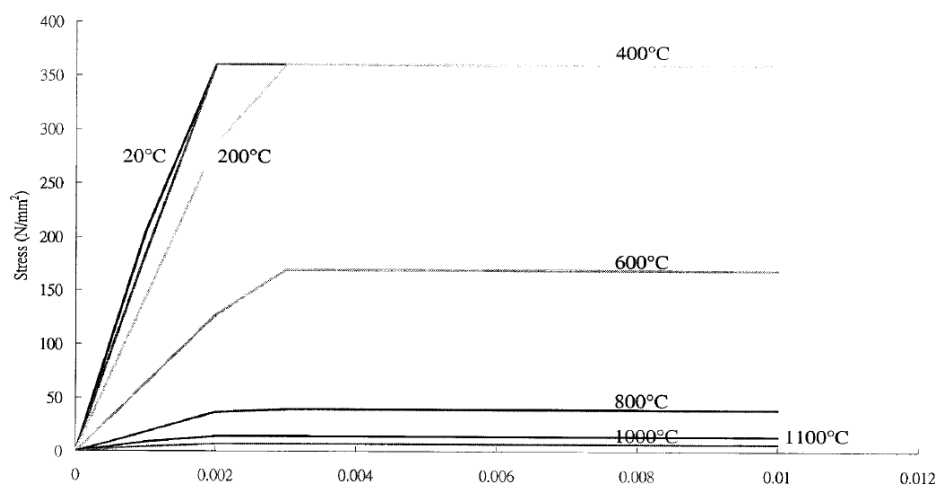
مشخصات مکانیکی فولاد در دمای بالا										
صفحه: ۶		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	پروژه:	
آذرماه ۹۴								۰۱		

۲-۲- خصوصیات حرارتی فولاد براساس ۳ Euro code

ECCS برای دماهای بالاتر از 400°C از کرنش موثر تسلیم σ_{y20} استفاده می کند. جدول ۲ عبارات مدول الاستیسیته و تنش موثر تسلیم را برای توصیف روابط دما - تنش - کرنش مطابق با *ECCS* ارائه می دهد. برای فولاد سازه ای کربن دار، روابط دما - تنش - کرنش ارائه شده در *ECCS* اخیراً بروز رسانی شده و در بخش ۱،۲ از *Euro code 3* چاپ شده است که شامل مدول الاستیسیته، تنش موثر تسلیم و تنش تسلیم مطابق با حد تناسب در سطوح دمایی مختلف می باشد. این متغیرها در جدول ۳-۶ فهرست شده اند. علاوه بر این در شکل ۳ به صورت گرافیکی ترسیم شده اند. تنش موثر تسلیم همانند بالا برای کرنش ϵ_{y20} تعریف می شود، در حالیکه تنش تسلیم بر طبق حد تناسب، برابر با مقدارش در کرنش متناظر ϵ_{y1} در نظر گرفته می شود (همان گونه که در شکل ۳،۱ نشان داده شده است).

جدول ۲: رابطه دما - تنش - کرنش بر اساس *ECCS*

محدوده ی دما	تنش موثر تسلیم	مدول الاستیسیته
$80^{\circ}\text{C} < T \leq 600^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{y20} \left[1 + \frac{T}{767 \ln \left(\frac{T}{1750} \right)} \right]$	$E_{20} \left[1 - 17.2 \times 10^{-12} T^4 + 11.810^{-9} T^3 - 34.5 \times 10^{-7} T^2 + 15.9 \times 10^{-5} T \right]$
$600^{\circ}\text{C} < T \leq 1000^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{y20} \left[\frac{108 \left(1 - \frac{T}{1000} \right)}{t - 440} \right]$	تعریف نشده



شکل ۳: منحنی های دما - تنش - کرنش بر اساس بخش ۱،۲ از *Euro code 3* برای فولاد کربن ۳۶۰

مشخصات مکانیکی فولاد در دمای بالا										
صفحه: ۷		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	پروژه:	
آذرماه ۹۴								۰۱		

جدول ۳: رابطه دما - تنش - کرنش بر اساس بخش ۱,۲ از Euro code 3

Temperature	Effective yield strength	Yield stress relative to proportional limit	Elastic modulus relative to temperature
20°C	$1.000 \sigma_{y20}$	$1.000 \sigma_{p20}$	$1.000 E_{20}$
100°C	$1.000 \sigma_{y20}$	$1.000 \sigma_{p20}$	$1.000 E_{20}$
200°C	$1.000 \sigma_{y20}$	$0.807 \sigma_{p20}$	$0.900 E_{20}$
300°C	$1.000 \sigma_{y20}$	$0.613 \sigma_{p20}$	$0.800 E_{20}$
400°C	$1.000 \sigma_{y20}$	$0.420 \sigma_{p20}$	$0.700 E_{20}$
500°C	$0.780 \sigma_{y20}$	$0.360 \sigma_{p20}$	$0.600 E_{20}$
600°C	$0.470 \sigma_{y20}$	$0.180 \sigma_{p20}$	$0.310 E_{20}$
700°C	$0.230 \sigma_{y20}$	$0.075 \sigma_{p20}$	$0.130 E_{20}$
800°C	$0.110 \sigma_{y20}$	$0.050 \sigma_{p20}$	$0.090 E_{20}$
900°C	$0.060 \sigma_{y20}$	$0.0375 \sigma_{p20}$	$0.0675 E_{20}$
1000°C	$0.040 \sigma_{y20}$	$0.025 \sigma_{p20}$	$0.045 E_{20}$
1100°C	$0.020 \sigma_{y20}$	$0.0125 \sigma_{p20}$	$0.0225 E_{20}$
1200°C	$0.000 \sigma_{y20}$	$0.000 \sigma_{p20}$	$0.000 E_{20}$

۳- ضریب انبساط حرارتی

ضریب انبساط حرارتی α می تواند به صورت انبساط یک طول واحد از یک ماده تعریف شود، هنگامیکه دمای آن، یک درجه افزایش میابد. (Lie (1972 نشان داد که ضریب انبساط حرارتی فولاد به آرامی با دما افزایش می یابد و تفاوت میان مقادیر ضریب انبساط حرارتی فولادهای مختلف نیز کوچک می باشد. بر طبق مطالعات Bushev و همکاران (۱۹۶۶)، ضریب انبساط حرارتی فولاد وابستگی چندانی به میزان کربن موجود در فولاد ندارد. بنابراین انبساط حرارتی فولاد نسبتاً مستقل از نوع فولاد است. در دمای اتاق، α معمولاً $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ در

مشخصات مکانیکی فولاد در دمای بالا									 گروه مهندسين دانشگاه تهران
صفحه: ۸		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	
آذرماه ۹۴								۰۱	

نظر گرفته می شود اما در محدوده دمایی 200°C تا 600°C ، α ممکن است $14 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ در نظر گرفته شود. میزان α در این تحقیق برای کلیه ی بازه های دمایی با اندکی فقدان دقت در حدود، $14 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ لحاظ شده است.

۴- مؤلفه های کرنش در دمای بالا

بر مبنای مشاهدات تجربی، کرنش کلی فولاد در دماهای بالا را می توان به کرنش حرارتی، کرنش آنی مربوط به تنش و کرنش خزشی تقسیم نمود:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{cr} \quad (1)$$

در رابطه بالا ε_t کرنش کلی، ε_{σ} کرنش آنی مربوط به تنش و ε_{cr} کرنش خزشی است. ε_{th} نیز کرنش حرارتی است که هر دو نوع کرنش محوری حرارتی و خمیدگی حرارتی را شامل می شود. کرنش محوری حرارتی را می توان برای تغییرات پله ای اضافه شده در تحلیل آتش به صورت معادله ذیل محاسبه نمود:

$$\Delta\varepsilon_{th,a} = \alpha\Delta T = \alpha(T_{t+1} - T_t) \quad (2)$$

در این رابطه α ضریب انبساط حرارتی است که مقدار ثابت $14 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ در نظر گرفته می شود T_{t+1} و T_t به ترتیب دما در آرایش حرارتی t ام می باشند.

اثر حرارتی وابسته به زمان بر مبنای کرنش محوری حرارتی افزایشی، همانند معادله (۲) در نظر گرفته می شود. در غیر این صورت، برای اثرات حرارتی مستقل از زمان، کرنش محوری حرارتی کل برای کلیه سیکل های حرارتی، همانطور که در معادله (۳) ارائه شده است، بایستی اشاره به دمای اتاق داشته باشد.

$$\Delta\varepsilon_{th,a} = \alpha\Delta T = \alpha(T_{t+1} - 20) \quad (3)$$

هنگامی که یک عضو در ارتفاع مقطع به صورت غیر یکنواخت حرارت می بیند، هر تار (فیر) مقطع بر طبق فرض اول ذکر شده در این فصل، در انبساط حرارتی محوری عضو رفتار متفاوتی خواهد داشت. با توجه به این مساله انحنای حرارتی در طول عضو القا می گردد. بنابر فرض چهارم برای اثرات حرارتی، یک انحنای حرارتی ثابت ϕ_{th} مطابق معادله (۴) به دست می آید که برای مدلسازی اثر خم شدگی حرارتی کاربرد دارد.

$$\phi_{th} = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_b}{D} = \frac{\alpha(T_t - T_b)}{D} = \frac{\alpha\beta T}{D} \quad (4)$$

مشخصات مکانیکی فولاد در دمای بالا										
صفحه: ۹		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	پروژه:	
آذرماه ۹۴								۰۱		

در رابطه فوق ϵ_t و ϵ_b به ترتیب کرنشهای حرارتی در بالاترین و پایین ترین تارهای مقطع عضو می باشند. β نسبت اختلافات دما بین سطوح بالا و پایین عضو است. T_t و T_b به ترتیب معرف دما در تارهای بالا و پایین می باشند. قرار داد علامت برای انحنای حرارتی به گونه ای تنظیم شده است که به هنگام حرارت دیدن بخشی از مقطع عضو که پایین مرکز جرم واقع است، مثبت در نظر گرفته می شود.

بایستی توجه داشت که انحنای حرارتی، همان طور که در معادله (۴) نشان داده شده، تنها برای یک دمای مشخص است و هیچ گونه اثر خم شدگی حرارتی تجمعی حتی براساس فرمولاسیون افزایشی وجود ندارد.

محققین زیادی اثر خزش بر اعضای فولادی در دماهای بالا را نیز مورد مطالعه قرار داده اند. Hamathy (1967) یک مدل خزش جامع بر مبنای مطالعات قبلی که توسط Dorn (1954) انجام شده بود، تهیه کرد. Fujimot, skinner (1972), Lie (1972), Thor (1971) نیز در خصوص اثر خزش در مصالح فولادی در دماهای بالا تحقیقاتی انجام داده اند. Anderberg (1988) بعدها مدل صریح اثر خزش را کشف کرد. Harmothy (1976-b) تغییر شکل خزشی حرارتی را تحت شرایط گرمایش *transient state* بسط و توسعه بخشید، به گونه ای که اثر تغییرات توزیع دما با زمان را می تواند مدلسازی نمود. Witteveen و همکاران (۱۹۷۷) آزمایشهای خزش حرارتی را به منظور دست یابی به روابط دما - تنش - کرنش در بارگذاری ثابت تحت شرایط *transient state* انجام دادند تا اثر نرخ بارگذاری را حذف کنند. این روابط سپس به منحنی های تنش - کرنش تبدیل شدند، که اثر خزش به طور ضمنی در آنها لحاظ شده بود. مولفه کرنش خزشی به طور ضمنی در رابطه دما - تنش - کرنش در بخش ۸ از این نامه BS5959 لحاظ گردیده است. این رابطه با استفاده از شرایط گرمایش *transient state* توسط Preston (1988) اندازه گیری شده است.