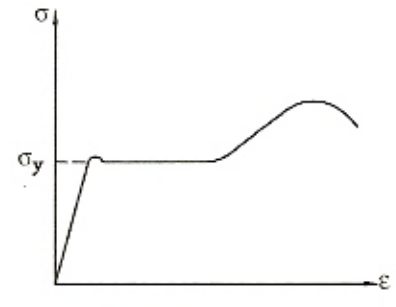
فصل اول

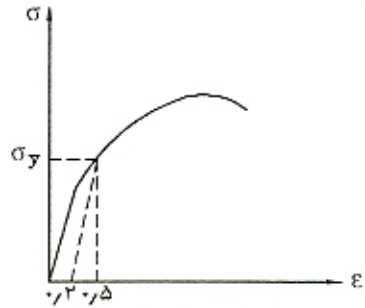
فولاد و خواص آن

تنش تسلیم (در فولادهای نرمه): به تنشی اطلاق می‌شود که در اغلب فولادهای متعارف ساختمانی، مرزی معین بین عملکرد ارتجاعی و خمیری ترسیم می‌کند. (شکل ۱ ـ ۱.(الف))

تنش تسلیم (در فولادهای آلیاژی): به تنشی اطلاق می‌شود که در آن تنش، کرنش فولاد تقریباً ۰/۵ درصد باشد یا به طور دقیقتر از کرنش ۰/۲ درصد به موازات قسمت ارتجاعی منحنی تنش ـ کرنش خطی رسم کرده، تنش نقطه تقاطع این خط و منحنی را تنش تسلیم (σ_y) می‌نامیم. (شکل ۱ ـ ۱.(ب))



(الف) تنش تسلیم در فولادهای نرمه



(ب) تنش تسلیم در فولادهای آلیاژی

شکل ۱ـ۱ . تعیین تنش تسلیم

۱ ـ ۱ انواع فولاد

فولادهای کربنی، فولادهای پر مقاومت، فولادهای آلیاژی

۱ ـ ۱ ـ ۱ فولادهای کربنی (ساده)

حاوی کربن (حداکثر ۱/۷ درصد) و سیلیس و مس و منگنز.

انواع فولادهای کربنی: ۱ـ فولاد کم کربن (کمتر از ۰/۱۵ درصد کربن دارد.)

۲ـ فولاد با کربن نسبتاً متوسط (بادرصد کربن بین ۰/۱۵ درصدتا ۰/۲۹ درصد)

۳ـ فولاد با کربن متوسط ـ فولاد اعلاء (با درصد کربنی بین ۰/۳ درصد تا ۰/۵۹ درصد)

۴ـ فولاد با کربن بالا (با درصد کربنی بین ۰/۶ درصد تا ۱/۷ درصد)

با بالا رفتن درصدکربن فولاد، تنش تسلیم (جاری شدن) فولاد بالا رفته، شکل‌پذیری آن تقلیل یافته جوش‌پذیری آن نقصان می‌یابد.

۲ ـ ۱ ـ ۱ فولادهای پرمقاومت (مقاوم)

تنش تسلیم آنها در محدودهٔ $\frac{kg}{cm^2}$ ۲۷۵۰ الی $\frac{kg}{cm^2}$ ۴۸۰۰ قرار گرفته است. بالا رفتن مقاومت این فولادها تنها با اضافه شدن آلیاژهایی نظیر: کرم، کلسیم، مس، منگنز، مولیبدن، نیکل، فسفر، وانادیم یا زیرکونیم صورت گرفته است و هیچ گونه عملیات حرارتی خاصی در تولید فولاد به عمل نیامده است.

۳ ـ ۱ ـ ۱ فولادهای آلیاژی

در این فولادها به منظور دستیابی به مقاومت بالای تسلیم ($\frac{kg}{cm^2}$ ۵۵۰۰ الی $\frac{kg}{cm^2}$ ۷۶۰۰) آنها را تحت عملیات تبرید و باز پخت قرار می‌دهند. چون این فولادها دارای پله خمیری مشخصی نیستند، لذا تنش این نوع فولادها را در نقطه‌ای که نظیر نقطه کرنش تقریباً ۰/۵ درصد است، معین کرده و آن تنش را تنش تسلیم فولاد می‌نامند. (شکل (۱ـ۱.(ب))

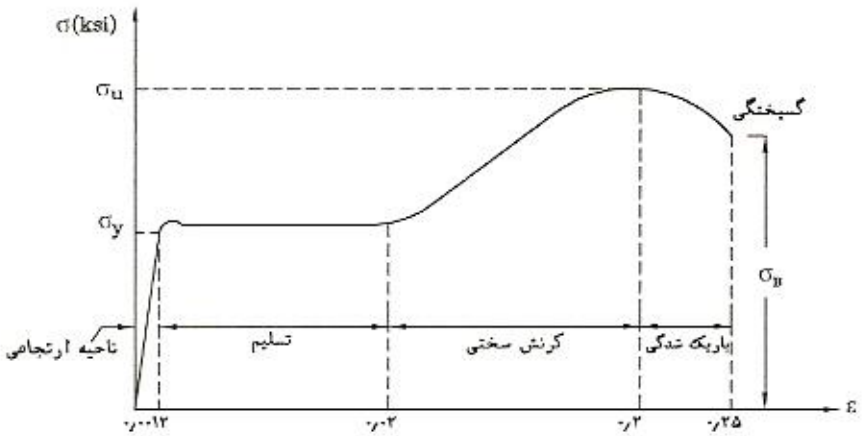
عملیات باز پخت فولاد سبب می‌شود که تا حد بسیار قابل توجهی چقرمگی (toughness) و شکل‌پذیری (ductility) فولاد بالا برود و ازبروزترک درفولاددرحین جوشکاری‌جلوگیری شود.

در جوش خود حفاظ قوس الکتریک (SMAW) الکترودها با علایم E70xx, E60xx *و ... مشخص می‌شوند. حرف* E *به معنی الکترود (Electrod) بوده، دو رقم اول (۶۰، ۷۰ و ...) بیان کنندهٔ مقاومت کششی فولاد الکترود برحسب* ksi *و دو رقم بعدی که با* xx *مشخص شده‌اند، بیان کنندهٔ گروه و وضعیت مصرفی الکترود است.*

۲ ـ ۱ منحنی تنش ـ کرنش فولاد در درجهٔ حرارت محیط

همان طور که در شکل زیر ملاحظه می‌شود، هر گاه کرنش نمونهٔ فولادی به ۱۵ الی ۲۰ برابر (در اینجا ۱۷ ≈ $\frac{۰/۰۲}{۰/۰۰۱۲}$ برابر) کرنش حد ارتجاعی برسد، بار دیگر فولاد در مقابل افزایش کرنش از خود سختی

نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، منحنی تنش ـ کرنش فولاد با شیبی ملایم‌تر از شیب قسمت ارتجاعی فولاد امتداد پیدا می‌کند. این ناحیه از منحنی را ناحیهٔ سختی ـ کرنش (strain hardening) می‌گوییم.



شکل ۲ـ۱ . منحنی تنش ـ کرنش فولاد در درجه حرارت محیط

نرمی فولاد: نرمی فولاد را می‌توان تغییر شکل غیرقابل برگشت فولاد دانست. اندازه‌گیری نرمی فولاد با تعیین درصد تغییر طول نمونهٔ فولادی درهنگام گسیختگی نیز معین می‌شود.

(در شکل بالا ۰/۰۰۱۲–۰/۲۵ = اندازهٔ نرمی)

ضریب ارتجاعی برشی (G): برای فولادهای ساختمانی در حدود $۰/۸ \times ۱۰^{۶} \frac{kg}{cm^{۲}}$ است:

$$G = \frac{E}{۲(۱ + \nu)} \Rightarrow \frac{E}{۲} < G < \frac{E}{۳}$$

۳ ـ ۱ عملکرد فولاد در درجه حرارتهای بالا

وقتی که دمای فولاد از مرز ۹۵°C می‌گذرد، کم کم منحنی تنش ـ کرنش فولاد شکل خطی خود را در ناحیهٔ ارتجاعی از دست داده نقطه جاری شدن حذف می‌شود و E و σ_y و مقاومت کششی با افزایش دما رو به کاهش می‌گذارند.

فولادهایی که حدوداً درصد کربن بالایی دارند بین دمای ۱۵۰ و ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد از خود، کهنگی کرنش (Strain aging) نشان می‌دهند. این نوع رفتار به معنی صعود نسبی تنش تسلیم و مقاومت کششی فولاد در حدود دماهای یاد شده می‌باشد. سایر تأثیرات دمای بالا بر روی فولاد به شرح زیر است:

الف ـ خزش برای بتن پدیده‌ای معلوم است، ولی برای فولاد در دمای محیط، خزشی ملاحظه نمی‌شود. اگر دمای فولاد بالا رود مقدار خزش آن نیز قابل توجه خواهد شد.

ب ـ خاصّیت شکنندگی فولاد به دلیل تغییر خاصیت متالورژیکی آن در بیش از $^{\circ}C$ ۵۱۰ افزایش می‌یابد.

ج ـ مقاومت در برابر اکسید شدن از $^{\circ}C$ ۵۴۰ به بالا، به شدت نقصان می‌یابد.

۴ ـ ۱ ترد شکنی

«یک نوع خرابی فاجعه انگیز است که بدون تغییر شکل اولیه خمیری (که می‌تواند خبردهنده باشد.) به سرعت اتفاق می‌افتد.»

تردشکنی به عوامل زیر بستگی دارد:

۱ ـ ۴ ـ ۱ دما

هر قدر دما پایین‌تر رود، خطر تردشکنی افزایش خواهد یافت. همچنین در بالاتر از $^{\circ}C$ ۵۴۰، رسوب عناصر آلیاژی فولاد سبب ایجاد ساختاری ترد می‌گردد.

۲ ـ ۴ ـ ۱ ضخامت

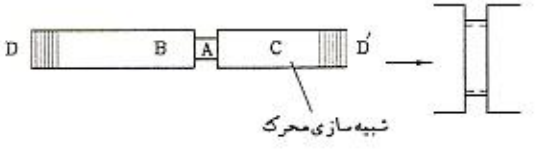
هر قدر فولاد ضخیم‌تر باشد، خطر ترد شکنی افزایش بیشتر خواهد یافت زیرا بدلیل اثر پواسون اثر بعد سوم ناچیز نمی‌شود و حالت تنش سه محوری رخ می‌دهد و تمایل تردشکنی فولاد افزایش می‌یابد.

۳ ـ ۴ ـ ۱ حالت سه محوری تنش

عضوی که تحت تنش سه محوری قرار دارد، نسبت به عضوی که تحت تنش تک محوری قرار دارد، تردشکن‌تر است.

۴ ـ ۴ ـ ۱ ترک و زخم و شکاف

وجود شکاف سبب می‌شود که از جاری شدن خمیری نمونه جلوگیری شده، نمونه ناگهان شکسته و گسیخته گردد. به شکل زیر دقت کنید.

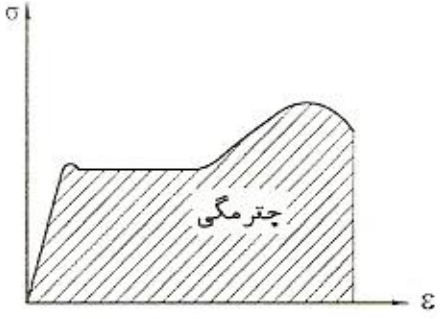


شکل ۳ـ۱ . شبیه‌سازی ترک

۵ـ۱ چند تعریف

۱ـ۵ـ۱ چقرمگی

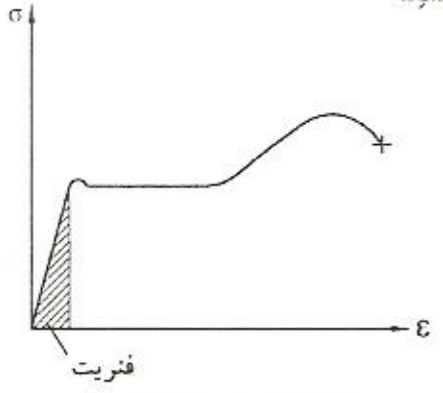
مقدار انرژی قابل جذب ارتجاعی و غیرارتجاعی توسط واحد حجم مصالح تا لحظهٔ گسیختگی است. اگر تنش تک محوری باشد، مقدار چقرمگی را می‌توان با سطح زیر منحنی تنش ـ کرنش معین کرد.



شکل ۴ـ۱ . چقرمگی

۲ـ۵ـ۱ فنرّیت

نشان دهندهٔ قدرت جذب انرژی ارتجاعی مصالح است. ضریب فنریت، مقدار انرژی ارتجاعی قابل جذب توسط واحد حجم مصالح را می‌رساند که مقدار آن برای فولاد با سطح زیر منحنی تنش ـ کرنش تا شروع نقطهٔ خمیری معین می‌شود.

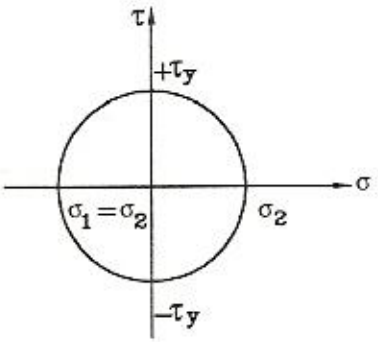


شکل ۵ـ۱ . تعریف فنرّیت

۳ـ۵ـ۱ تنش تسلیم برشی (τ_y)

ثابت می‌شود که تنش تسلیم برشی فولاد برابر با $\frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$ می‌باشد.

اثبات: در شکل (۶ـ۱) دایره موهر مربوط به حالتی که تنش برشی خالص وجود داشته باشد ،نمایش داده



شکل ۶ـ۱ . دایرهٔ موهر

شده است.

اما مطابق تئوری گسیختگی انرژی اعوجاج (هوبر، فن مایزز، هنکی)، در حالت دو بعدی داریم:

$$\sigma_y^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 \Rightarrow \sigma_y^2 = \sigma_1^2 + (-\sigma_1)^2 - \sigma_1 (-\sigma_1) = 3\sigma_1^2 \Rightarrow \sigma_1 = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$$

در نتیجه مطابق دایرهٔ موهر داریم: $\tau_y = \sigma_1 = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$

۴ ـ ۵ ـ ۱ نسبت پواسون (μ)

برای فولادهای ساختمانی مقدار نسبت پواسون در حوزهٔ ارتجاعی ۰/۳ و در حوزهٔ خمیری ۰/۵ است. (مقدار ۰/۵ برای حالتی است که فولاد بدون افزایش نیرو، تغییر شکل (و نه تغییر حجم) پیدا می‌کند).

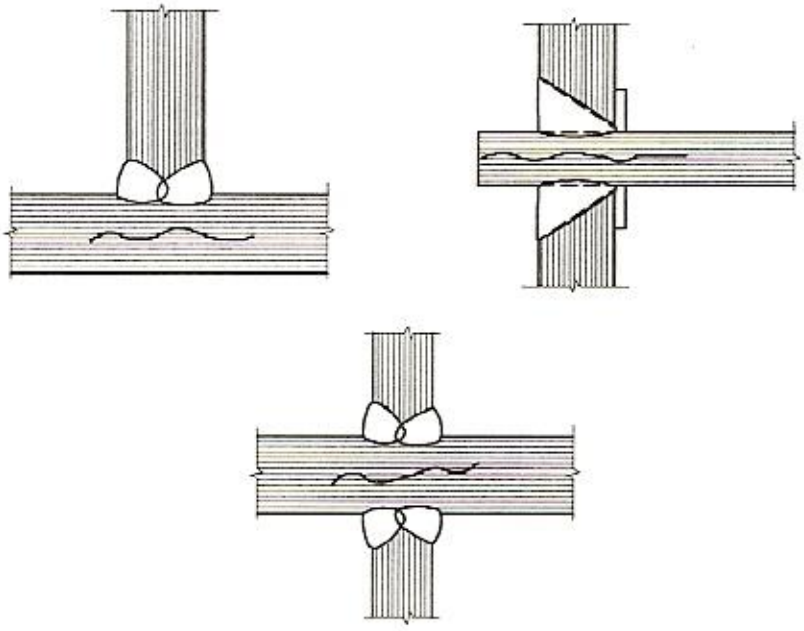
در شکل (۳ـ۱)، وقتی میلهٔ DD′ تحت کشش واقع می‌شود، بدون اینکه B و C حتی به جاری شدن برسند (در حالت کلی : بدون اینکه B و C به گسیختگی برسند)، تکهٔ A به مرحلهٔ باریک شدگی می‌رسد و گسیخته می‌شود. پس میلهٔ DD′ پس از یک تغییر شکل کوچک (ونه در حد ۰/۲۵ = ε) به مرحلهٔ گسیختگی می‌رسد که این همان ترد شکنی است.

۶ ـ ۱ بارهای جنبشی (دینامیک)

هر قدر بارهای خارجی سریعتر وارد شوند، خطر تردشکنی بیشتر خواهد بود.

۷ ـ ۱ پارگی لایه‌ای

نوعی ترد شکنی است که در فولاد مبنا و در محلهای جوش اتفاق می‌افتد. به سبب انقباض شدید فلز جوش، فولاد مبنا در بعد ضخامت خود در سطحی موازی دو سطح خارجی، ترک لایه‌ای بر می‌دارد.



شکل ۷ـ۱ . نمایش پارگی لایه‌ای در چند اتصال جوشی

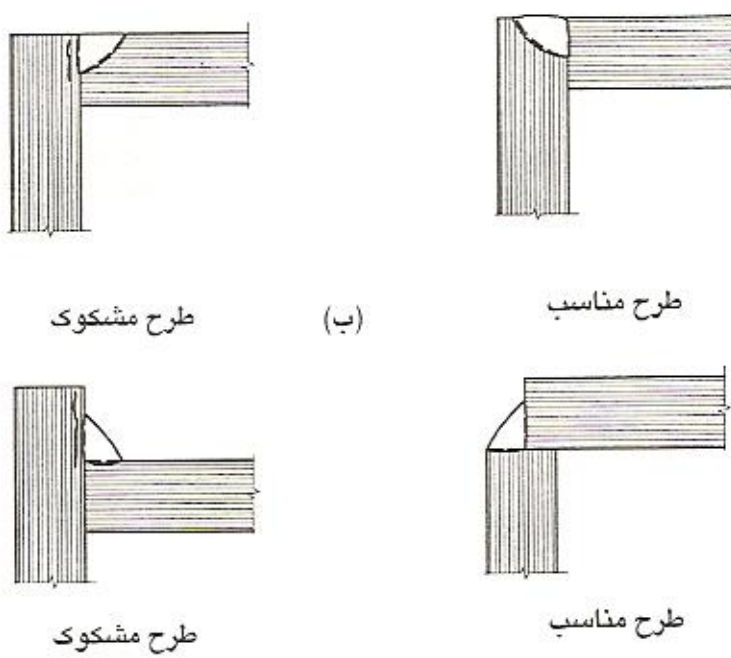
البته یکی از عوامل تقویت پارگی لایه‌ای این است که خاصیت شکل‌پذیری فولاد، (قدرت تحمل کرنش) در جهت ضخامت به مراتب کمتر از خاصیت شکل‌پذیری فولاد، در جهت نورد آن است.

حد ارتجاعی فولاد (σ_y) ***نیز در جهت عرضی، کمی پایین‌تر از حد ارتجاعی*** (σ_y) ***آن در جهت نورد است.***

همان طور که قبلاً گفته شد، انقباض جوش در جهت ضخامت قطعهٔ فولادی موجب پارگی لایه‌ای می‌شود، لذا طرح جوش اتصال باید به نحوی باشد که انقباض جوش در جهت نورد قطعه عمل کند.

طرح مناسب　　طرح مشکوک

(الف)



شکل ۸ـ۱ . امکان ایجاد پارگی لایه‌ای را می‌توان با طرحی مناسب کاهش داد.

۸ ـ ۱ استحکام خستگی

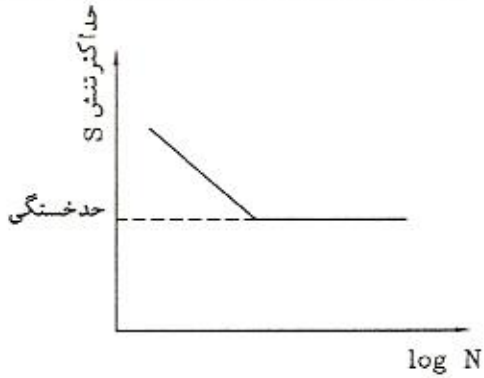
تکرار عمل بارگذاری و حذف بار، اگر به دفعات قابل توجهی انجام گیرد، حتی اگر تنش کمتر از تنش تسلیم ایجاد کند، ممکن است نهایتاً به گسیختگی قطعه بیانجامد. یک چنین پدیده‌ای به نام خستگی شناخته می‌شود.

هر چه فولاد نرمتر باشد، مقاومت بیشتری در برابر خستگی خواهد کرد.
به وجود آمدن تنش چند محوری، از مقاومت در برابر خستگی خواهد کاست.

حَد خستگی (fatigue limit): تنشی است که در تعداد دوره تناوب بسیار زیاد (بیش از حدود دو میلیون) باعث گسیختگی می‌شود. (شکل ۹ـ۱)

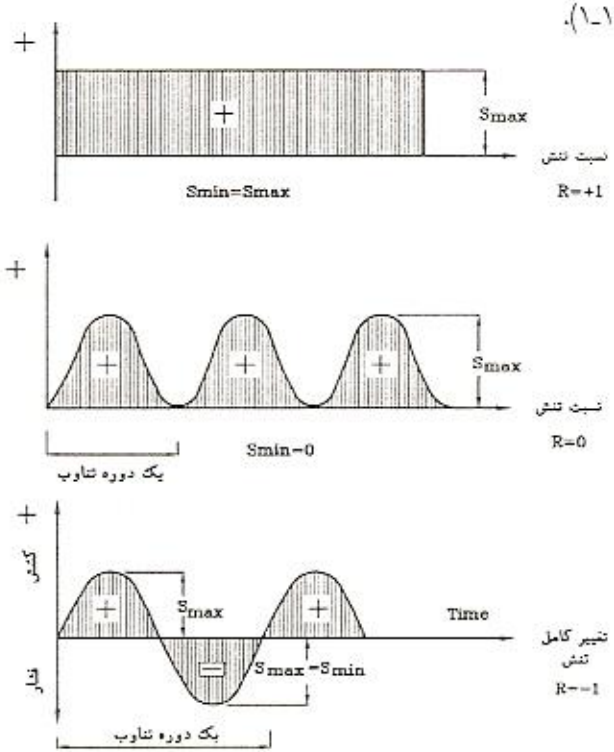
در مورد ساختمانهای فولادی چون تعداد دورهٔ تناوب در عمر سازه یکصد هزار یا کمتر می‌باشد، تقلیل مقاومت فولاد ناچیز خواهد بود ولی در پلهای بزرگراهها انتظار می‌رود که تعداد دورهٔ تناوب بارگذاری در عمر

سازه بیش از یکصدهزار باشد و بدین سبب در این سازه‌ها خستگی، مسألهٔ مهمی خواهد بود.



شکل ۹ـ۱ . منحنی تغییرات متداول S - N در مقایس لگاریتمی

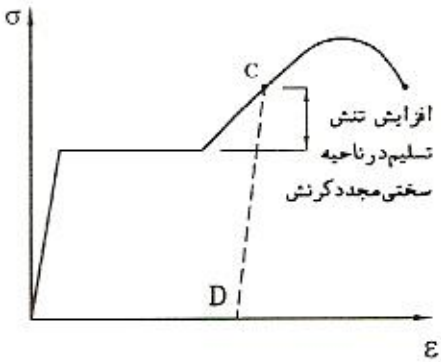
زمانی که نسبت تنش (یعنی R) بین $\frac{1}{2}$ و ۱+ است، خستگی نقشی بازی نمی‌کند، به عبارت دیگر تا زمانی که تنش حداقل، کمتر از $\frac{1}{2}$ تنش حداکثر نباشد به شرطی که از نوع تنش حداکثر نیز باشد، خستگی نقشی ندارد (شکل ۱۰ـ۱).



شکل ۱۰ـ۱ . انواع تغییرات متناوب تنش برای نسبتهای مختلف تنش از R = +۱ الی R = −۱

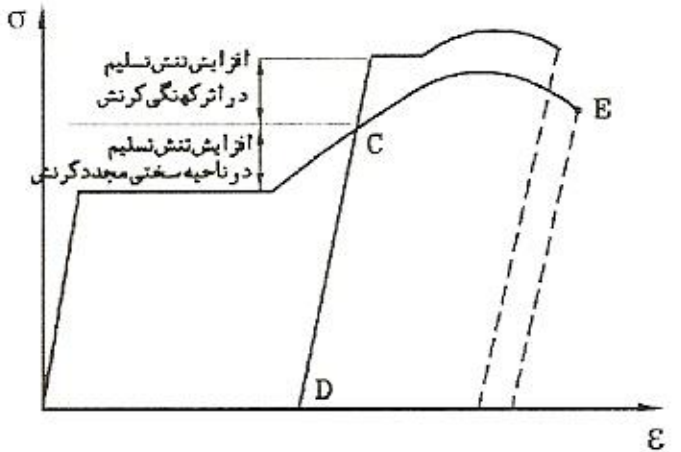
۹ـ۱ کارسرد و سخت گردانی کرنشی

در شکل (۱۱ـ۱) نمونه را تا نقطهٔ C تحت بار قرار می‌دهیم و در این نقطه بار را از روی آن حذف می‌کنیم. در برگشت به حالت بدون بار، منحنی طول خط بریده CD را طی کرده، مبدأ بارگذاری مجدد نمونه نقطهٔ D می‌شود. دیده می‌شود که طول خط CD بلندتر شده و به عبارت دیگر، تنش تسلیم فولاد نمونهٔ جدید افزایش یافته است، یک چنین تغییر حالت فولاد به دلیل قطع بارگذاری در ناحیهٔ سخت گردانی کرنش فولاد است و در عوض با در نظر گرفتن موقعیت نقطهٔ D دیده می‌شود که شکل‌پذیری فولاد جدید به شدت کاهش یافته است. به چنین عملیاتی که بر روی فولاد در دمای محیط و به منظور تغییر خواص مکانیکی فولاد انجام می‌گیرد، کار سرد می‌گویند.



شکل ۱۱ـ۱ . کار سرد

ممکن است چنین به نظر برسد که افزایش مقاومت فولاد به قیمت از دست رفتن شکل‌پذیری فولاد و از بین رفتن نقطهٔ کاملاً مشخص تنش تسلیم فولاد به پله خمیری فولاد حاصل می‌شود ولی حقیقت این است که پس از مدتی که بار نمونه حذف شد، فولاد جدید خواص مکانیکی دیگری را که آنرا نمی‌توان با نقاط C و D و E شکل (۱۲ـ۱) نشان داد، از خود نشان می‌دهد. به پدیده‌ای که بر طبق آن یک چنین تغییر حالتی حاصل می‌شود کهنگی کرنش اطلاق می‌شود که بر طبق آن فولاد جدید تنش تسلیم بالاتری از خود نشان داده، بار دیگر دارای پله خمیری و ناحیهٔ سختی مجدّد کرنش (شکل ۱۲ـ۱) خواهد شد.



شکل ۱۲ـ۱ . تأثیر کهنگی کرنش

پرسشهای چهارگزینه ای

۱ ـ با افزایش مقدار کربن در آلیاژ فولاد:

۱ ـ جوش‌پذیری فولاد بهتر می‌شود.

۲ ـ فولاد شکننده شده و مقاومت‌فشاری آن افزایش یافته و جوش‌پذیری آن کاهش می‌یابد.

۳ ـ فولاد شکننده شده و تغییر شکل‌پذیری آن افزایش یافته و جوش‌پذیری آن کاهش می‌یابد.

۴ ـ هیچ تأثیری در خواص فولاد به وجود نمی‌آید.

۲ـ برای فولاد نرمه ساختمانی بین حد ارتجاعی برش F_{ys} و حد ارتجاعی کششی F_y کدام رابطه برقرار است؟

۱ ـ $F_{ys} = F_y$ ۲ ـ $F_{ys} = \sqrt{\frac{۲}{۳}}\, F_y$

۳ ـ F_{ys} ربطی به F_y ندارد. ۴ ـ $F_{ys} = \frac{۱}{\sqrt{۳}}\, F_y$

۳ ـ نسبت پواسون برای فولاد در محدودهٔ ارتجاعی بین کدام دو عدد قرار دارد؟

۱ ـ ۰/۵ تا ۰/۶ ۲ ـ ۰/۳۵ تا ۰/۴۳ ۳ ـ ۰/۲۵ تا ۰/۳۳ ۴ ـ ۰/۱۵ تا ۰/۲۳

۴ ـ معایب استفاده از فولاد کدامها می‌باشند؟

۱ ـ قیمت بالا

۲ ـ قابلیت زنگ زدن آن بالاست

۳ ـ برای محافظت در برابر زنگ زدن باید آنها را رنگ کرد یا ...

۴ ـ همهٔ موارد

۵ ـ می‌نیمم درصد افزایش طول فولاد نرم (تحت کشش تا زمان گسیختگی) چه مقدار می‌باشد.

۱ ـ ۱ درصد ۲ ـ ۲ درصد ۳ ـ ۵۰ درصد ۴ ـ ۲۳ درصد

۶ ـ فولادهای ساختمانی عموماً حاوی ... درصد کربن هستند.

۱ ـ ۰/۱۵ تا ۰/۲۹ ۲ ـ ۰/۳ تا ۰/۵۹ ۳ ـ ۰/۶ تا ۱/۷ ۴ ـ کمتر از ۰/۱۵

۷ ـ کدام عملکرد نمی‌تواند به راحتی روی فولاد نرم اعمال شود؟

۱ ـ سوراخ کردن ۲ ـ برش ۳ ـ پانچ کردن ۴ ـ سخت گردانی

۸ـ خزش در فولاد ...

۱ ـ اصلاً مشاهده نمی‌شود.

۲ ـ در تنشهای پایین ملاحظه نمی‌شود و فقط در تنشهای بالا مشاهده می‌شود

۳ ـ در دمای محیط ملاحظه نمی‌شود ولی اگر دمای فولاد بالاتر برود، مقدار خزش آن نیز قابل توجه خواهد شد.

۴ ـ همیشه همانند بتن وجود دارد.

۹ ـ شیب مماس بر یک نقطه روی نمودار تنش ـ کرنش بالاتر از محدودهٔ ارتجاعی چیست؟

۱ ـ ν، نسبت پواسون

۲ ـ E_s، ضریب کرنش ـ سختی

۳ ـ σ_y، تنش تسلیم

۴ ـ E، ضریب الاستیسیته

۱۰ـ کدامیک از عبارتهای زیر نادرست می‌باشد؟

۱ ـ تمامی فولادها دارای پله خمیری مشخصی می‌باشند.

۲ ـ ضریب ارتجاعی برش کمتر از نصف ضریب الاستیسیته فولاد می‌باشد.

۳ ـ عضوی که تحت تنش سه محوری قرار دارد، نسبت به عضوی که تحت تنش تک محوری قرار دارد، ترد شکن‌تر است.

۴ ـ حد خستگی، تنشی است که در تعداد دورهٔ تناوب بیش از حدود دو میلیون باعث گسیختگی می‌شود.

۱۱ـ کدام جمله صحیح است؟

۱ ـ اگر در یک میلهٔ فولادی تحت کشش، تنش بیش از تسلیم بشود، فولاد پلهٔ خمیری خود را از دست می‌دهد.

۲ ـ کار سرد، موجب کاهش شکل‌پذیری فولاد می‌گردد.

۳ ـ پدیدهٔ کهنگی کرنش موجب کاهش تنش گسیختگی می‌گردد.

۴ ـ همهٔ موارد