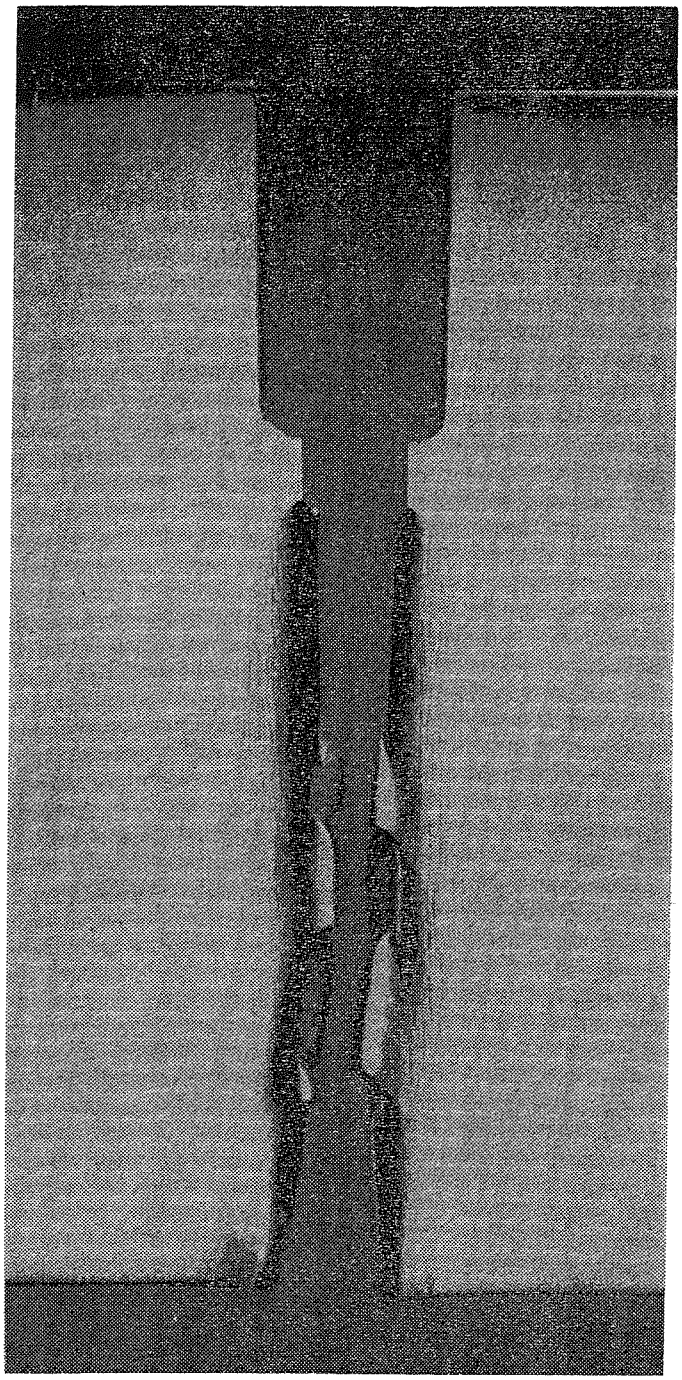
فولادهای سخت و نشکن

ازمجله : Scintific Americon
ترجمه از : حسن مکارمی دانشجوی دانشکده صنعتی



آشنائی نزدیکتر با جامدات ما را به آلیاژهائی رهنمون نموده است که سخت‌تر از هر آلیاژی است فلزهای مستحکم و سخت‌ترد و شکننده‌اند و مسلماً فولاد هم از این قانون مستثنی نیست . فولادهای تجارتی اگر سخت باشند ترد و شکننده‌اند و اگر ترد نباشند استحکامشان کم است .

درعرض چند سال جاری پیشرفتهائی در زمینه آشنائی اصولی جامدات حاصل شده است که به کشف دستهٔ جدیدی از فولادهای بسیار سخت ولی نشکن رسیده‌اند (این آلیاژها باسم تجارتی trip معروف شده‌اند که علامت اختصاری برای Transf ormation Induced Placticity ـ یعنی خاصیت نرمی که در اثر تغییر فاز یا حالت بوجود می‌آید ـ میباشد .

با شناخت فولادهای جدید دلائل قابل لمسی بوجود آمده است تا جواب این سئوال داده شود که: آیا می‌توان فولادی ساخت که درعین استحکام دارای شکنندگی کمتری باشد ؟

بسیاری از کوششهای اولیه در پاسخ دادن به این سئوال بی‌نتیجه ماند شاید باین دلیل که تا سال های اخیر اطلاعات ناقصی از پدیده‌های اساسی بوجود آورندهٔ تردی و نرمی جامدات در دست بوده است . آگاهی از این پدیده در عرض دههٔ اخیر گسترش یافته و بتدریج کار برد تئوریهای خواص جامدات ،

تاجائیکه‌ساختمان داخلی آنها بطور دلخواه تغییر کند ممکن گشته است .

شکستن فلزات یکی از پدیده‌هائی است که ارتباط زیادی با علوم و مهندسی دارد . شکستگی در پل‌ها ، تانك‌ها ، لوله‌ها و اجزاء ماشین از نظر اساسی مربوط به این موضوع است که چگونه اتمها درضمن‌شکستن‌یك‌یك کریستالها ازهم‌جدامی گردند

تجربه ومحاسبه نشان‌داده است که فلزات‌باید ۱۵ برابر محکم‌تر ازآن باشند که در عمل مهندسی محاسبه می کنند . ولی امید دسترسی به این استحکام ازنظر فنی کم است تجربه نشان داده است که وقتی فلزات با عملیات مکانیکی و یا حرارتی محکم تر میشوند، شکننده نیز می گردند ، که ازنظر مهندسی قابل استفاده نمی‌باشد و بالنتیجه مواردداستعمال آنها در صنعت کمتر می گردد .

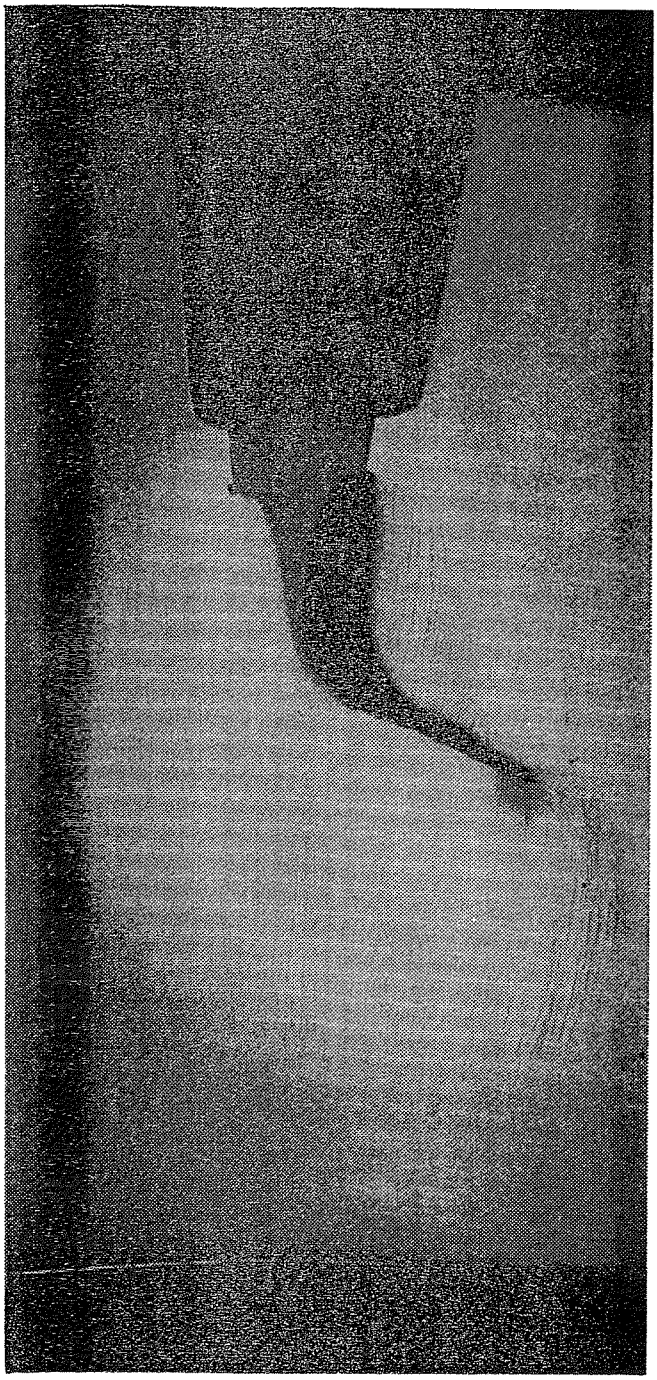
سئوالاتی که‌دراینجامطرح می‌شوند ازاینقرارند:

چرا مواد هنگامیکه‌محکم می‌شوند شکننده ترمیگردند؟ آیامی‌توان کاری کرد که‌استحکام‌فلزات دویا سه برابرشود بدون‌اینکه شکنندگی آنهاطوری بالا رود که مانع استفاده از آنها بشود ؟

اگرچه این سئوالات بطورکامل پاسخ داده نشده‌اند . ولی‌باعث شده‌اند که معلومات ابتدائی در موردشکستگی(Fracture)وflow (تغییرفرم‌بطور پلاستیکی) فلزات ، در تعقیب سئوالات فوق حاصل گردند .

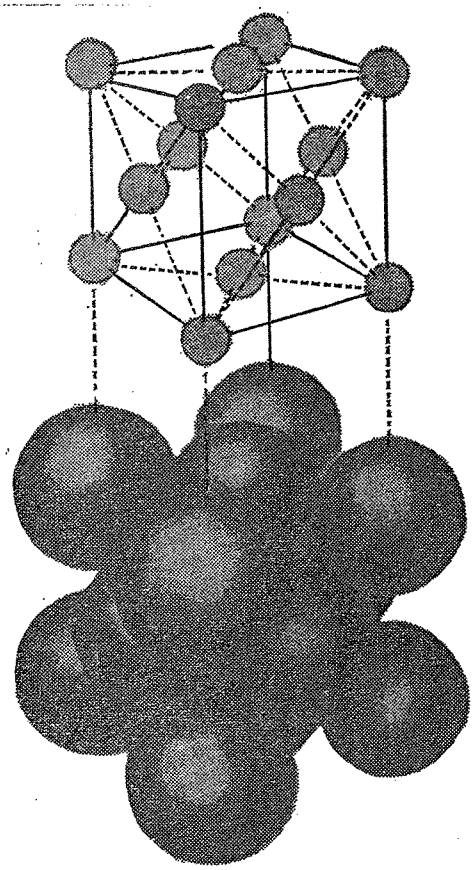
یکی از این نوع تحقیقات که می‌تواند مثالی برای بالا بردن حد قدرت و تقلیل تردی فلزات در صنعت ، درعرض دههٔ اخیر باشد ، تحقیق در بارهٔ فولادهای trip می‌باشد .

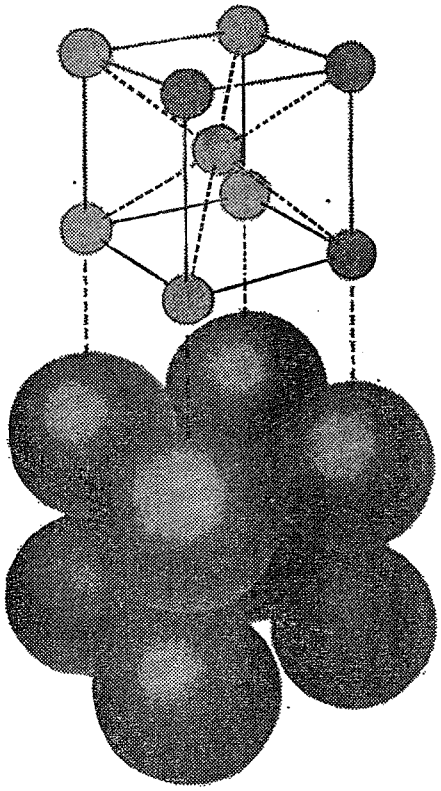
بچندین دلیل از بین فلزات مختلف فولاد برای تحقیقات‌بعدی انتخاب شد،یکی‌اینکه فولاد ازارزان ترین وپرمصرف‌ترین فلزات‌است، وازطرفی‌فولاد از



نوع فلزاتی است که می‌توان در بارهٔ آن به بحث بیشتری اقدام نمود .

فولاد آهنی است که بعنوان آلیاژ با کربن و اغلب عناصر دیگر مثل ، نیکل ، کرم ، و مولیبدن مخلوط است . ساختمان کریستالی آهن در درجات حرارت معمولی تغییر می کند . در درجات حرارت پائین‌تر اتمهای آهن بصورت مکعب با اتم مرکزی (Body Centered Cubic)، دردرجات‌بالا،اتم‌ها





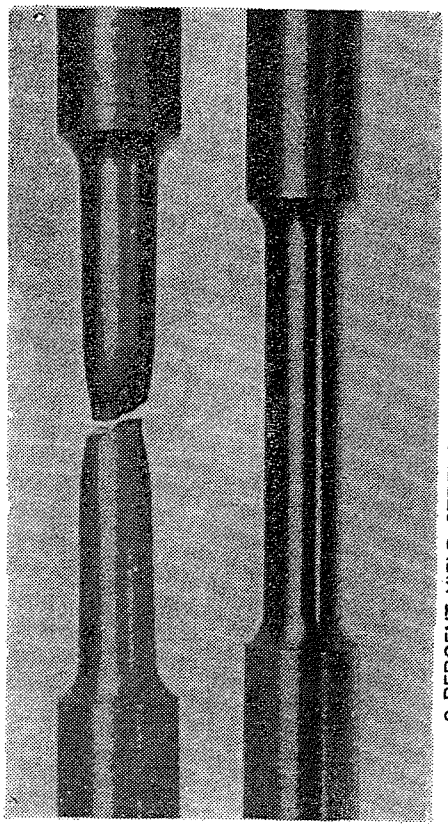
شکل ۳ و ۴ ـ اتمهای آهن درفولاد بدوصورت شکل فوق میتوانند قرار گیرند .دردرجه حرارت ۹۱۰ـ ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد اتمها بصورت شکل سمت راست باعلامت اختصاری F. C. C ودردرجه حرارت معمولی بصورت مکعب بااتم رویه(FaceCentered Cubic) میباشد . شکل (۴و۳) .

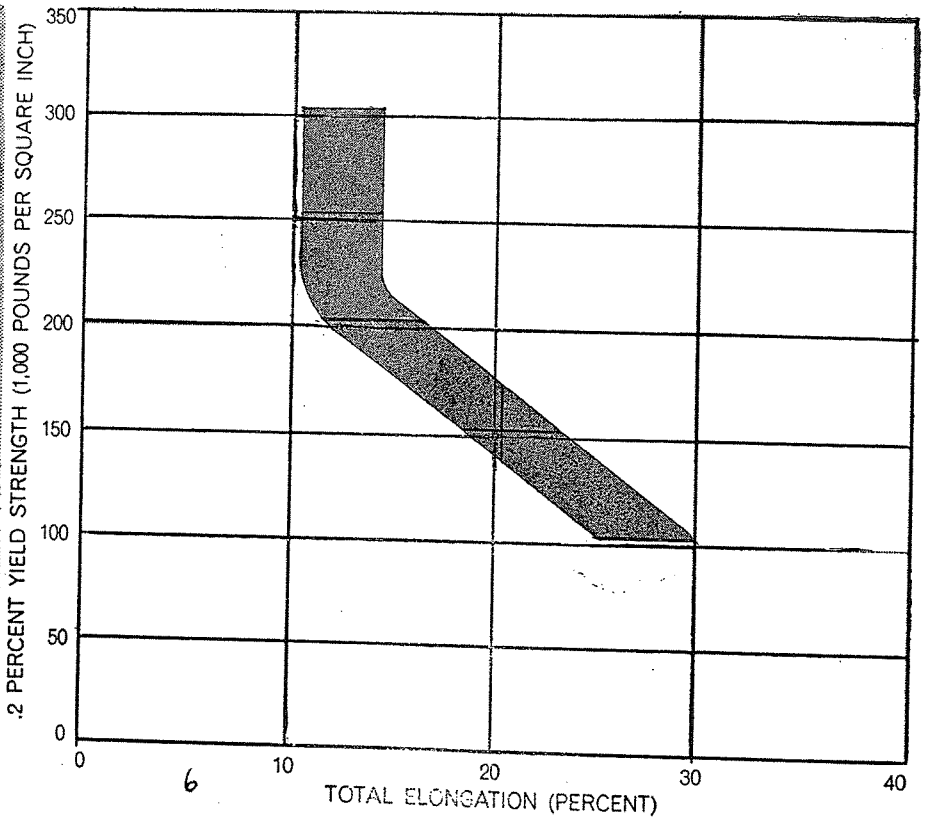
محیط بصورت شکل سمت چپ با علامت اختصاری b.c.c قرارمیگیرند. اتمهای کربن میتوانند دردرجه حرارت های زیاد درآهن حل شوند زیرا نفوذ اتمها درحالت f.c.c امکان پذیرتر ازحالت b . c . c است .

اتمهای آهن بآن اندازه کوچك هستند که در فضای آزاد مکعب با اتم در رویه جای بگیرند ولی خیلی بزرگتر از آنند که بتوانند در فضای آزاد آهن با کریستالهای مکعب با اتم مرکزی قرار گیرند و بهمین دلیل درجهٔ حلالیت کربن در آهن دردرجات پائین که بصورت B C.C حرارت میباشد خیلی کمتر ازحلالیت کربن دردرجات حرارت بالااست که آهن در حالت F.C.C قرار دارد، و درنتیجه کربنی که در درجهٔ حرارت بالادر F.C.C محلول است وقتی فلز سرد می‌شود رسوب میکند منتها نه بصورت کربن آزاد بلکه بصورت ترکیب Fe3 C که سمنتیت نامیده می‌شود. و ترکیبی است خیلی سخت و شکننده .

زمانیکه Fe3 C از آهن جدا می‌شود باعث جلوگیری لغزش آزاد اتمهای هم سطح بر روی یکدیگر می گردد. با تراز کردن مخلوط از نظر مقدار کربن درفولاد وهمچنین با کنترل اعمال حرارتی برای ایجاد ذرات مطلوب سختی وقدرت فولاد چهار یا پنج برابر خواهد شد ، قدرتی که افزایش یافته است بهرشکل که باشد مقداری تـردی وشکنندگی بهمراه دارد . مسئله‌ای که اینجا طرح می گردد تا اگر بتوانیم جواب بدهیم اینست که، تردی فولاد، درضمن افزایش استحکام آن زیاد می گردد .

درارزیابی مقاومت کششی (tensile strength) و تردی فولاد های مهندسی معمولا حد الاستیسیته





شکل ۵ ـ میله‌های آزمایش برای اندازه گیری مقاومت و نرمی نمونه‌های فولاد در ماشین مخصوص تعین مقاومت بکار برده میشوند وقبل‌ازشکست نهائی ضخامت‌میله تقلیل مییابد .

شکل ۶ ـ مقاومت و نرمی فولادهای تجارتی با مقاومت زیاد در داخل نوار رنگی نمودار مشخص شده . مقاومت نقطه بحرانی معادل باری است که افزایش طولی برابر 2٪ درصد برای میله ی بقطریك‌اینچ‌ایجاد نماید . افزایش طول اندازه‌ای از نرمی است که معمولا برحسب درصد بیان میشود این افزایش طول مقداری است که میله بطول دواینچ قبل ازپاره شدن کشیده میشود .

yield steength در مقابل ازدیادطول **(Elongation)**

فولاد های مورد آزمایشی که از هم جـدا می‌شوند مطرح می گردد (شکل ۵) حدالا ستیسیته ، مقیاسی است از قدرت تحمل مفید فلز و برابراست با مقدار نیروی لازم برحسب پاوند که بطور دائم یك میله را با سطح مقطح یك اینچ مـربع از دو طرف بکشد . (این کشش معمولا ازدیاد طـولی برابر 2 درصد طول اصلی فلز درنمونه باقی‌میگذارد) .

ازدیاد طول مقیاسی‌برای تردی فلزاست، یعنی یك‌فلز چقدرمی‌تواندقبل‌ازاینکه بشکند، کشیده‌شود؟ این ازدیاد طول بوسیلهٔ شکستن‌حقیقی میله‌ها از راه کشیدن آنها دریك‌ماشین آزمایش‌دقیق‌واندازه گیری جدائی بین دو نقطه که فاصلهٔ آنها بطور دقیق ۲اینچ می‌باشد اندازه گرفته میشود .

وقتی میله کشیده میشود ، دو نقطه ابتدا و انتهای آن‌ازهم دورمی گردند مقدارفاصله‌ای که آنها ازهم دور گشته‌اند برمقدار فاصلهٔ حقیقی آنها تقسیم می گردد واین کسررا ازدیادطول(Elongation) می نامند وبه درصدنشان می‌دهند .

وقتیکه بوسیلهٔ آلیاژشدن با فلزات دیگر یـا عملیات حرارتی، قدرت فولاداضافه می گردد. تردی بطور مداوم زیاد می گردد .

مهندسین‌با تجربه معمولا از فولادهائی باElong ation کمتراز ۱۰٪ کار نمی کنند، زیرا در وقایع مختلفی که این فلزات سهمی داشته‌اند ، بعلل پیش بینی نشده ترد گشته‌اند وبهمین دلیل عملا ، آخرین

حد الاستیسیته فولاد200000 پاوند بر اینچ مربع در نظر گرفته شده است .

متالورژیست ها درطول زمان بسیار زیادی سعی کرده اند که بتوانند آخرین حدالاستیسیته را بوسیلهٔ تئوری تعین کنند . خاصیتی کـه خیلی به ساختمان

بوسیله یك میکروسکپ نوری (با بزرگ نمائی ازصد تا دو سه هزار مرتبه) قابل تشخیص می باشند . مانند تشخیص پرلیت وفرمیت درفولادها . مثالهائی ازچنین ساختمانهای ذرات بوسیلهٔ عکس شمارهٔ۶ و ۷ که شامل ذره‌های سمنتیت است نشان داده شده‌است . که حالت

شکل۷ـ ورقه‌های کاربیدآهن دریك میکروگراف فولادکه ازحرارت سرخ سرد شده است بصورت راه های موازی بنظرمیرسد . سردشدن آرام ایجاد ساختمانی بـا زمینه آهن (زمینه تیره درشکل) مینمایدکه بطورمتناوب دربین آنها کاربیدآهن (سمانتیت Fe3c) قراردارد وقبل ازسردشدن اتمهای کربن در آهن حل شده است . کاربید آهن سخت ولی تردوشکننده است . بنابراین فولادهائیکه دارای ورقه‌های کاربیدآهن میباشنددراثرخم نمودن بآسانی میشکنند . سطح نمونه فوق پس از پلیش بااسید ضعیف اچ داده شده وتقریباً 2000 مرتبه بزرگ شده است .

داخلی و فازهای موجود در فلزات بستگی دارد و تا حال باین نتیجه رسیده‌اند که برای حل مشکل کار برد تئوری ریاضی که به (Continuum mechan ics) معروف شده ، بهتراز تئوری نیروی جـاذبه موجود بین اتمها میباشد ازتئوری ریاضی Continu um mechanics می‌توان برای هرماده هموژنی که خواص آن در تمام جهات یکی است استفاده نمود و خاصیت عمومی ماده را محاسبه کرد. خاصیت نرمی مواد بوسیلهٔ ساختمان ذرات یا کریستال(microstr ucture) معین می گردد نه بوسیله ساختمان اتمها. منظور از ساختمان ذرات ، آن ذرات داخلی است که

اول سمنتیت بصورت صفحه‌صافی است که باخطوط سفید درمیکروفیلم نشان داده شده است ، در شکل دیـگر سمنتیت بفرم کره میباشد. برحسب عملیات حرارتی و سردشدن فـلز یك فولاد می‌تواند هـر دو ساختمان فوق الذکر راداشته باشد . اگر فولاد بآرامی ازیك درجه حرارت بالا ، سرد گردد . ساختمان صفحه‌ای می‌یابد و فرم کره‌ای مربوط به حالتی است که سرد کردن آنی صورت می گیرد وفولاد دوباره تا درجه حرارت معینی گرم می‌شود .

Fe3C یك حالت بین فلزی است. (Inter m etalic) واین نوع ترکیبها طبیعتاً ترد وقوی میباشند

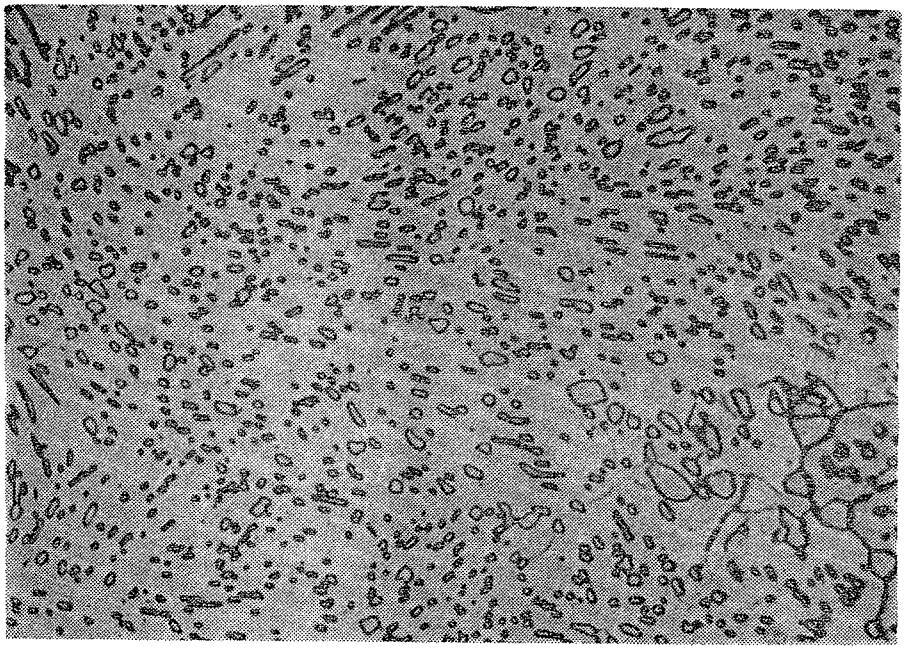
بنابراین هنگامیکه فولاد شامل صفحات Fe_3C خم می گردد یا کشیده میشود صفحه‌ها ترك برمی‌دارند.

با گسترش مداوم، ترکهای میکروسکپی زیاد گشته و باعث تردی آهن می گردند و تمام قطعه می‌شکند.

با تغییر آرایش سمنتیت به فرم کره‌ای همین فلز بهر صورت می‌تواند محکم شود، و ترد نباشد. فرم ذره های سخت، در تردی اثر مهمی دارند که یکی ازاین‌اثرات بوسیلهٔ آزمایش بایك کره شیشه‌ای قابل درك است. هر گاه یك کره شیشه‌ای از ارتفاع چندین پائی بیفتد، نمی‌شکند در حالیکه همین‌شیشه اگر بصورت ورقه‌ای باشد مطمئناً می‌شکند.

بکار رفته وذرات سمنتیت ازشکل‌صفحه‌ای به کره‌ای تبدیل‌شده واندازه وحجم این‌ذرات درحد الاستیسیته مؤثرند وجود عناصری دیگر مانندنیکل کرم، مولیبدن در آلیاژ، هیچگونه اثری در سختی حد الاستیسیتی Elongation ندارند.

بنابراین تمام فولادهای تجارتی که بوسیله عملیات حرارتی بوجود می آیند (عملیات حرارتی برای تغییر و کنترل فورم ذرات) دارای مشخصاتی هستند که در این منحنی بصورت خطی باریك نشان داده شده است ممکن است بنظر بیاید که‌کار زیادی نمیتوان کرد تارابطهٔ بین‌حدالاستیسیته‌و Elongation تغییر یابد، در صورتی که آزمایشهای دقیق‌تر نشان



شکل ۸ـ درنمونه فولادی‌که بسرعت درآب سرد شده ودوباره‌تاحدود ۳۰۰ تا ۴۰۰درجه سانتیگرادحرارت دیده است ذرات شبه‌کروی کاربید آهن مشاهده میشود. چون درموقع سرد شدن، کربن داخل محلول فرصت جدا شدن رانخواهد داشت در نتیجه درداخل محلول بصورت فوق اشباع باقی میماند. حرارت دادن مجدد، به‌کربن اجازه مهاجرت‌به نقاط دیگرآهن‌را داده وآن رابصورت ذرات شبه کروی رسوب‌کاربید آهن در میآورد. ذرات شبه کروی‌کاربید آهن مقاومت شکنندگی را بیشترنموده و فولادی بوجود میاوردکه بسیارسفت وپرطاقت‌ترازفولادبا ورقه‌های‌کاربید آهن میباشد.

ازمدتها پیش روشن بوده که شکل کریستالی می‌تواند رل مهمی در خاصیت نرمی و سختی فلزات بازی کند. تمام‌مشخصات‌فولادهای‌قوی، درشکل(۶) رسم گردیده‌است. برروی این‌فولاد عملیات حرارتی

می‌دهد که قدرت تردی که‌با Elongation مشخص می‌شود زیاد دقیق نیست.

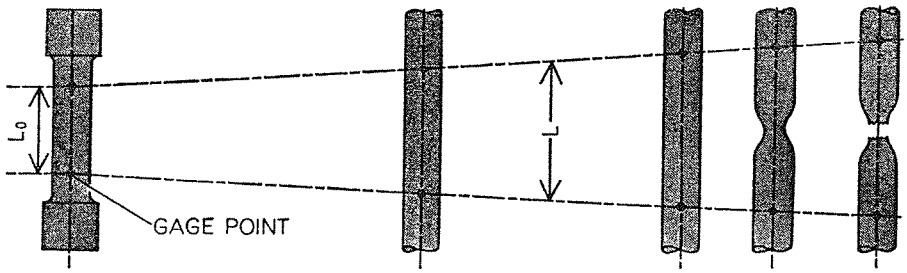
زمانیکه‌میلهٔ مورد آزمایش بوسیلهٔ کشش‌قطع می گردد، گسترش‌بطور یکنواخت درطول دو اینچ

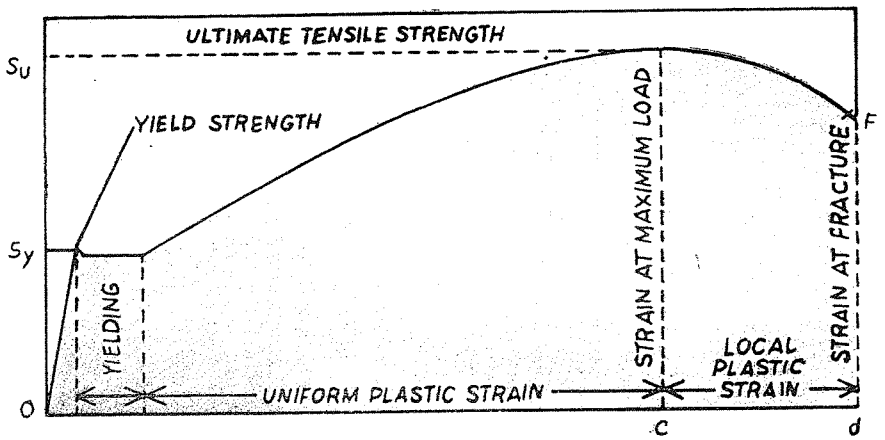
انجام نگرفته است .

درحقیقت این تغییر شکل تـا حد زیادی غیر یکنواخت است . برای تجزیه و تحلیل این عکس‌العمل هماهنگ دوبـاره از تئوری Continuum mechanics) کمك می گیریم. با نگاه دقیق‌تری به تغییرات ظاهری فلز در حالیکه بتدریج ازهم جـدا می گردد ، می‌بینیم در حالیکه بفلز بار می دهیم ، منحنی متناظر stress-strain آن بـه یك ماکزیمم

فلز بدست می آید .) شکل ۹ . بسیاری از مشخصات مهم فلزات بوسیلهٔ منحنی stress-strain نشان‌داده می‌شود کهاولین آن‌خاصیت‌الاستیسیته‌است که‌بوسیله ترسیم‌خط مستقیمی از مبداء تا نقطه تسلیم کشیده‌شده است نشان‌داده شده شکل ۱۰ .

با این مقدار بارفلز قابل ارتجاع استو اگر بار برطرف‌شود میله به‌حالت اولیه خودبرمی گردد. بعداز نقطه حدالاستیسیته ، ازدیاد طول‌دائمی شروع





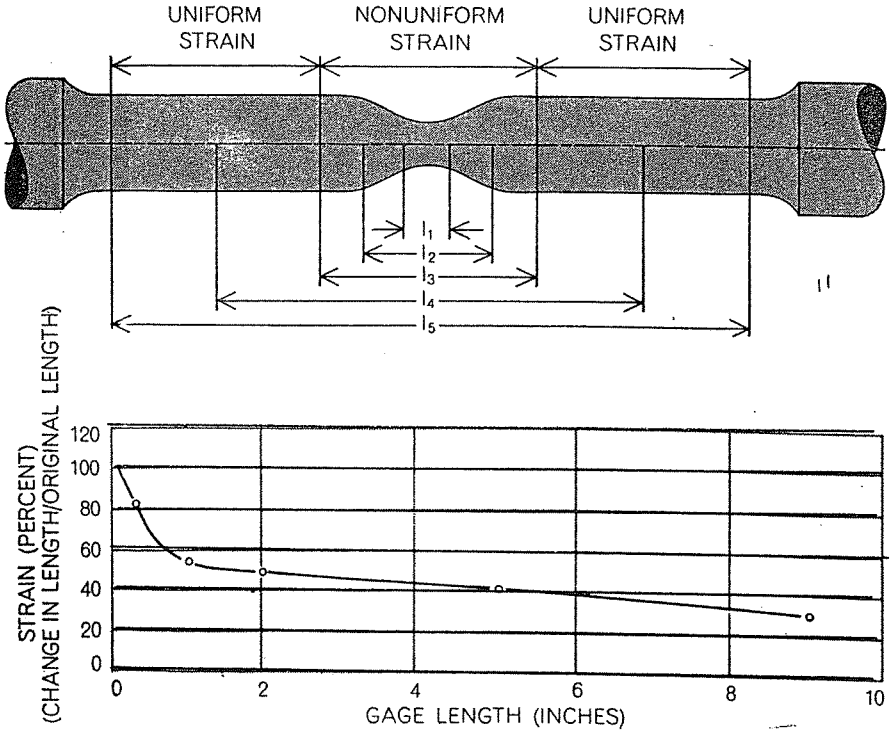
شکل ۹ و ۱۰ ـ منحنی کشش‌ودرصدافزایش طول نکات‌مهم ومشخصات فولادرا بطورخلاصه بیان میکند. برای بدست آوردن این منحنی بارروی میله‌آزمایش راتاموقع پاره شدن‌بتدریج زیادمیکنند . تنش عبارتست ازبارواردہ برمیله‌تقسیم‌برسطح‌مقطع‌میله ودرصدافزایش طول‌عبارتست ازتغییرطول میله تقسیم برطول اولیه‌آن بین دونقطه ثابت میله‌که طول‌اولیه‌آن‌معمولا 2 اینچ‌میباشد . چون‌نمونه در

ابتدای‌آزمایش‌فلز بصورت الاستیك‌است یك‌نسبت خطی‌بین تنش ودرصدافزایش طول برقراراست ولی درنقطه بحرانی اتمها بسرعت روی‌یکدیگر شروع به‌لغزش مینمایند بنابر این تغیرطول بصورت یکنواخت و دائمی در میآید . این جریان پلاستیکی ایجاد (strain – hardeniny) شده و تا ماکزیمم تنش ادامه خواهد یافت تا اینکه یك نقطه ازمیله باریکتر گردیده و بسرعت پاره میشود .

رسیده وسپس‌پائین‌می آید. (stress بمعنی کشش، که از تقسیم مقدار نیروبرسطح مقطع‌اولیه‌بدست می‌آید strain یا ازیاد طول نسبی بوسیلهٔ‌تقسیم ازدیاد طول بین دو نقطهٔ‌علامت گذاری شده دواینچی‌بطول‌اصلی

می گردد . وقتی که نیرو بعد از نقطهٔ حدالاستیسیته اضافه می گردد ، فلز قوی‌تر می‌شود .

با اضافه‌شدن ازدیادطول نسبی منحنی‌بسرعت صعود می کند تا به یك نقش ماکزیممی میرسد. که



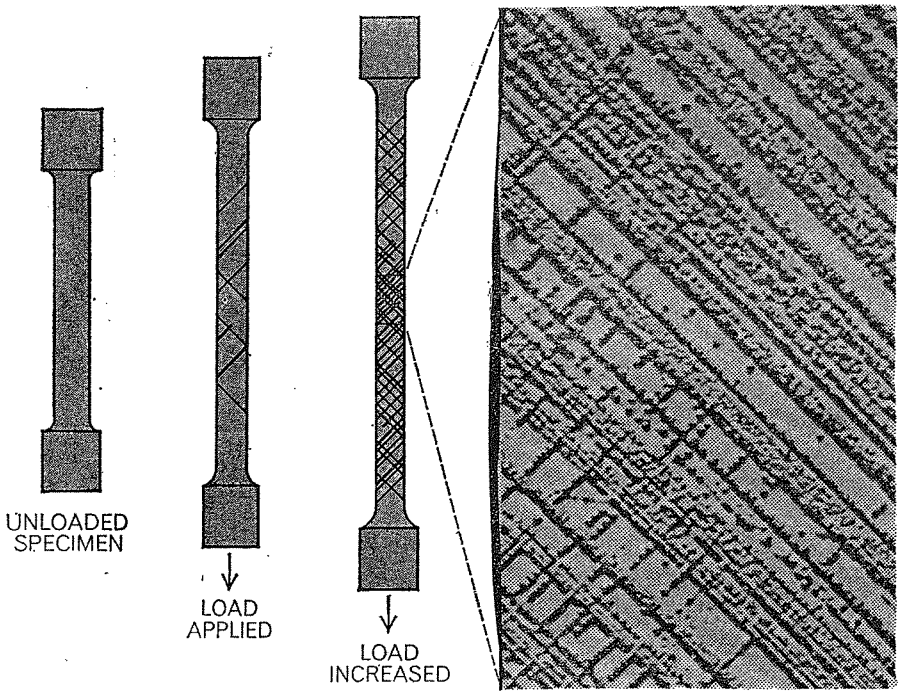
شکل ۱۱ و ۱۲ ـ مقدار درصد افزایش طول در نقطه گسستگی به طول ابتدائی نمونه بستگی دارد بنا براین حالت پلاستیکی نمونه فولادی را بدرستی نمیتواند منعکس نماید. منحنی فوق نشان میدهد درصد افزایش طول با مقایسه افزایش طول اولیه در نقطه گسستگی چگونه تغییر میکند. در کوتاهترین نمونه آزمایش ازدیاد طول بیشتر و افزایش طول در نقطه گسستگی بیشتر است.

به ماکزیمم قدرت کششی موسوم است. (ultimate tensile strength)

پدیدهٔ ازدیادقدرت دراثر ازدیاد طول نسبی به سخت شدن بعد از نقطهٔ بحرانی (Strain-Harden ing) موسوم است (ما به درنظر گرفتن این پدیده احتیاج داریم. زیرا درجهٔ ازدیاد طول نسبی یك فلز که در آن درجه فلز محکم می گردد، کنترل مؤثری در روی ازدیاد طول و سختی فولادهای محکم دارد)

پس از نقطهٔ ماکزیمم قدرت کششی منحنی به سرعت نزول پیدا می کند. تا موقعی که میله بشکند. دراین قسمت از آزمایش کشش میلهٔ مورد نظر بهیچوجه بطور یکنواخت ازدیاد طول پیدا نمی کند و تمام تنش در یك قسمت باریك متمرکز می‌شود و تغییر فرم پلاستیکی موضعی شده وبیشتر نیرو برروی سطح مقطع کوچکی اثر میکند و در آخر میله از کوچکترین سطح مقطع میشکند.

بچه علت ازدیاد طول یکنواخت متوقف میگردد و نزول منحنی شروع میشود؟ (Continuum mechanics) باین سئوال نیز پاسخ می‌دهد. وقتی که بار اضافه می گردد، میله طویل‌تر شده و سطح برشی کوچك می گردد. ولی تغییر فورم پلاستیکی بطور یکنواخت در تمام طول میله بوجود نمیآید بعضی از قسمتهای کوچك بیشتر از دیگر قسمتها ازدیاد طول پیدا میکند و بهمین دلیل تنش واقعی در این قسمت بیشتر از سایر قسمتهای میله میباشد و اگر این حقیقت نبود که این قسمت کوچك بر اثر کشیده شدن سخت‌تر میشود باید میله بلافاصله از این قسمت میشکست. نسبت سخت شدن بعد از نقطهٔ بحرانی (Strain Hardening) در تنشهای پائین‌تر ماکزیمم قدرت کششی بحدی زیاد است که حد الاستیسیته در نقاط ازدیاد طول یافته بالا



شکل ۱۳ ـ حالت پلاستیك در نمونه‌های فولادی موقعی اتفاق میافتد کـه سطوح اتمهای آهن در روی هم بلغزند. این لغزش سطوح طوری است که باامتداد بارو ارد شده در روی میله زاویه 45° میسازد. آثار لغزش سطوح در سطح پلیش‌داده شده شکل سمت راست ملاحظه میگردد و نشان‌میدهد که لغزش بطوریکنواخت درداخل فلز رخ نمیدهد دسته‌ای ازسطوح لغزان حرکت میکنند در حالیکه گروه انبوهی ازکریستالها بدون تغییر باقی‌میمانند درصدافزایش طول درحالت پلاستیکی فرم دانه‌بندی کامل کریستالها را ازبین میبردوافزایش‌لغزش را در آن‌نوارها یا درسرتاسر آنها مشکل میسازد. هنگامیکه‌نوارهای لغزان درسرتاسر یك کریستال ایجاد میشود درحالت تماس با نوارهای‌لغزیده شده قبلی متوقف میگردد .

رفته و بالاترازسطح عادی تنش و تغییر فرم پلاستیکی قرار می گیرد .

تا ازدیاد طول کامل درتمام‌قسمت های کوچك میله (بطورمساوی) پایان‌نیابد ، تغییر فرم پلاستیکی شروع نخواهد گردید . وقتیکه‌بار زیاد شد تغییرفرم پلاستیکی دوباره‌از عنصر اصلی (جزء کوچك اصلی) شروع می‌شود و مرحلهٔ تکرار می گردد تا جسم بـه حالت گسستگی کلی برسد .

بخاطر بالابودن نسبت سخت‌شدن بعد از نقطهٔ بحرانی‌درقسمت اول آزمایش ، میله‌بطور یکنواخت کشیده میشود ـ وقتی مقدار نیرو بطور مداوم اضافه می‌شود ، نسبت سخت‌شدن بعداز نقطهٔ بـحرانی کم شده تا بعداز نقطه تنش کششی ماکزیمم ، این نسبت بقدری کم میشود که‌قادر بازدیاد مقاومت‌فلز دربرابر نیروی خارجی نیست ، پس از این دیـگر مقاومت فلز شروع بکم شدن میکند تا عاقبت نمونه بشکند.

تغییر فرم‌پلاستیك درطول‌میله بطوریکنواخت جریان نمی‌یابد . زمانیکه برای دومین بار همانطور که در مهندسی معمول است ، ازدیادطول را امتحان می کنیم ، درمی‌یـابیم که هیچگونه مبنای فیزیکی ندارد .

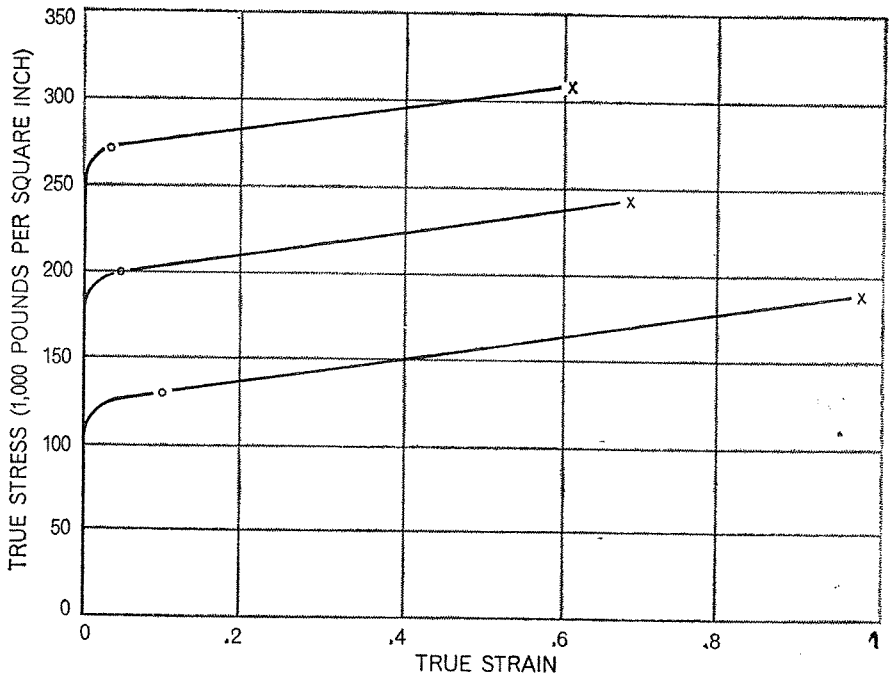
ازدیاد طول (Elongation) ضریب ثابت فیزیکی مـاده نیست. بلکه ضریبی اختیاری‌است ، و رابطی‌تجربی بین‌تردی ماده ومیتوان‌با مقایسه‌ازدیاد طول فولادهای‌مختلف‌تردی وشکنندگی آنها رامعین نمود .

اگر طول انتخابی (برای آزمایش طول) ۲ اینچ‌انتخاب نشده باشد. مقدار دیگری برای اندازه

ازدیاد طول بدست می آید . بعنوان مثال شکل ۱۲ - نشان‌می‌دهد. مقادیر دیگری برای اندازهٔ طول(میله‌ای باازدیاد طول۰/۴۷. در طول۲ اینچ‌فقط ۰/۳۰ ازدیاد طول در میلهٔ ۸ اینچی‌داردو درطول ۵/. اینچ۰/۸۰. Elongation پیدا کرده‌است) سنجش‌خیلی‌بهتری ازخواص‌ماده‌ممکن‌است ازاندازه گیری‌میزان‌تقلیل سطح‌برشی‌میله درحین‌مراحل کششی‌وقبل‌ازقطع‌میله بدست‌بیاید. یك آزمایش‌حقیقی‌دربارهٔ فولادهای‌بسیار قوی نشان می‌دهد که اکثریت قریب به اتفاق فولاد هائی که دارای حد الاستیسیته‌بین ۲۰۰۰۰۰ پاوندبر اینچ مربع و ۳۰۰۰۰۰ پاوند بر اینچ مربع هستند ، تقلیلی در حدود ۵۰ درصد در سطح برشی خود در هنگام انقطاع دارند که معادل است با ازدیاد طول موضعی درحدود۱۰۰درصد. هنگامیکه مساحت برشی نهائی با حجم ثابت میله اصلی نصف مساحت اولیه می گردد، طول‌هرالمان موضعی‌باید دوبرابر گردد، ومی‌بینیم که فولادهای بسیارمحکم‌واقعاًترد وشکننده نیستند ، آنها ازدیاد طول‌نسبی زیادی‌را قبل‌ازشکسته شدن‌تحمل می کنند، ولی‌این‌ازدیادطول‌نسبی‌موضعی است .

پس مسئله این نیست که چگونه فولاد های محکمی ساخته شود که ترد و شکننده نباشد بلکه ، اینست که چگونه ماده‌ای بسازیم که هر گاه بطور موضعی بمقدارزیادی‌ازدیادطول پیدامی کند ، بهمان طریق یکنواخت نیز ازدیاد طول درتمام میله پیدا کند.

همانطور که دیدیم‌هنگامی‌ازدیاد طول‌موضعی اتفاق می‌افتد که درجهٔسخت شدن‌بعدازنقطه‌بحرانی

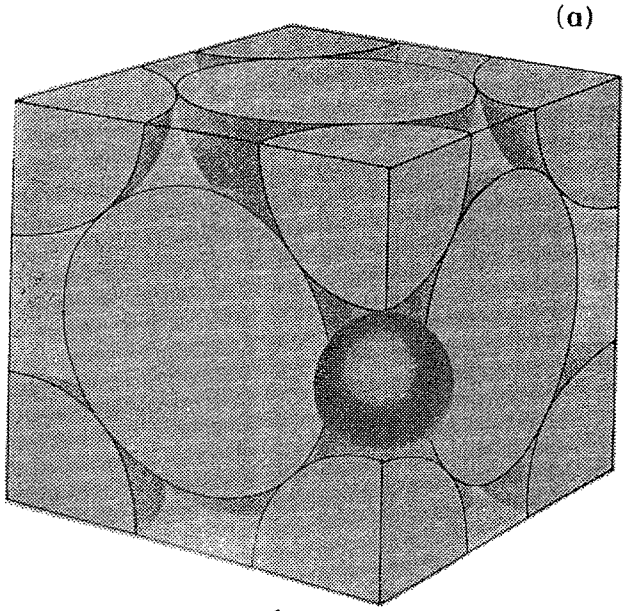


شکل۱۴ ـ منحنی تنش حقیقی و در صد افزایش طول حقیقی نشان دهنده صحیح‌ترین نمایش ازمنحنی‌تنش ودرصدافزایش طول‌است این منحنی دقیقتر ازمنحنی شکل قبل مشخصات فولاد را نشان میدهد . شیب منحنی تنش حقیقی و در صد افزایش طول حقیقی نشان دهنده درجه strain ـ hardening است . تنش حقیقی‌برای هر مقدارازدرصد افزایش طول برابراست باخارج قسمت بار برسطح مقطع می‌نی‌مم درآن‌لحظه . هنگامیکه میله کشیده میشود قطر نمونه کم میگردد و درصد افزایش طول حقیقی مربوطه دراینحالت‌باید مجموع افزایش تغییرات افزایش طولی است . بنابر این در صد افزایش طول حقیقی جمع تغییرات افزایش طول تقسیم بر طول در هر لحظه میباشد . دایره های روی منحنی آغاز باریك شدن میله و × های روی منحنی نقاط پاره شدن میله رانشان میدهند و این منحنی‌ها طوری است که شیب آنها برگشت پذیر نیستند .

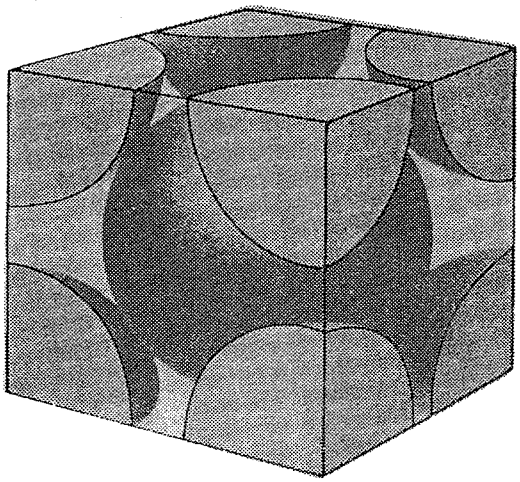
(Strain Hardening) آنقدر کم گردیده که نمیتواند بآن اندازه که سطح برشی بوسیلهٔ تغییر پلاستیکی کم شده باعث قوی‌شدن ماده گردد .

برای جلوگیری از کشیده شدن و براین منوال تقلیل تردی باید جستجو کرد که چگونه می‌توان نسبت سخت شدن بعداز نقطهٔ بحرانی را افزایش داد و آنرا بیشتر از نسبت سخت‌شدن طبیعی فلز مورد آزمایش نمود

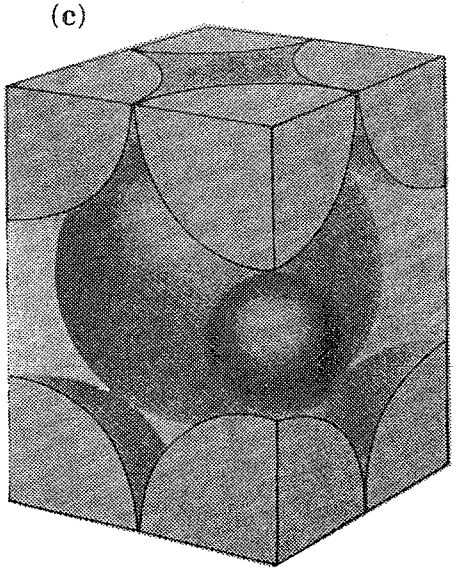
(a)



(b)



(c)



شکل ۱۵ ـ طرز قرار گرفتن اتمهای کربن در فولاد به تعیین مقاومت و اندازه شکنندگی کمك میکند . وقتیکه فولاد در درجه حرارت سرخ است و کریستالهای آهن بفرم f . c . c تعیین شکل (a) قرار دارند محلی برای قرار گرفتن اتمهای کربن در بین اتمهای آهن وجود دارد (گلوله سیاه) در کریستالهای b . c . c شکل (b) بعلت ثبات درحرارت محیط و فاصله کم بین اتمهای آن اتمها کربن نمیتوانند درآن حل‌شوند . اگر آهن محتوی کربن ازدرجه‌حرارت سرخ بسرعت سردشود اتمهای کربن درمحلول b.c.c بصورت محبوس باقی میمانند و ساختمان کریستالها را به‌شکل مکعب مستطیل درمیآورد (c) که خیلی سخت ولی ترد وشکننده است ومارتنزیت نامیده میشود . علت تردی و شکنندگی این آلیاژهای ساده آهن و کربن سردکردن آن بسرعت میباشد . اگر نیکل وکرم به آلیاژ اضافه شوند ساختمان کریستالها دردرجه حرارت محیط باثبات واز نوع f c.c خواهد شد در اینصورت فضائی برای نگهداری کربن خواهد داشت وقتیکه چنین آلیاژهائی تحت تغییر فرم پلاستیکی قرار گیرند کریستالهای باثبات f.c.c تغییر نموده و به‌مارتنزیت تبدیل میگردند و بصورت نوارهای موازی متحرك درآمده ودرمقابل نفوذ گروه دیگر

واین عاملی است برای تشخیص شکنندگی .

مراحل سخت‌شدن بعداز نقطهٔ بحرانی که در فلزات روی می‌دهد، نتایجی است ازمعایبی که بوسیلهٔ تغییر فرم پلاستیکی درشبکه‌های کریستالی فلز بوجود می‌آیند . شرح کوتاه و ساده تغییر فرم پلاستیکی ، اینست که این پدیده مربوط به این حقیقت است که صفحات صاف اتمها در کریستالها در نظر دارند بر

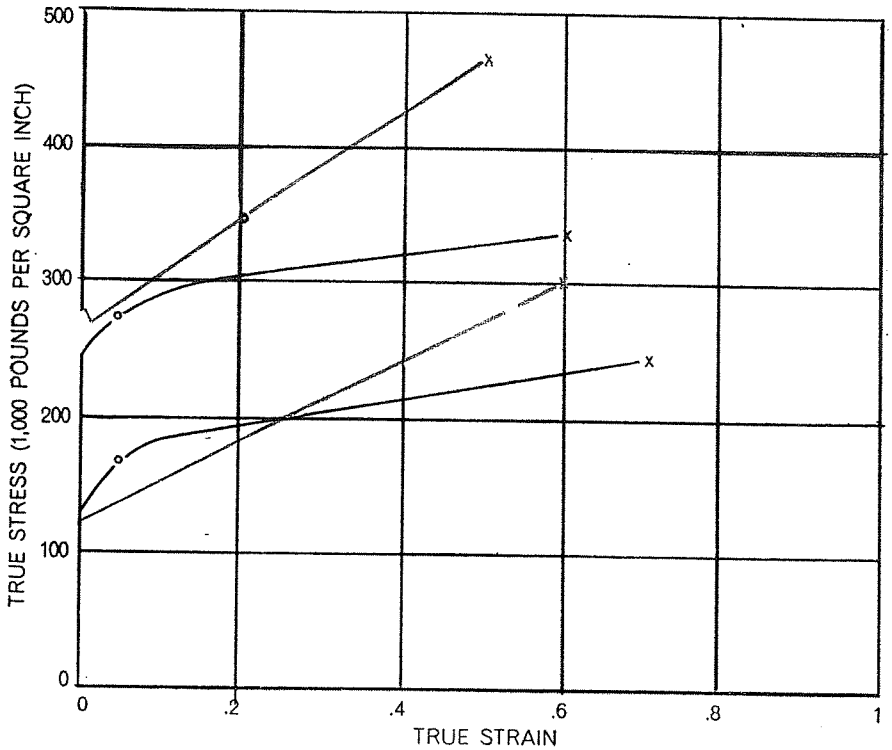
نوارهای موازی مقاومت میکنند . در این طریقه توزیع مارتنزیت بدون اینکه تردی وشکنندگی فولاد اضافه گردد مقاومت اضافه میشود . آنچه در فوق شرح داده شد اساس ساختمان فولادهای (transformation-induced plasticity) میباشد که با نام اختصاری (trip) معروف است .

روی یکدیگر بلغزند ،هنگامیکه میلهٔ مورد آزمایش کشیده می‌شود (مانند لغزش کارتها بر روی یکدیگر). بوسیلهٔ فشار صفحات انتها برای لغزش بر روی یکدیگر طویل‌تر می گردند .

لغزش در طول صفحاتی بوجود میآید که با محور افقی زاویهٔ 45° می‌سازند ، و چون دو جهت برای زاویهٔ 45° وجود دارد لذا صفحهٔ لغزان متلاقی خواهیم داشت. تغییر فرم پلاستیکی شبکه کامل کریستالی را خراب نموده، ومواضعی بوجود می آورد که با صفحات اتمی کمی وجود دارند که بر روی هم بلغزند و یا از این صفحات بسیارند .

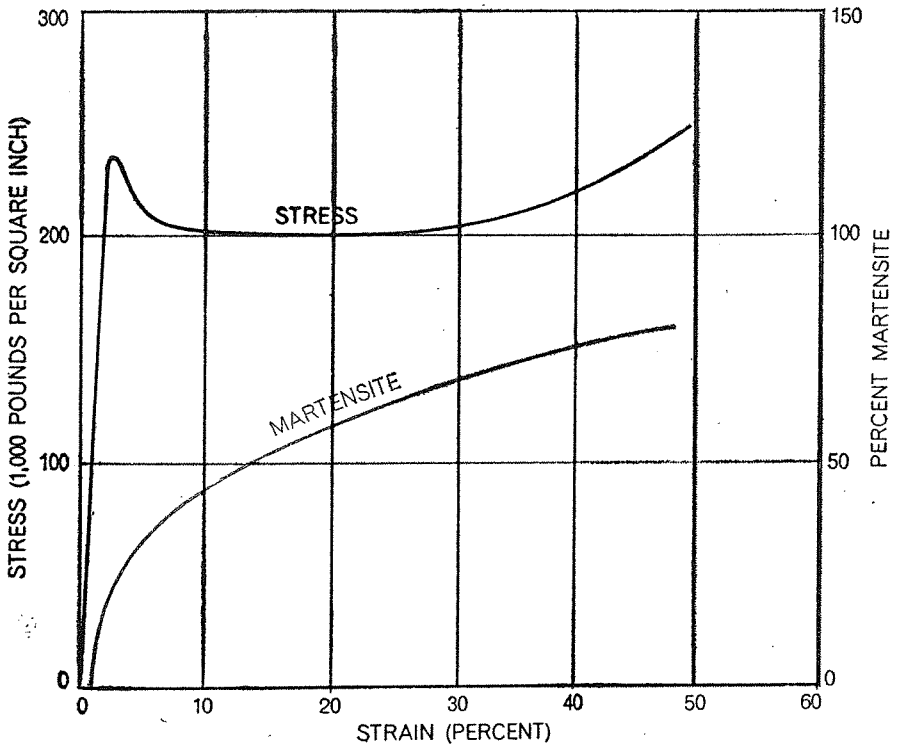
درضمن ازدیاد تغییر فورم پلاستیکی شبکه‌های لغزان محیط ناقص‌تر گشته، تاجائیکه بالاخره آنقدر نقص در صفحات زیادتر می گردد که دیگر لغزش صفحات برروی هم امکان‌پذیر نیست وقتیکه بار اضافه می گردد ، تغییرفرم پلاستیکی شروع می‌شود، اما فقط در آن قسمت از کریستالها که قبلا لغزش نداشته‌اند (شکل۱۳) وقتیکه دسته‌های لخران گروه های لغزان slipbandsشان به دندان(گو یا بیشتر می‌رسد، دستهٔ لغزان جدید باشکال می‌تواند صفحات لغزندهٔ قدیم‌را قطع کرده و بدین ترتیب لغزش ادامه می‌یابد .

بدین ترتیب وبدلیل بالا ، لغزش صفحات بر روی‌هم مشکل‌میگردد، فلز سخت‌شده وپدیده سخت شده و پدیدهٔ سخت شدن بعداز نقطه بحرانی بوجود می آید . معایبی که در کریستالها بوجود می آید ، فلزاتی را که دارای حد الاستیسیته کم میباشد خیلی سخت‌تر مینماید ولی اگر حدالاستیسیته بوسیلهٔ آلیاژ



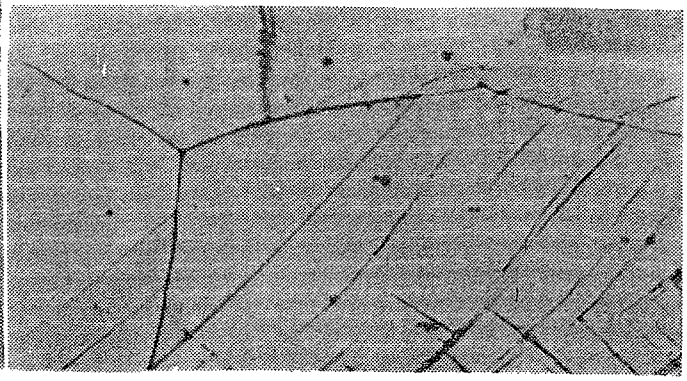
شکل ۱۹ – strain – hardening بوسیله شیب منحنی‌های فوق نشان داده شده وازمقایسه آنها نتیجه میشود که فولادهای تریپ (منحنی رنگی) از نظرمقاومت دربرابرازدیاد طول دردرجه بالاترازفولادهای تجارتی (منحنی سیاه) قرار گرفته‌است. نوارهای مارتنزیت‌ایجاد شده درفولادهای تریپ درنتیجه‌تغییرات پلاستیکی بآسانی

توسط نوارهای متقاطع دیگر قابل نفوذ نیست بطوریکه افزایش نیروی وارده (منعکس شده بوسیله تنش حقیقی) سریع‌تر ازدرصدافزایش طول (بوسیله درصدافزایش طول حقیقی منعکس شده) نسبت به حالتی است که تنها نوارهای لغزنده معمولی وجوددارد ودرنتیجه باریک شدن نمونه باندازه فاصله دایره‌های‌روی دومنحنی بتعویق افتاده‌است



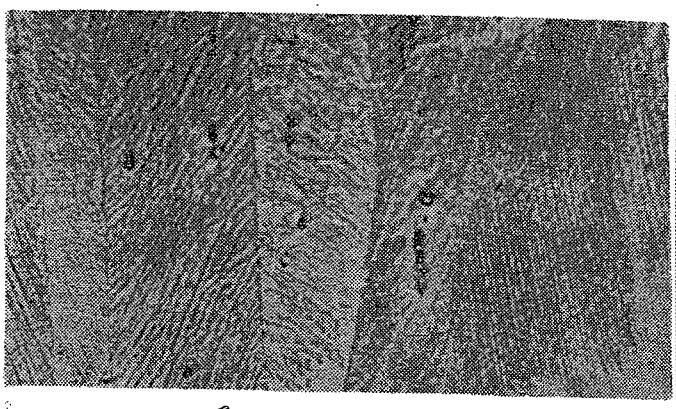
شکل ۱۷ـ مارتنزیت محتوی فولادهای تریپ در اثرازدیاد نیروبسرعت زیاد میگردد. ساختمانهای مکعب مستطیل .b.c.c مارتنزینی خاصیت آهن ربائی دارند در صورتیکه ساختمانهای مکنبی f.c c دارای چنین خاصیتی نیستند بنابراین بااندازه گیری افزایش نیروی مغناطیسی ضمن آزمایش کشش میتوان میزان ازدیاد مارتنزیت رادر میله آزمایش تعیین نمود .

نمودن و عملیات حرارتی بیشتر میشود و این پدیده کمتر ظاهر می گردد تنش‌های خیلی زیاد می‌تواند دسته‌های متوقف شده صفحات لغزشی را مجبور بـه عبورازداخل کریستالهای معیوب نماید وبهمین دلیل است که‌فولادهای باحدالاستیسیته‌زیادبا اینکه پدیدهٔ سخت شدن بعداز نقطهٔ بـحرانی را نشان می‌دهند . ولی نسبت این سخت‌شدن بقدری کم است کـه عمل کم‌شدن سطح مقطح موضعی(neckingdown)در ازدیادطول‌های نسبی کم می‌شود. توضیح بیشتر ازنظر کمیت اینست که درجهٔ سخت‌شدن بعدازنقطهٔ بحرانی باید بطورمستقیم متناسب باحدالاستیسیته‌زیاد گردد. بهترین‌راه اندازه گیری‌درجهٔ نسبت سخت‌شدن بعداز نقطهٔ بحرانی‌منحنی‌واقعی stress - strain می‌باشد، که همانند منحنی رسم شده در شکل (۱٤) است . با این تفاوت که در اینجا(stress) تنش حاصل تقسیم نیروئی است که به‌جسم‌واردمی گردد، برآن سطحی که آنرا تحمل میکند (در صورتیکه در منحنی‌غیر واقعی stress را کسری‌تعریف میکردیم که صورت آن نیرو و مخرجش‌سطح برشی‌اولیه بود.)strain در منحنی واقعی برابر با انتگرال $\frac{dl}{l}$ بین lo و l میباشدبطوریکه dl مقدار کوچك‌تغییر طول اصلی و l طول‌نهائی‌است . وقتیکه فولادهای آلیاژی کم قدرت عملیات‌حرارتی‌را می‌بینند که حداالاستیسیته بیشتری داشته‌باشند.منحنی‌های‌واقعی stress-strain موازی هستند : درجهٔ سخت‌شدن بعداز نقطهٔ بحرانی‌شیب ، منحنی‌واقعی stress - strain است یعنی $\left(\frac{d\varepsilon}{d\sigma}\right)$. آشکاراست که سخت شدن بعدازنقطهٔ بحرانی‌بوسیلهٔ اثر متقابل دیسلوکیشن (Dislocation) درجهٔ سخت شدن بعدازنقطهٔ بحرانی بوجود می‌آورد کـه اثری است مستقل از حداالاستیسیته بنابراین واضح



شکل ۱۸ ـ کاربید در فولاد های تریپ هنگام تغییرات پلاستیکی دردرجه حرارت بالا ابتدا بصورت نوار های موازی جدا میگردد(خطوط سیاه) شکل ۶۰۰ برابر بزرك شده است .

کاربید محتوی باید بقدری زیاد باشد تایك آلیاژ بامقاومت مطلوب تولید گردد ، در یك آلیاژ معمولی با کربن زیادکاربید درامتدادمرز کریستالهاجداشده وفولاد شکننده وتردبوجود میآورد. فولادهای تریپ دارای تردی وشکنندگی کمتری هستند زیراتغییرات پلاستیکی درسراسر حجم تمام کریستالها ایجاد هسته مینماید .



شکل ۱۹ ـ نوارهای مارتنزیت درمیکروگرافی نمونه فولاد تریپ کـهٔ تاحالت شکست کشیده شده بصورت خطوط موازی کاملا نزدیك نشانداده شده . در این حالت نیز تصویر ۶۰۰ مرتبه بزرك شده است : نوارهای موازی نشان میدهد جریان پلاستیك کجا فرم ساختمان کریستال را از f.c.c به مکعب مستطیل b.c.c. فرم مارتنزیت تغییرداده است نوار های مارتنزیت نه فقط سخت میباشند بلکه در مقابل تغییرفرم پلاستیکی مقاومت موثروبیشتری ازنوارهای موازی معمولی انجام میدهند .

است که موانع قوی تر از دیسلوکیشن که مربوط به تغییرات شیب زیاد ساختمان داخلی می شود نیز وجود دارند که مجزا در دیسلوکیشن می باشد وباید ربطی با plasticstraining داشته باشد . پدیده بنام تغییر فورم‌در ساختمان پلاستیکی ازفرم F.C.C به فرم B.C.C.tetragonal وجود دارد که می‌تواند اثر عظیمی برروی فلز ازنظر مکانیکی بگزارد .

ساختمان بعدی فولاد مارتنزیت نام دارد ، (martensite) وتغییر آن به تغییر فورم مارتنزیتی موسوم‌است. این‌تغییرمی‌تواند ضمن کشش در فولاد های‌مخصوص‌ومشخص‌انجام‌بگیردهمانطور که گفته‌ایم آهن می‌تواندارای دونوع آرایش کریستالی باشد، F.C.C در درجهٔ حرارت بالا B.C.C در درجـهٔ حرارت پائین. face-Centered cubic-F.C.C مکعب با اتم در رویه . body -centered cubic B.C.C مکعب با اتم در مرکز کربن در ساختمان F.C.C دردرجه حرارتهای بالاحل شده ولی درنوع B.C.C دردرجهٔ حرارت معمولی بطورمؤثر حل‌نمی گردد آب‌دادن‌سریع‌فولادباعث می گردد که کربن به‌شبکه‌های B.C.C رفته و فولاد رااز نوع آرایشی مکعبی به مکعب‌مستطیل مارتنزیت مبدل‌سازد .(شکل ۱۵) . تبدیل گردیدن ساختمان مکعب بـه ساختمان مکعب‌مستطیل.(tetragonal) درآلیاژآهن‌وکربن باعث شکننده‌شدن فلز و سخت شدن آن می گردد .

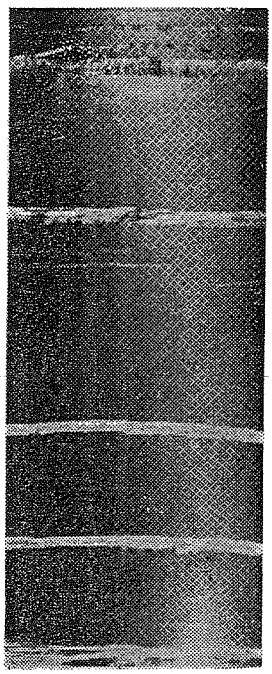
اگر نیکل‌وکرم به‌آلیاژاضافه‌شود . کریستال های مکعب با اتم در رویه F.C.C تا درجهٔ حرارت های خیلی کم‌پایدارمی‌شود، که‌این‌ساختمان‌می‌تواند بعداً به ساختمان مارتنزیت تبدیل گشته و در یك راه مناسب تربسیج یابد . اگر جنس ماده بفرم ارتجاعی درآید. ساختمان مارتنزیت‌مکعب مستطیل که‌تشکیل می گردد در صفحات لغزشی‌فعال‌محکم‌تر ازساختمان F.C.C است،همچنین‌بطورواضحی‌محکم‌ترازصفحات لغزشی فعال خرابی است که برای نوع‌معمولی‌سخت شدن بعداز نقطه بحرانی بحساب می آیند .

بعلت اینکه دسته‌های لغزنده مارتنزیت نمیتوانند داخل صفحات لغزنده متقاطع گردند ، بار وارده بر فلز باید زیاد گردد و بسرعت و سریع‌تر از زمانیکه فقط صفحات لغزنده‌های معمولی وجود دارند ، باشد .

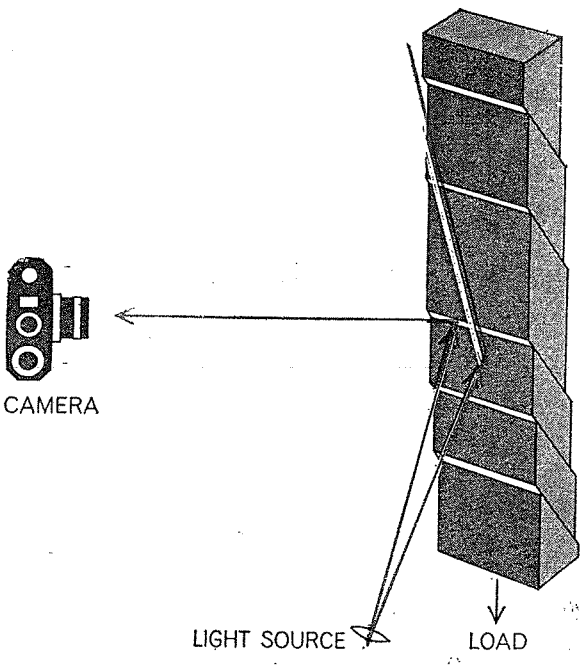
فولادهائی که ضمن کشیده‌شدن تولید مارتنزیت مینمایند باعث بتعویق انداختن، کم‌شدن موضعی سطح مقطع می گردد و شیب منحنی که بوسیلهٔ رسم منحنی واقعی stress-strain بدست می آید ، تندتر از شیب موجود برای فولادهای معمولی است (شکل ۱۵)

درجات بالاتر سخت‌شدن بعد از نقطهٔ بحرانی با نوع ساختمانی مارتنزیت بستگی داشته و باعث افزایش تغییر فورم پلاستیکی می گردد . فولادهائی که دارای مقدار بسیار زیادی ازدیاد طول هستند ، بعلت وجود تغییر فورم مارتنزیتی از آنها انتظار میرود که دارای القاء پلاستیسیته براثر تغییر حالت باشند و این فولادها، فولادهای مخصوصی هستند، مدتها بر روی تغییر حالت فولادهای فوق‌الذکر مطالعه شده ، اما تحقیقات اخیر مربوط به موادی می گردد که حداقل ستیسیته پائینی دارند . برای ساختن موادی با حداقل ستیسیته بالا لازم است که مقدار کربن این مواد را زیاد کرد ، بطوریکه ذرات ریز وزیاد سمنتیت جدا گشته و بوسیلهٔ عملیات حرارتی رسوب گردد . (برای ایجاد حداقل استیسیته بالاتر از ۱۵۰۰۰۰ پاوند بر اینچ مربع)

برای ازدیاد حداقل استیسیته ساختمان F.C.C کوششهائی شده‌است (بوسیلهٔ ازدیاد کربن همانطور که بطور موفقیت آمیزی در مورد فولادهای با ساختمان B.C.C گشته‌است) ، اما مواد با ساختمان F.C.C وقتی مقدار کربن در آنها زیاد می‌شود بطور قابل ملاحظه‌ای شکننده میگردند. سمنتیت میل دارد، باینکه از مایع جدا گردد و بطور مناسب‌تری در لابلای کریستالها موضع بگیرد . شبکه های تردی که باینصورت ایجاد می گردند در اثر کشیده شدن مواد زود شکسته میشوند . علاقه سمنتیت باینکه از مایع جدا گردد و رسوب شود در مواضع بین کریستالی امری است طبیعی



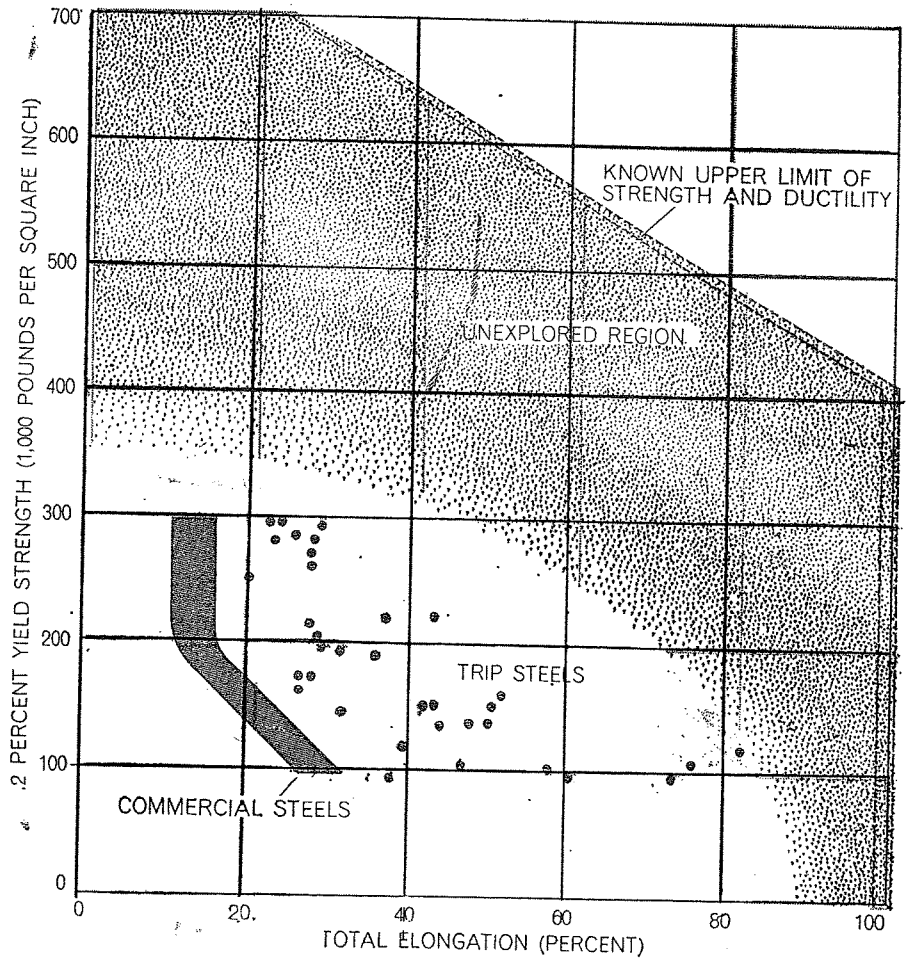
شکل ۲۰ – تغییر فرم نوارهای ایجاد شده در فولاد تریپ رامیتوان با استفاده از دوربین ووسیله ایجاد نور و نمونه پلیش شده عکس برداری نمود . پس از پلیش کردن نمونه نوارهای موازی ایجاد فرورفتگی نموده و باعث پخش



نوردر دور بین میشود وقسمتهای تغییر نیافته نمونه نور را بخارج از نمونه منعکس می‌نماید بنابراین نوارهای تغییر فرم یافته بصورت روشن بازمینه سیاه رنگ دیده می‌شود.

در این حالت ساختمان اتمی ناقص‌تر است . وقتی دو کریستال با آرایش مختلف شروع به رشد کردن مینماید (در فلز مایع) در محلی که این دو کریستال بهم میرسند ، در مرز بین این دو کریستال منطقه‌ای است که‌فشردگی اتمها کم‌میباشد ومحل‌بسیار مناسبی برای بوجود آمـدن هستهٔ سمنتیت است، و درنتیجه سمنتیت که یك ساختمان‌بسیارسخت وشکننده میباشد معمولا در مرز بین‌دو کریستال رسوب کرده و فلزرا خیلی سخت وشکننده می‌نماید . برای از بین‌بردن این عیب باید سعی براین باشد که محل‌هائی بـرای بوجود آوردن‌سمنتیت درتمام کریستال‌ها بوجودآید بدین ترتیب می‌توان سمنتیت را بجای متمرکزشدن در فصل مشترك‌ها در تمام کریستال پخش نمود .

همانطور که‌دیده‌ایم‌تغییرفورم‌پلاستیکی‌معایبی در شبکه های کریستالی بوجود می‌آورد محل این معایب محل‌های بسیار مناسبی برای بـوجودآوردن هسته سمنتیت میباشند . وذرات رسوبی‌میتواند بهمان آسانی که‌درفصل‌مشترك کریستالهاتشکیل‌می گردند، در این محل‌ها نیز فرم بگیرند. آلیاژهای **trip** که تغییر شکل داده‌است در درجهٔ حرارت بالا بصورت **F.C.C** ، که ساختمان پایدار می‌باشد هستند .تغییر شکل حاصله بوسیلهٔ رد کردن مکرر میله های گرم آلیاژ مورد نظر ازبین غلطك بـدست‌آمـده ، درجهٔ حرارت باندازهٔ لازم زیاد است (یعنی که قدرت‌تحرك اتمی باندازهٔ‌کافی زیاد است) که تحول خود بخود و آنی صورت بگیرد. فولاد مورد آزمایش‌در زمانی که



شکل ۲۱ ـ آخرین حد مقاومت و نـرمی‌بطور وضوح بصورت‌خط‌چین درشکل مشخص گردیده درمحدوده فوق مقاومت بحرانی فولاد تریپ (نقاط قرمز) با مقایسه بافولادمعمولی‌توانسته است حجم بیشتری راازنظرافزایش طولـی در برگیرد باوجود این هنوزبسختی توانسته در محدوده وسیع مورد نظرنفوذکند .

آزمایش برروی آن انجام می گیرد ، حدالاستیسیتهٔ زیادی دردرجهٔحرارت‌معمولی از خود نشان می‌دهد. شکل ۱۸ نشان می‌دهد که چطور کربن بـطور آنی تغییر شکل می‌دهد ، و حوزه های سمنتیت در داخل کریستالها بوجود می آید .

عکس‌شمارهٔ ۱۹دسته‌ای‌ازمارتنزیت‌ها رانشان می‌دهد که قطعه‌ای از فولاد مورد آزمایش در تحت تأثیر ازدیاد طول و در حرارت معمولی قرار گرفته باشد. مراحل‌تغییر حالت‌می‌توانند بطورکاملی دنبال گردند (اماتنها درآلیاژهای**trip**) ، باین دلیل که کریستالهای‌مکعب مستطیلی‌با اتم مرکزی B.C.T (Body Centered. Tetragonal.) که از مارتنزیت تشکیل‌می گردند ، در زمان کشیده شدن، دارای‌خاصیت آهنربائی نزدیك آهن می‌باشند ، در صورتیکه کریستالهای (F.C.C)خاصیت آهنربائی ندارد .

بوسیلهٔ اندازه گیری‌میزان خاصیت مغناطیسی می‌توان بطور ساده‌ای منحنی حجم مارتنزیت را که در طول یك آزمایش کششی تشکیل می گردد ، رسم نمود شکل ۱۷ .بعلاوه می‌توان‌تغییر حالت درحالت جامد را عملا باچشم دید .

تغییر حالت فوق همراه با مقدار زیادی تنش برشی است ، بطوریکه اگر یك ورقه کشیده شود ، شکسته نمی گردد . (در تحت زاویهٔ 45° باسطح‌افق، زاویهٔ دو قسمت برشی است) . این تنش برشی بـاعث می گردد ، نوری که از پائین به این سطح برخـورد کند ، بسمت بالا منحرف گردد ، و نور برگشتی از صفحاتی که بر روی‌هم لغزیده‌اند بوسیلهٔ یك دوربین ضبط گردیده است. شکل ۲۰ . همین‌روش رامی‌توان برای دست‌یابی به درك قسمتی درفلز که حالت تغییر فرم پلاستیکی پس از یـك شکاف تند در آن اتفاق افتاده است بکار برد .

عکس‌العمل فولادهای بسیار قوی موقعی کـه یك ترك کوچك بردارند، کاملا باارزش است .معایبی ازاین قبیل ،فولاد را ضعیف کرده‌و بآن حالت‌تردی می‌بخشد ، همانطوریکه مقاومت یك تکه شیشه رابا داشتن این معایب گرفته و زودتر می‌شکند . اختلاف فاحشی بین فولاد مختلف از نظر ظرافت شکستن از نظر تردی وجوددارد ، زمانی که‌ترك خورده یاشکاف برمی‌دارند. فولادهای‌بالاعموماًدارای حالات‌مساعدی درتحت این شرائط هستند ، زمانی که یك آلیاژی‌از فولاد ، دارای حالات مساعدی در تحت این شرائـط هستند (زمانیکه یك آلیاژی از فولاد ، دارای حدالا ستیسیته بالابطور تردی می‌شکنند ، یك فولاد محکم از نوع **trip** با داشتن حدالاستیسیته برابر با فـولاد فوق‌الذکر قوی‌تر بوده و قطعهٔ فولاد بجای خاصیت تردی ، خاصیت نرمی ازخود نشان می‌دهد شکل۱ و ۲ نسبت سخت شدن بعد از نقطهٔ بحرانی که‌در آلیاژ های **trip** زیادتر میباشد باعث می‌شود که تغییرفورم پلاستیکی در حجم بیشتر بوجود آید درحرارتی‌این امر در فولادهای معمولی صادق نیست همانطور کـه اشاره‌شد **Elongation** حدود۱۵ /. برای‌فولادهای موجود با حدالاستیسیته بین ۲۰۰۰۰۰ تـا ۳۰۰۰۰۰ پاوند بر اینچ مربع زیاد است . فولادهای **trip** که تا حدودی قابل مطالعه هستند ، دارای ازدیـاد طولی برابر با ۲۰ تا ٤۰ درصد می‌باشند .

آلیاژهای **trip** با حدالاستیسیته کمتر حدود ۱۰۰۰۰۰ پاوند براینچ مربع می‌توانند ، تـا ۸۰ /. ازدیاد طول یابند . (قبل‌ازشکستن) شکل ۲۱ .فولاد های تجارتی موجود ، ازاین نوع دارای‌ازدیاد طول کمتراز ۳۰ /. می‌باشند . باید خاطر نشان کرد کـه این ازدیاد طول برای دو نقطهٔمشخص بفاصله ۲اینچ

اندازه گیری شده‌اند .

بدیهی است پیشرفتهای مثمر ثمر بر روی‌این مسئله پیدا شده است ، که چگونه قدرت را افزایش داد و تردی فولادهای پر قدرت را کم کرد . چندین کمپانی درنظر دارند ،درصورت امکان از فولادهای trip درکاربردهای مخصوصی. جائیکه تردی‌ضعیفی باید درجوار استحکام زیادی موجود باشد، استفاده کنند .کارانجام گرفته‌اینست که حدودبالاتری‌برای قدرت و عدم شکنندگی بوجود بیاورد . برای بثمر رسانیدن‌این‌هدف‌باید اصولی‌یافت بین‌روابط موجود تردی‌واستحکام درفولادهای‌محکم‌وکاربرد این‌اصول برای‌بوجودآوردن‌مواد تازه‌ای با مشخصات برتر.

فولادهای trip تنها اولین قدم دراین مرز نامکشوف است.