بررسی مکانیزم تغییر شکل پورتون - لوشاتولیه

(Portevin - Le Chatelier)

در فلزات و آلیاژها

نوشتهٔ : مهدی طاهری

دکتر مهندس درمتالورژی- استادیار دانشکده فنی

چکیده :

اثر اتمهای‌بین‌نشین برروی پدیده پورتون- لوشاتولیه، چه ازنطقه نظر تجربی وچه ازدیدگاه تئوری بطورکلی بعنوان تظاهری ازاثرکاترل (Cottrell) تاکنون مورد بررسی وتفسیر قرار گرفته است. درمورد اتمهای جانشینی وضع پیچیده‌تر می‌باشد زیرا ضریب دیفوزیون خیلی کوچک‌تر است. با توجه به اینکه درحالت اتمهای جانشینی یک مقدارکارسرد پیش ازآغاز پدیده پورتون- لوشاتولیه ضروری است، این تضاد قابل تفسیر بنظر میرسد. دراین مقاله ظهور پدیده مذکور دربریلیم تجارتی وچند آلیاژ مورد مطالعه قرارگرفته وتحلیلی ازمکانیزم عملکرد اتمهای جانشینی بعمل آمده است.

۱-۰۰۰-مقدمه - درعده‌ای ازآلیاژهای با ساختمان‌بلوری مکعب مرکزدار ومکعب با سطوح مرکزدار ونیز درفلزاتی نظیر بریلیم با درجه خلوص‌تجارتی،تغییر شکل‌با انتشار مکرر باندهای لودر (Luder) همراه است. منحنی کششی این آلیاژها پس ازتسلیم اولیه صاف نبوده وبصورت یک منحنی مشخصه دندانه‌داری است‌که نوسانات کوچکی را در مقدار تنش نشان میدهد. این پدیده اثر پورتون- لوشاتولیه یا «تسلیم مکرر» نامیده می‌شود. اصولاً پده مذکور دریک فاصله حرارتی معین رخ میدهد وظهور این پدیده همراه با افزایش‌شکنندگی قطعه میباشد. پدیده مذکور برای آلیاژهای آلومی‌نیم درفاصله حرارتی صفر تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد ونیز عده‌ای ازآلیاژهای مس درفاصله حرارتی ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد وپس ازیک تغییر شکل عمومی قابل توجهی مشاهده شده است. دندانه‌ای بودن منحنی کششی این تصور راالقاء میکند‌که پدیده مذکور ادامه پدیده تسلیم‌اولیه دریک‌اشل کوچکتراست. نابارو (Nabarro) وکاترل‌درمحلولهای جامد بین‌نشینی با ساختمان بلوری مکعب مرکزدار، انرژی آکتیواسیون پدیده پورتون- لوشاتولیه رامعادل با انرژی آکتیواسیون دیفوزیون اتمهای بین نشین تعیین‌کرده ونتیجه‌گرفته‌اند‌که منشاء پدیده پورتون- لوشاتولیه بعلت وجود همین اتمهای بین نشین است. ازسوی دیگرکاترل دریافته است‌که درمورد بعضی ازآلیاژهای مکعب با سطوح مرکزدار خصوصاً آلیاژهای آلومی‌نیم وآلیاژهای مس یک مقدار بحرانی کارسرد برای ظهور اولین دندانه لازم است. مقدار این کارسرد درحدی است‌که میتواند خلاءهای لازم برای دیفوزیون اتمهای‌جانشینی‌را دراینحالت‌تامین‌کند. Ham و Jaffrey نشان داده‌اند‌که کار سرد

بحرانی لازم نه تنها تابعی ازغلظت خلاءهای موجود است، بلکه به دانسیته نابجائی‌ها نیز وابسته میباشد. ازسوی دیگر مسلم‌گردید که بایستی دو یا حتی سه نوع دندانه راسشخص کرد.

بطورکلی مکانیزم‌های مربوطه، همگی اساساً به قفل‌کردن نابجائی‌ها وابسته باقی میمانندکه دراثر ادامه تغییر شکل منجر به رها شدن این نابجائی‌ها شده ویا آنکه تولید نابجائی‌های دیگر میکنند .

۲۰۰۰ـ ویژگی‌های دندانه‌های اصلی

بطورکلی دونوع اصلی ازدندانه‌های پدیده پورتونـ لوشاتولیه رامیتوان برحسب درجه حرارت مشخص کرد:

۲۱۰۰ـ دندانه‌های نوع A

این دندانه‌ها بفاصله‌های واضحی ازیکدیگر قرار دارند ونسبت به منحنی سخت شدن دربالای آن واقع میشوند. برای ظهور اولین دندانه یک حداقل کار سرد $(\varepsilon c)_A$ لازم‌است. باافزایش‌درجه حرارت، مقدار این کار سرد کمتر میشود. دامنه افت‌تنش یعنی $\Delta\sigma_A$ بامقدار تغییر شکل ونیز درجه حرارت‌بیشتر میشود. دندانه‌های نوع A ،درموقعی که مقدار افزایش طول نمونه تا حد معینی (ε_M) رسید محو میشوند. هرقدر درجه حرارت آزمایش بالاتر باشد، ε_M بیشتر میشود .

۲۲۰۰ـ دندانه‌های نوع B

این دندانه‌ها بفاصله خیلی نزدیکتر بهم ومنظم بوده ونسبت به منحنی سخت شدن درزیر آن قرار میگیرند ولی مانند دندانه‌های نوع A ، برای ظهور اولین داانه یک کار سرد حداقل $(\varepsilon c)_B$ لازم است. برعکس دندانه‌های نوع A با افزایش درجه حرارت، مقدارکارسرد مذکور زیاد میشود. دامنه افت‌تنش $\Delta\sigma_B$ باافزایش تغییرشکل بمقدار کمی تغییر میکند. ولی با زیاد شدن درجه حرارت آزمایش مقدار $\Delta\sigma_B$ نیز زیاد میشود. این دندانه‌هاتا پس ازمرحله ایجاد گردنه (necking) نیز ادامه دارند.

برای یک‌سرعت معین‌تغییرشکل(مثلا درحدود$\varepsilon' = 1,1 \times 10^{-3}\,S^{-1}$) نوع دندانه‌های‌ایجاد شده تابع‌درجه حرارت است. مثلا برای آلیاژهای آهنی با حدود ۱/۸۶ درصدتیتان دردرجه حرارتهای حدود ۳۰۰ درجه سانتیگراد فقط دندانه‌های نوعAوجود دارند ولی دردرجه حرارت‌های متوسط (حدود ۳۸۰ تا ۴۷۰ درجه سانتیگراد) مشاهده میشودکه دندانه‌های نوعAبرروی دندانه‌های نوع Bقرارگرفته وبتدریج روی آنها رامی‌پوشاند. بالاخره دردرجه‌حرارت‌های‌بالاتر (حدود ۴۷۰ تا ۵۲۰ درجه سانتیگراد)، دندانه‌های نوعBوجود دارند .

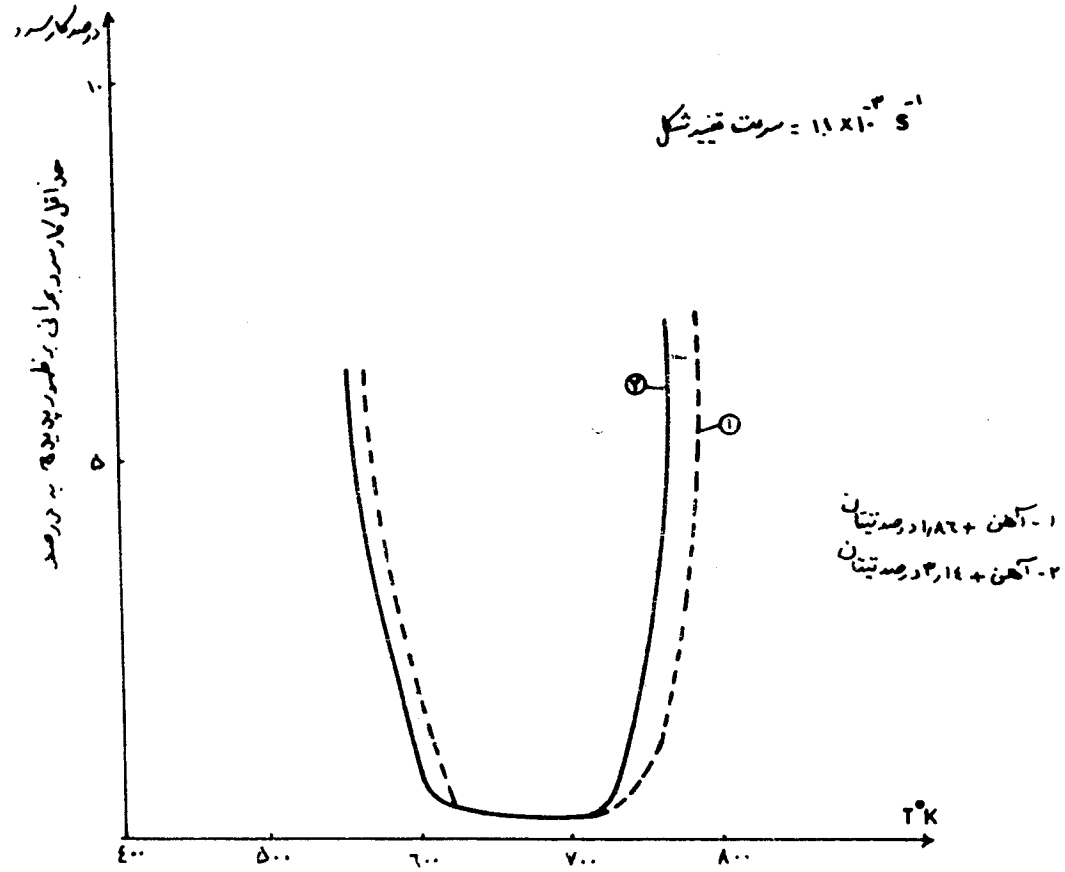
درشکل (۱) صورت‌کلی تغییراتεcبرحسب درجه حرارت برای دونوع آلیاژ آهن وتیتان (۱/۸۶ درصد و ۳/۱۴ درصدتیتان) دیده میشود. سه فاصله حرارتی مذکور درفوق درروی این شکل نمایان شده است. بعلاوه مشاهده میشودکه با افزایش تعداد اتمهای جانشینی (افزایش مقدار تیتان) درجه حرارت ظهور دندانه‌ها کم میشود . کاهش سرعت تغییر شکل نیز اثر مشابهی برروی درجه حرارت ظهور دندانه‌ها دارد.

تغییرات مقدارکار سرد بحرانی برحسب درجه حرارت برای دونوع آلیاژ آهن ـ تیتان

برای شناخت بهتر این اشکال اصطلاح بکار برده شده توسط Russel برروی آلیاژ Cu—Sn و Soler – Gomrez et Tegart برروی آلیاژهای Au – In را درنظر میگیریم . دراین‌گروه بندی ناپیوستگی‌های مشاهده شده درروی‌منحنیهای‌کششی‌به‌سه دسته تقسیم‌گردیده است:

I – نوعAیک ناپیوستگی نسبتاً منظم‌است‌که دربالای منحنی متوسط تغییرشکل ـ بار قرار دارد. فاصله‌بین دو دندانه مطابق افزایش طولی درحدود یک درصد درروی نمونه است.

II – دردندانه‌های نوع B نوساناتی با فرکانس بیشتر درتنش‌ایجاد میشود وبا افزایش‌تغییرشکل دامنه آن زیادتر می‌گردد.

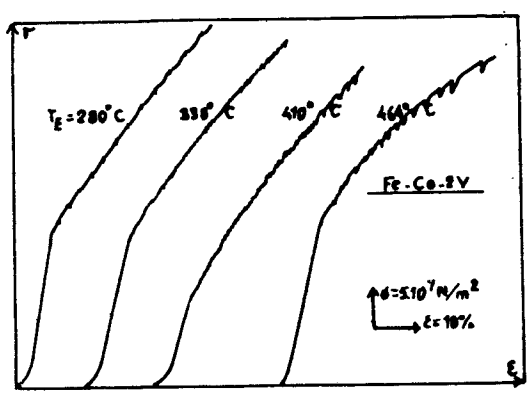


شکل (۱)

III — دردندانه‌های نوع C یک افت شدید تنش دیده می‌شود که بطور واضحی درزیر محنی کششی قرار میگیرد. فاصله بین دو دندانه پشت سرهم مطابق با افزایش طولی درحدود یک درصد بوده ودامنه آن درجریان فاز پلاستیک زیاد میشود.

در بررسی‌های انجام شده توسط Dinhut et al. برروی $Fe-Co-V_2$ (V=2% , Co=49% , Fe=49%) مشاهده شده است که :

الف- درفاصله حرارتی بین ۲٦۰ و ۳۰۰ درجه سانتیگراد دندانه‌های مشاهده شده ازکشیدن نمونه‌های محلول



شکل (۲)

منظره انواع مختلف دندانه‌های پورتون- لوشاتولیه درآلیاژ $Fe-Co-V_2$ دردرجه حرارتهای مختلف

جامد منظم $Fe-Co-V_2$ ازنوع I (A) , II (B) میباشد. دردرجه‌حرارتهای پائین‌تر، برای‌ظهوراولین ناپیوستگی یک مقدار حداقل تغییر شکل پلاستیک معادلε_Cلازم است. این تغییر شکل پلاستیک بسرعت با افزایش درجه حرارت بسمت صفر میل میکند.

ب- بین ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتیگراد، دندانه‌های نوع III(C) حاصل میشود.

این دندانه‌ها درجریان فاز پلاستیک پس ازیک مقدارکارسرد برابر ε_M محو میشوند.

شکل (۲) منظره دندانه‌های مختلفی‌راکه‌درموقع کشش یک‌آلیاژ$Fe-Co-V_2$دردرجه حرارت‌های مختلف بدست آمده است نشان میدهد.

۳۰۰۰- بررسی نتایج

۳۱۰۰- نقش ناخالصی‌های جانشینی برروی پدیده پورتون- لوشاتولیه در بریلیم تجارتی

آزمایشات‌کششی انجام شده برروی سیمهای حدیده شدهٔ بریلیم با درجه خلوص تجارتی (مطابق جدول۱) نشان میدهدکه دربریلیم پدیده پورتون- لوشاتولیه درفاصله حرارتی ۳۵۰ تا ۵۵۰ درجه سانتیگراد تظاهر میکند. یک مقدار تغییر شکل اولیه (ε_C) برای ایجاد اولین دندانه ضروری است. ولی تفاضل تغییر شکلی‌که تا ختم پدیده پورتون- لوشاتولیه حاصل میشود (ε_M)ازتغییر شکل‌اولیه، یعنی مقدار ($\varepsilon_M - \varepsilon_C$) ، تابعی ازدرجه حرارت آزمایش و سرعت تغییر شکل میباشد. دندانه‌ها پس ازیک افزایش طول پلاستیک‌کوچکی ظاهر میشوند. بنابراین با توجه به ترکیب جدول۱، یک ناخالصی جانشینی عامل این پدیده میباشد.

جدول ۱- مقدار ناخالصی‌های اصلی به ppm

ناخالص	Mg	Ni	Pb	Cu	Si	Al	Fe
فلز A	۲۵	۷۰	< ۶	۱۵	۲۸۰	۱۷۰۰	۴۵۰
فلز S	۱۵	۱۰۰	< ۶	< ۶۰	۶۰	۳۵۰	۵۳۰

آزمایشات متعدد برروی نمونه‌های بریلیم تجارتی نشان داده است‌که کاهش قابلیت شکل پذیری بریلیم درفاصله حرارتی ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد با ظهور پدیده پورتون - لوشاتولیه همراه بوده و طبیعت گسیختگی (مرزدانه‌ای یا دانه‌ای) در ۶۰۰ درجه سانتیگراد نتیجه غیرمستقیم این پدیده است.

نتایج آزمایشات‌کششی انجام شده برروی سیمهای بریلیم حدیده شده ونیز سیمهائی‌که دربالاتر از ۸۵۰ درجه سانتیگراد باز پخت شده‌اند ودرآنها ناخالصی‌هائیکه منشاء پدیده پورتون- لوشاتولیه هستند عملا بصورت محلول میباشند، نشان میدهدکه:

الف- ظهور پدیده پورتون-لوشا تولیه باافزایش شکنندگی قطعه همراه‌است ودرصد افزایش طول، تاگسیختگی به درجه حرارت وسرعت تغییر شکل وابسته میباشد.

ب- مقطع شکستگی در ۶۰۰ درجه سانتیگراد دانه‌ای است.

ج- یک آنومالی در حدالاستیک قرار دادی دیده میشود.

باعملیات حرارتی مناسب (نگهدای نمونه بمدت ۱۰۰ ساعت در ۶۵۰ درجه سانتیگراد) وبااستفاده از مکانیزم خاصی مقدار ناخالصیها تاحد قابل تشخیص توسط میکروسوند (حدود ۲۰۰ ppm)کم‌شده وباین ترتیب در آزمایش کششی پدید: پورتون - لوشاتولیه دیده نشده است. حدالاستیک قراردادی، آنومالی نشان نمیدهدو گسیختگی بصورت نرم است.

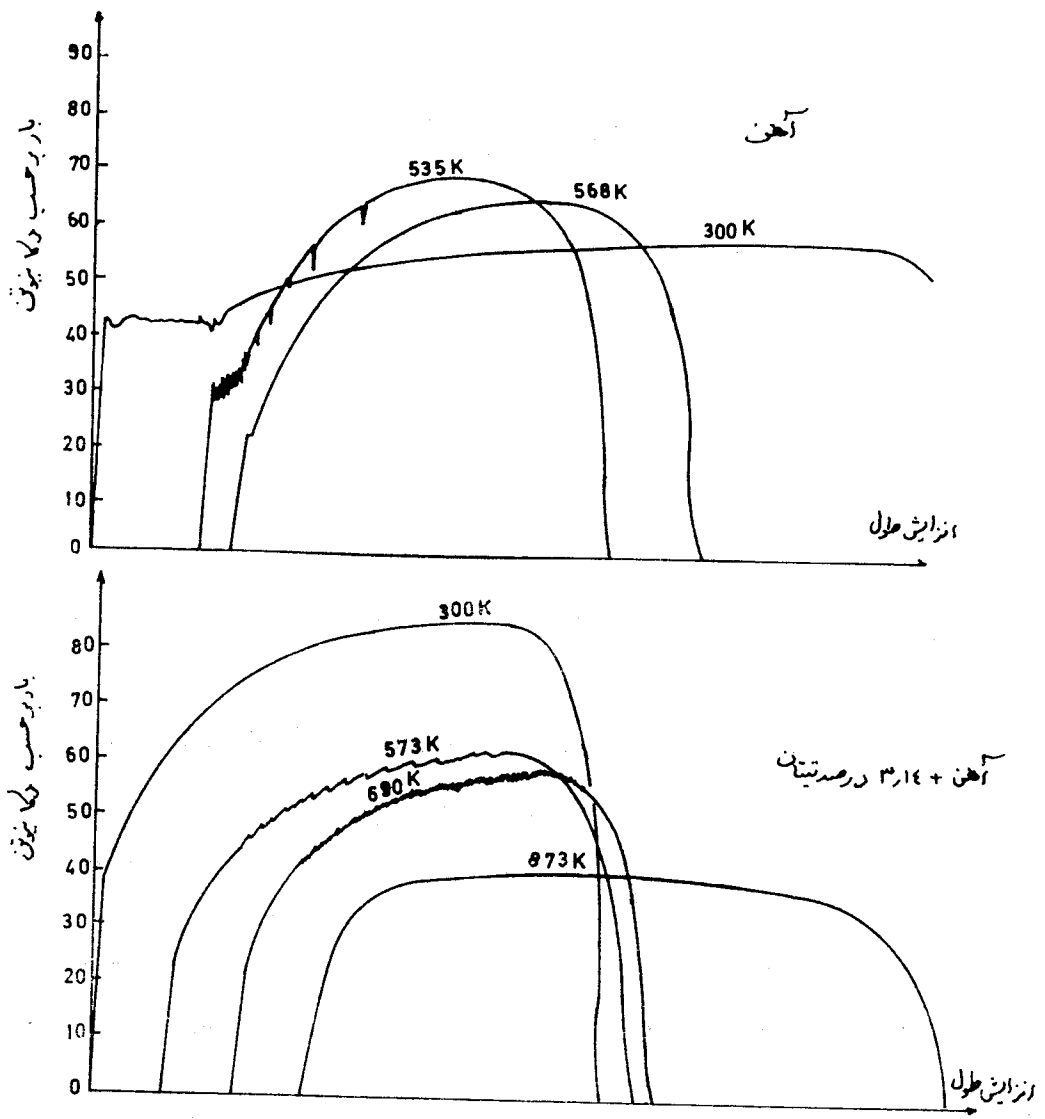
۳۲۰۰ـ بررسی اثر اتمهای جانشینی در محلولهای جامد آهن ـ تیتان برروی پدیده پورتون‌ـلوشاتولیه

آلیاژهای مذکور بترتیب دارای ۰/۱۲، ۱/۸۶ و ۳/۱٤ درصد تیتان میباشند. در حقیقت بخش کوچکی از تیتان باتشکیل ترکیب مرکبی از نوع (Ti, C, N)، امکان‌رها شدن‌از اثر بین نشینها را بدست میدهد وسپس میتوان اثر ویژه اتمهای حل شده را برحسب بقیه تیتان موجود بررسی کرد .

قبلا باید تاکید کرد که یک اختلاف اساسی ازنظر ویژگی بین آهن مبنا وآلیاژهای آهن ـ تتیان وجود دارد. منحنیهای تغییر شکل‌ـ بار برای آلیاژها هیچگونه انفصالی را در حدالاستیک نشان نمیدهند. این امر به درجه حرارت آزمایش نیز بستگی ندارد. در حالیکه منحنیای کششی حاصله از آهن مبنا در فاصله حرارتی ۲۹۳ تا ۵۸۰ درجه کلوین بایک نقطه تسلیم واضحی همراه بوده وبایک پله جریانی مشخصی دیده میشوند (شکل ۳a , b).

برای آلیاژهائی که دارای ۰/۱۲ درصدتیتان بوده‌اند، هیچگونه تغییراتی درروی منحنیهای بار‌ـ تغییرشکل مشاهده نشده است.

تغییراتی‌را که ظهور پدیده پورتون‌ـ لوشاتولیه درآلیاژهای فوق برروی ویژگیهای مکانیکی نمونه ایجاد کرده است بقرار زیر میتوان خلاصه کرد:



شکل (۳)

منحنیهای بار‌ـ تغییرشکل برای آهن خالص وآلیاژ آهن با ۳/۱٤ درصد تیتان دردرجه حرارت‌های مختلف

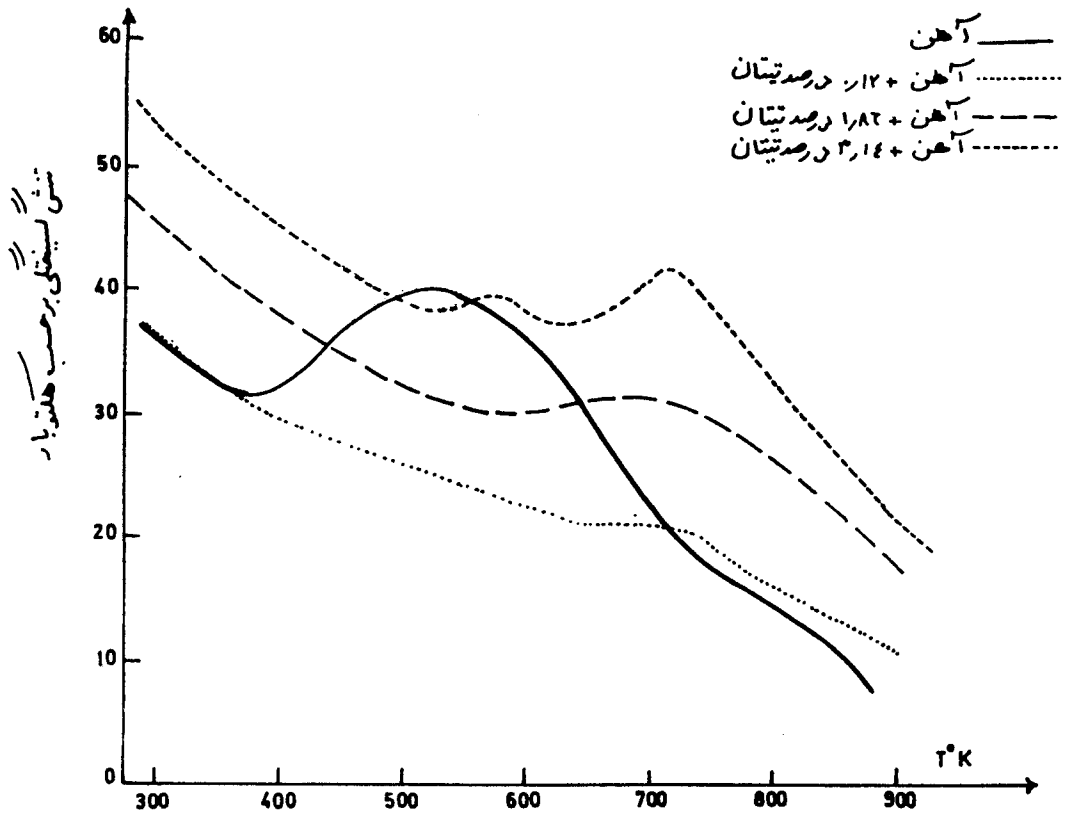
الف- کم شدن حدالاستیک با درجه حرارت برای تمام آلیاژها تغییرات یکنواخت وپیوسته‌ای رانشان میدهد بجز برای آهن مبنا که درفاصله حرارتی ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد یک آنومالی نشان میدهد.

ب- تنش واقعی گسیختگی (σ_M) دارای تغییراتی بصورت زیر است (شکل ٤) :

۱- آهن غیر آلیاژی دارای یک ماکزیمم خیلی مشخص است.

۲- برای آلیاژهائی با مقدارکم عناصر آلیاژی (۰/۱۲ تا ۱/۸۶ درصدتیتان)، یک ماکزیمم نرم‌تر دردرجه حرارت‌های بالاتر ظاهر میشود.

۳- موقعی که مقدار تیتان بیشتر است (۳/۱٤ درصد) ، منحنی تغییرات تنش واقعی دربرابر درجه حرارت دارای دوماکزیمم نرم‌تر میباشد.



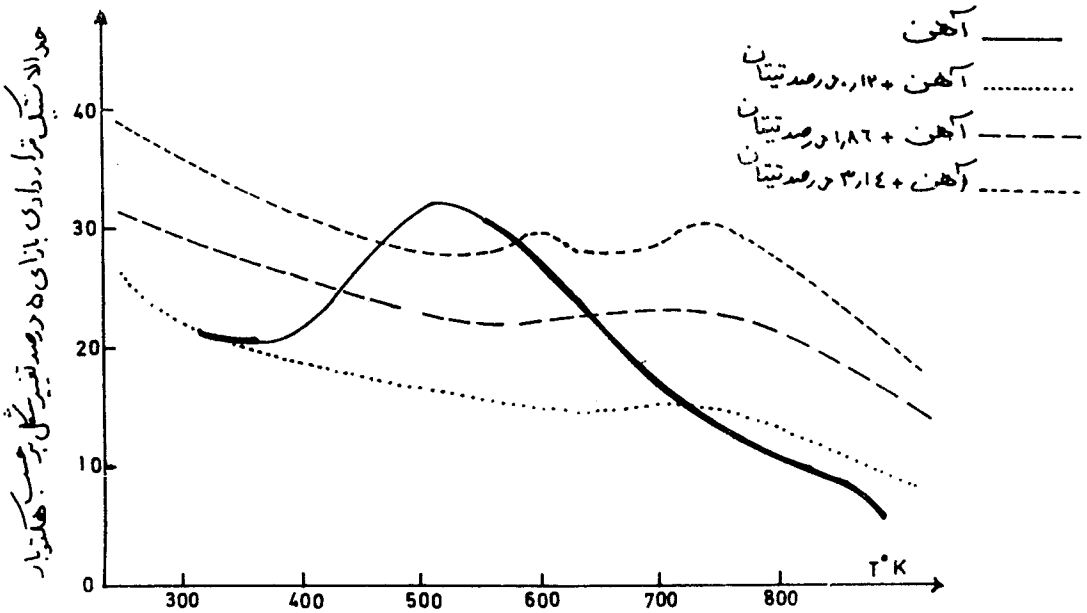
شکل ٤

تغییرات تنش واقعی گسیختگی برای آهن آلیاژهای مختلف آهن وتیتان برحسب درجه حرارت

دامنهٔ صعود منحنی بطرف ماکزیمم ($\delta\sigma$) ، با افزایش مقدار تیتان بالا میرود ولی درجه حرارت مربوط به‌نقطه ماکزیمم‌تغییرنمیکند ودرهمان حدود۷۱۳درجه‌سانتیگراد باقی می‌ماند. بعلاوه منحنی‌تغییرات‌حدالاستیک‌قرار دادی‌برای ۵ درصد تغییر شکل پلاستیک دربرابر درجه حرارت، مشابه شکل تغییرات تنش واقعی است (شکل ۵).

ج- تغییرات سرعت سخت شدن $\left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right)$ برای افزایش طولی برابر ۵ درصد برحسب درجه حرارت نشان میدهدکه برای آلیاژها دوماکزیمم بوجود میاید. درمورد آلیاژها، درجه حرارتی که مطابق دومین ماکزیمم است تقریباً ثابت است (شکل ٦).

د- ظهور پدیده پورتون- لوشاتولیه درآهن مبنا باکاهش قابل توجهی درنرمی وقابلیت چکش خواری فلز همراه است.



شکل (٥)

تغییرات حدالاستیک قراردادی با درجه حرارت ومقدار تیتان

برعکس در مورد آلیاژهای آهن ــ تیتان،درصد تغییرشکل یکنواخت‌تغییرات قابل توجهی رانشان نمیدهد. ولی کم شدن تغییرشکل یکنواخت دردرجه حرارت‌های بیش‌از ۸۰۰ درجه کلوین درمورد آهن، احتمالا به لغزش مرز دانه‌ها مربوط میشود که درنتیجه زودتر تمرکز تنش راموجب میشود (شکل ۷) .

بطورکلی ازروی پدیده‌های مشاهده شده، ویژگیهای زیر رامیتوان بیان کرد:

ــ درمورد آلیاژها، درجه حرارت‌هائی که پدیده پورتون- لوشاتولیه درآن شروع به تظاهر میکند، بطور محسوسی ازآهن غیر آلیاژی بکار برده شده دراین بررسی بالاتر است .

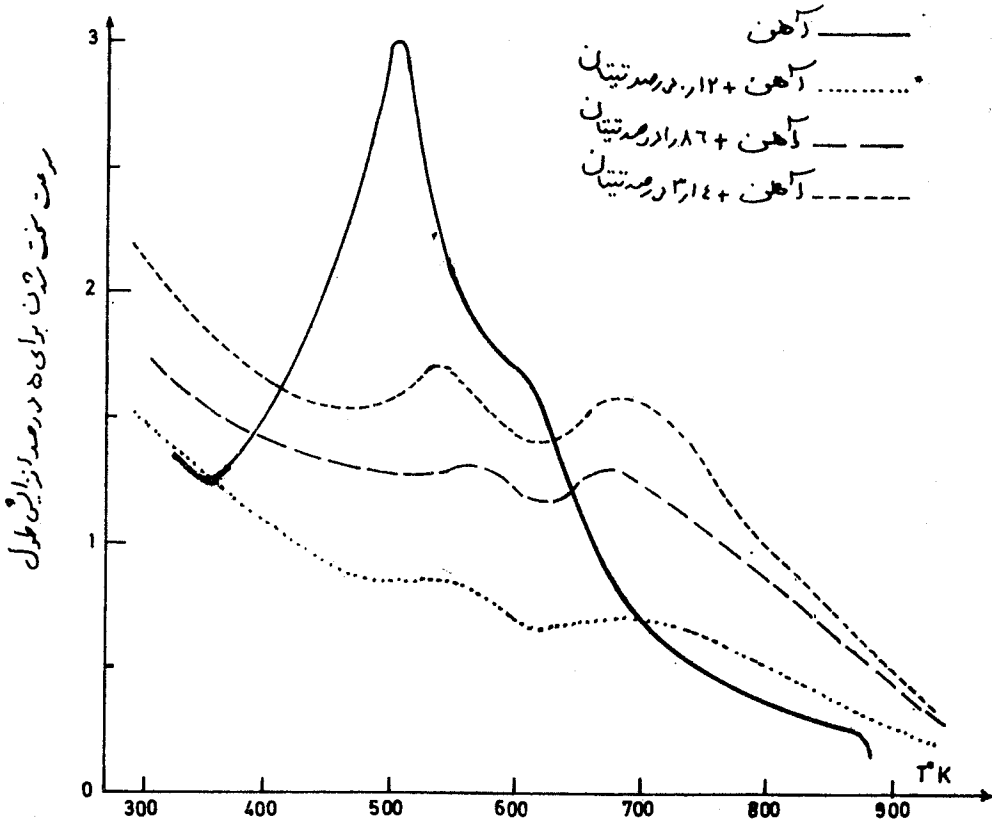
ــ ظهور دندانه‌ها پس ازیک کارسرد حداقل، رخ میدهد، درحالیکه برای آهن مبنا این کارسرد معادل صفر است.

ــ اثر پدیده پورتون- لوشاتولیه برروی ویژگیهای مکانیکی (دامنه صعود منحنی بطرف ماکزیمم یعنی $\delta\sigma$)، درمورد آهن، با رزتر ازاثر آن برروی آلیاژها میباشد.

ــ اگر درمورد آهن یک نقطه تسلیم مشاهده میشود، برای آلیاژها هیچگونه ناپیوستگی درحدالاستیک دیده نخواهد شد.

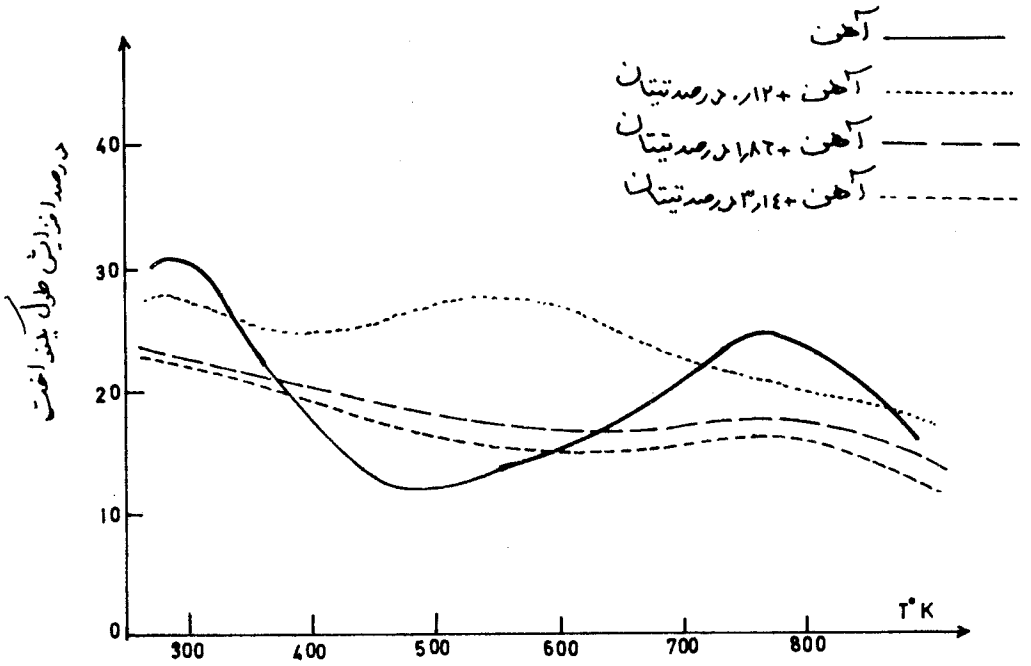
ــ با مقایسه درجه حرارتهای نقاط ماکزیمم درمنحنیهای شکل (٤) وشکل (٦) دیده میشود که بطورکلی درجه حرارتهای ماکزیمم درمنحنیهای مربوط به حدگسیختگی ازدرجه حرارت های ماکزیمم درمنحنهای سرعت سخت شدن بالاتر است وحتی میتوان‌گفت که نقاط ماکزیمم درروی منحنیهای سرعت سخت شدن تقریباً درحدود نقطه می‌نیمم منحنیهای حدگسیختگی است. بالاخره مناطقی که درآن مقاومت ناگهان زیاد میشود، با ظهور دندانه‌ها درروی منحنی‌بار- تغییرشکل دررابطه مستقیم است.

بخوبی دیده میشود احتمال آنکه شکل ایجاد دندانه‌ها در مورد آهن مورد آزمایش و آلیاژها یکی باشد، خیلی کم است . همچنین درروی منحنیهای تغییرات σ_M , $\sigma_{0.\%}$, $\left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right)_{0\%}$ و ε_M برای آلیاژی با ۰/۱۲ درصدتیتان،ماکزیمم‌هائی وجود دارد، درحالیکه برای همین آلیاژ منحنی‌بار- تغییرشکل هیچگونه ناپیوستگی نشان نمیدهد.



شکل (۶)

اثر درجه حرارت برروی سرعت سخت شدن درآلیاژهای آهن- تیتان برای ۵ درصد افزایش طول



شکل (۷)

اثر درجه حرارت برروی درصد افزایش طول یکنواخت

۴۰۰۰- تحلیلی از نتایج و تئوری‌های مختلف

بطورکلی دردرجه حرارتهای پائین دندانه‌های ایجاد شده نسبت به منحنی سخت شدن دربالا قرار دارند و معرف قفل شدن نابجائی‌ها میباشند. برای رهائی نابجائی از آتمسفر قفل کننده یک تنش اضافی لازم میشود .

دردرجه حرارتهای بالاتر، شکل دندانه‌ها معرف رها شدن های سریع نابجائی‌ها است. این عمل موجب افت شدید درمقدار تنش میشود.

درتئوری‌های مختلفی که برای توجیه مکانیزم پدیده پورتون- لوشاتولیه توسط Sumino , Brown , Mouturat et al. پیشنهاد شده است میتوان یک نقطه مشترك یافت وآن‌اینکه درحوالی نابجائیها،مناطقی ایجاد میشود که درجه نظم آن اززمینه کمتر است. این ابر بی‌نظمی دارای همان نقشی است که ابرکاترل ایفا میکند .

مدل‌های پیشنهاد شده توسطBergstron و Mc Cormick برمبنای قفل‌شدن نابجائی‌هائی است که بطور موقت متوقف میشوند. درحقیقت دراین مدل‌ها نشان داده شده است که حرکت نابجائی‌ها بطوریکنواخت صورت نمیگرد، بلکه بصورت جهشهای مداوم است.

درتفسیر چگونگی ظهور پدیده پورتون- لوشاتولیه با توجه به مدلهای مذکور میتوان چنین نتیجه‌گرفت که یک مقدار حداقل خلاء اتمی لازم است تا دیفوزیون اتمهای حل شده برای قفل کردن نهائی نابجائیهائی که عامل تغییر شکل پورتون- لوشاتولیه هستند بتواند صورت‌گیرد.

تفسیر کلاسیک پدیده پورتون - لوشاتولیه تشکیل آتمسفری را در حوالی نابجائی‌ها داخل میکندکه این نابجائی‌ها با این آتمسفر ترمز شده وسپس قفل میشوند. ادامه تغییرشکل با آزاد شدن این نابجائی‌ها ویاتولد نجائی‌های جدید همراه خواهد بود. درحقیقت، درتئوری کاترل درصورتی فعل وانفعال حلال- نابجائی امکان پذیر است که قابلیت تحرک اتمهای حل شده به قابلیت تحرك نابجائی‌ها نزدیک باشد. دراین صورت نتیجه می‌شودکه اتمهای حل شده بایستی با سرعت نسبتاً زیاد وتا فواصل زیاد مهاجرت کنند. برعکس طبق پیشنهادMc Cormick ایجاد آتمسفری در حوالی یک نابجائی بی‌حرکت شده، یک حرکت قابل توجهی ازاتمهای حل شده رالازم ندارد واین امر اساساً فقط اتمهائی راکه درمجاورت بلافصل نابجائی قرار دارند به حرکت وا می‌دارد.

با اینحال تحرك اتمهای حل شده باید باندازه‌کافی باشد تا غلظت لازم برای قفل‌کردن راپیش ازآنکه نقص‌های خطی مجدداً بحرکت درآیند، حاصل کند. درنتیجه میتوان دریافت که چرا دردرجه حرارت‌های پائین که تحرك اتمهای جانشینی کمتر است هنوز پدیده پورتون- لوشاتولیه نمیتواند تظاهرکند ولی وقتی درجه حرارت آزمایش‌از حدی‌نیز تجاوزکند، سرعت حرکت نابجائی‌ها باندازه‌ای میشودکه دیگر توقف‌های موقت نابجائی رخ نداده وپیوستگی درمنحنی بار - تغییرشکل دیده میشود. بطورکلی تحرك اتمهای متوقف کنندهٔ موقتی نابجائی‌ها که برای ظهور پدیده پورتون- لوشاتولیه لازم است به تعدادی خلاء اتمی‌احتیاج دارد. تولید خلاء‌های مذکور با ایجاد یک مقداری کارسرد اولیه (εc) ممکن است.

برای توقف موقتی نابجائی‌ها درابتدای تغییرشکل، تعداد نقصهای موجودکم ولذا سدهای حرکت نابجائی‌ها ناچیز است وزمان توقف متوسط نابجائی‌ها برای‌آنکه‌قفل کردن ممکن‌شود، کوتاه وناکافی‌است. Bergstron و Roberts نشان داده‌اندکه با افزایش مقدار تغییرشکل ، تعداد نابجائی‌ها زیاد میشود ولی تعداد نابجائی‌های متحرك تقریباً ثابت میماند ودرنتیجه مجموعه نابجائی‌های غیر متحرك بالا میرود. باین ترتیب زمان توقف نابجائی‌های متوقف شده زیاد میشود، بطوریکه تحریک پدیده قفل کردن موقتی، برای حلال ممکن میشود. ولی با افزایش درجه حرارت، تحرك اتمهای حل شده زیادتر میشود ولذا عمل توقف‌های موقتی سریع‌تر صورت میگیرد وزمان لازم برای توقف مذکورکمتر است وباین ترتیب کارسرد لازم با افزایش درجه حرارت کم میشود.

وقتی درجه‌حرارت‌باندازه‌کافی بالاست ، تحرك‌اتمهای‌حل شده باندازه‌کافی‌بوده وبه‌نابجائی‌هاامکان-می‌دهند فقط تا فاصله‌کوتاهی همراه با آتمسفرشان حرکت‌کنند. زیرا این نابجائی‌ها تقریباً بلافاصله توسط آتسفر نابجائی دیگری

که در پیش آن قرار دارد، درتله میافتند وخصوصاً افت‌تنشی که‌ازآزادی موقت این نابجائی رخ میدهد به آن امکان نمی‌دهد تا بتواند آتمسفر جدید خود رارها کند. لذا یک منطقه کوچک سخت شدن، پیش ازآنکه تنش لازم برای فرآیند گریز مجدد حاصل شود، بوجود میاید. باین ترتیب دندانه‌های نوعBظاهر میشوند. علت آنکه دراین نوع دندانه‌ها با افزایش درجه حرارت کارسرد لازم برای ظهور اولین دندانه زیاد میشود آنست که با بالا بودن تحرك اتمهای حل شده، خیلی آسانتر میتواند نابجائی‌ها راهمراهی کنند. لذا، تنش مطابق با اولین دندانه پس ازیک افزایش طول بیشتری مشاهد میشود. زیرا علاوه برآنکه بخشی ازتغییرشکل برای ایجاد خلاءها لازم است، بخش دیگری ازکار انجام شده، موجب حرکت پیوسته این نابجائیها وآتمسفر دور وبرشان میگردد که مجموعاً تغییر شکل اولیه قبل‌ازآغاز پدیده پورتون- لوشاتولیه رامیسازند.

منابع

1- A. H. Cottrell, Phil. Mag. 44, 829 (1953).

2- M. Weisz et al. 6e Colloque de metallurgie (19, Juillet 1962).

3- W, J. Mc Gregor Teggart ,Elements of Mechanical metallurgg, Macmillan Co. New-York (1966).

4- P. Dubots, G. Cizeron, C. R. Acad. sc. Paris, 278, 841 (1974).

5- Y. Bergstron, W. Roberts, Acta Met. 19, 815 (1971).

6- P. Dubots, G. Cizeron, Mem. sci. de la Rev. Met. 9, 675 (1975).

7- P. G. Mc. Cormick, Acta Met., 20, 351 (1972).

8- N. Brown, phil. Mag. 42, 693 (1959).

9- R. K. Ham, D. Jaffrey, phil. Mag. 15, 247 (1967).

10- A. J. R. Soler- Gomez et W. J. Tegart. phil. Mag. 20, 495 (1969).

11- J. F. Dinhut, T. Bonou et P. Moine, Acta Met. 24, 5-445 (1944).

12- A. Korbel, J. Zasadzinski and Z. Sieklucka, Acta Met. 24,5-919 (1976).