شکست و تنش در مقاطع جوشکاری

جزوه درسی برای دانشجویان دانشگاه فنی‌حرفه‌ای

تألیف و تدوین: فریدون مداح

گفتار یکم:

تنش‌های مکانیکی

انرژی:

جهان پیرامون شما از دو مفهوم ماده و انرژی ساخته شده است. هرچند باید دانست که ماهیت ماده و انرژی نیز در واقع یکی است. به تعبیری می‌توان گفت: ماده، صورت بسیار چگال شده‌ی انرژی است و انرژی، صورت بسیار بسیط شده‌ی ماده است. در ساده‌ترین تعریف متمایزکننده برای ماده و انرژی می‌توان گفت که: ماده جرم دارد و بخشی از فضا را اشغال می‌کند یا به عبارت دیگر حجم دارد.

نیرو:

به ماهیت اعمال انرژی بر مواد که می‌تواند منجر به تغییر در مواد گردد؛ نیرو گفته می‌شود. پس منشأ نیرو، انرژی است. نماد نیرو در مباحث علمی F است که حرف اول واژه $Force$ می‌باشد. واحد بین‌المللی نیرو، نیوتن (N) است.

وقتی نیرویی به ماده وارد می‌شود، سطح مقطع اعمال نیرو می‌تواند در تعیین واکنش ماده بسیار مؤثر باشد. به عنوان مثال وقتی با چکش بر سطح چوبی ضربه زده شود، نیروی اعمالی متناسب با سطح مقطع چکش به ماده تحمیل می‌شود. حال اگر همین میزان نیرو توسط میخی بر چوب فرود آید، نیروی اعمالی متناسب با سطح مقطع میخ به ماده تحمیل می‌شود. پر واضح است که واکنش ماده به شدت در این دو مورد متفاوت است. حال آنکه نیروی اعمالی در هر دو مورد برابر بوده است. پس می‌توان نتیجه گرفت برای قضاوت درباره واکنش ماده به نیروی اعمالی علاوه بر مقدار نیرو، سطح مقطع اعمال نیرو و حتی زاویه‌ی اعمال نیرو نیز مهم است. به همین دلیل پارامتر دیگری تعریف می‌شود که هر سه عامل فوق را در خود داشته باشد و آن کمیت برداری تنش است.

تنش:

آنچه رفتار ماده در برابر نیروی اعمالی را مشخص می‌کند صرفاً مقدار و جهت نیرو نیست؛ بلکه سطح اعمال نیرو نیز در بررسی رفتار ماده مؤثر است. به همین منظور استفاده از پارامتر تنش در بررسی رفتار ماده بسیار کاربردی‌تر از استفاده از مفهوم نیرو است.

تنش مقدار نیروی وارد بر واحد سطح است.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

توجه داشته باشید که هرچه نیرو افزایش یابد تنش نیز افزایش می‌یابد و از طرف دیگر هرچه سطح اعمال نیرو کاهش یابد، تنش افزایش می‌یابد.

واحد نیرو، «نیوتن» بوده و واحد سطح، «متر مربع» است. در نتیجه واحد تنش، «نیوتن بر متر مربع» است که آن را «پاسکال» می‌نامند. در سیستم بریتانیایی از واحد پوند بر اینچ‌مربع (*psi*) و یا کیلوپوند بر اینچ‌مربع (*ksi*) نیز استفاده می‌شود.

$$\frac{N}{m^2} \equiv Pa$$

در بحث مقادیر تنش اعمالی بر قطعات از جمله فولادها، از مقادیری در حدود چند میلیون پاسکال استفاده می‌شود که هر یک میلیون پاسکال را یک «مگاپاسکال» می‌نامند.

$$1000000\ Pa \equiv MPa$$

تنش نیز همچون نیرو کمیتی برداری است پس جهت دارد و می‌تواند با سطح وارد بر آن هر جهتی داشته باشد.

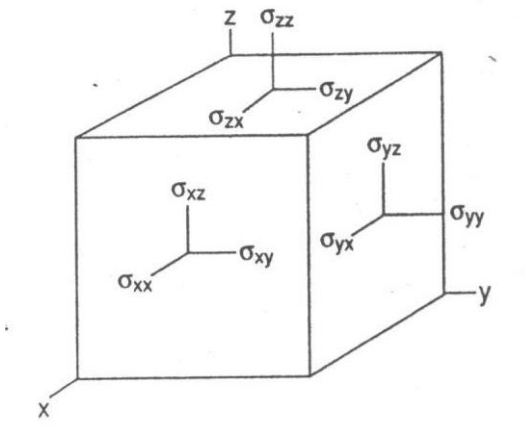
تنش می‌تواند استاتیکی یا دینامیکی باشد. درصورتیکه مقدار تنش در بستر زمان ثابت باشد، آن را استاتیکی و در غیر این صورت آن را دینامیکی می‌نامند.

انواع تنش:

- تنش نرمال (σ): اگر تنش بر سطح اعمال نیرو عمود باشد؛ که خود می‌تواند شامل دو حالت کششی (به‌شرط آنکه قطعه را تحت کشش قرار دهد) یا فشاری (به‌شرط آنکه قطعه را تحت فشار قرار دهد) باشد.
- تنش برشی (τ): اگر تنش با سطح اعمال نیرو موازی باشد.
- در صورتی‌که تنش با سطح اعمال نیرو زاویه‌های دیگری داشته باشد ترکیبی از دو حالت فوق است و می‌توان بردار آن را به دو مؤلفه‌ی عمودی و افقی (نرمال و برشی) تجزیه کرد.

گاهی از عناوین دیگری همچون تنش پیچشی یا تنش خمشی نام برده می‌شود که هر کدام از آنها نیز به نوعی ترکیبی از دو حالت فوق محسوب می‌شوند.

بدین ترتیب پیچیده‌ترین حالت اعمال تنش بر هر قطعه‌ای می‌تواند در هر سه راستا و هر کدام خود شامل سه مؤلفه باشد و در این صورت ۹ مؤلفه‌ی تنش خواهیم داشت (که سه‌تا از مؤلفه‌های تنش برشی مقداری برابر با سه تنش برشی دیگر دارند و جمعاً شش مؤلفه‌ی مستقل داریم) که آنها را در یک مجموعه به نام تانسور تنش نمایش می‌دهند.



شکل شماره ۱: مؤلفه‌های تانسور تنش

$$\sigma_{ij}=\begin{vmatrix}\sigma_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx}\\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{zy}\\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz}\end{vmatrix}$$

در این شرایط مؤلفه‌ی σ_{xx} نشان‌دهنده‌ی تنشی کششی در جهت محور X است و مؤلفه‌ی τ_{yx} نشان‌دهنده‌ی تنشی برشی وارد بر صفحه‌ی X و در جهت Y است.

در موارد ساده‌تر برخی از این مؤلفه‌ها صفر خواهند بود. به عنوان مثال در آزمون کشش تک‌محوری که قطعه صرفا در راستای Z کشیده می‌شود تانسور تنش به این شکل خواهد بود:

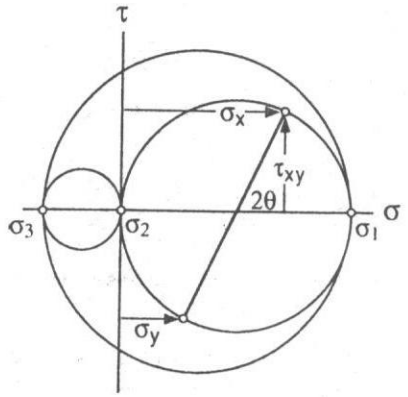
$$\sigma_{ij}=\begin{vmatrix}0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \sigma_{zz}\end{vmatrix}$$

همچنین در صورتیکه تنش اعمالی در یک صفحه باشد تانسور تنش بدین صورت است:

$$\sigma_{ij}=\begin{vmatrix}\sigma_{xx} & \tau_{yx}\\ \tau_{xy} & \sigma_{yy}\end{vmatrix}$$

اگر تحت شرایطی تنش‌های وارد بر قطعه صرفاً از نوع کششی باشند و به عبارت دیگر تمام مؤلفه‌های تنش برشی ، صفر باشند در این صورت به تنش‌های کششی اعمالی «تنش‌های اصلی» گفته می‌شود.

از درس مقاومت مصالح به خاطر دارید که به کمک معادلات و روش ترسیمی (دایره‌ی مور) همواره با تغییر محورهای مختصات می‌توان مقادیر تنش را در مختصات جدید پیدا کرد. از جمله، تنش‌های اصلی نیز به کمک این روش قابل شناسایی هستند.



شکل شماره ۲: دایره مور برای حالت سه‌بعدی

گفتار دوم:

رفتار مواد در برابر تنش‌ها

به طور کلی، پاسخ همه مواد به نیروهای مکانیکی، ابتدا تغییر شکل و در نهایت تخریب یا انهدام است.

تغییر شکل:

تغییر شکل را می‌توان شامل تغییر طول، تغییر سطح، تغییر زاویه و ... دانست. اگر تنش اعمالی از نوع نرمال باشد، تغییر شکل به صورت تغییر ابعادی بوده و اگر تنش اعمالی از نوع برشی باشد، تغییر شکل به صورت تغییر زاویه‌ای است.

انواع تغییر شکل از نظر ماندگاری:

- الاستیک (برگشت‌پذیر، کش‌سان)
- پلاستیک (برگشت‌ناپذیر، موم‌سان)

در تغییر شکل الاستیک، پس از حذف تنش، جسم، شکل اولیه‌ی خود را باز می‌یابد اما پس از رسیدن به حد تسلیم ماده، تغییر شکل پلاستیک آغاز می‌شود که تغییر حاصله پس از حذف تنش نیز ماندگار است.

مکانیزم یا سازوکار تغییر شکل مواد به حرکت نابجایی‌ها ارتباط دارد. هرچه این حرکت آسان‌تر و بدون موانع انجام شود، ماده تغییر شکل آسان‌تری خواهد داشت. بسته به اینکه تغییر شکل مواد مطلوب نظر ما باشد ما برعکس بخواهیم مقاومت ماده در برابر تغییر شکل را بالا ببریم تمهیداتی وجود دارد.

روش‌های افزایش استحکام:

- کاهش اندازه دانه
- آلیاژسازی
- کارسختی (کرنش‌سختی، کارسرد)

روش‌های کاهش استحکام:

- آنیل کردن (شامل سه مرحله بازیابی، تبلور مجدد و رشد دانه)

کرنش:

همانند بحث نیرو و تنش، در اینجا نیز صرف دانستن مقدار تغییر شکل بیانگر رفتار دقیق ماده نیست؛ بلکه نسبت میزان تغییر شکل به ابعاد و زوایای اولیه معیار دقیق‌تری برای بررسی در اختیار می‌گذارد.

به همین منظور پارامتری به نام «کرنش» را به صورت درصد نسبت تغییر شکل به شکل اولیه بیان می‌کنند.

انواع کرنش:

- کرنش نرمال (ابعادی (ε))
- کرنش برشی (زاویه‌ای (γ))

در این درس معمولاً با کرنش ابعادی (کرنش طولی) سر و کار خواهیم داشت.

برای محاسبه‌ی کرنش از دو فرمول استفاده می‌شود که در مقادیر کم، پاسخ یکسانی می‌دهند ولی در مقادیر بیشتر کرنش، با یکدیگر اختلاف دارند:

کرنش حقیقی: $\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right)$ کرنش مهندسی: $e = \frac{\Delta l}{l_0}$

دقت داشته باشید که افزایش طول قطعه، معادل کاهش سطح مقطع آن است و به همین دلیل در رابطه‌ی کرنش حقیقی، دو عبارت معادل هم قرار داده شده است. کرنش حقیقی مقدار دقیق‌تری را بدست می‌دهد و بنا به دلایلی استفاده از آن در حل مسائل مهندسی ترجیح داده می‌شود.

توجه داشته باشید که از آنجا که واحد تغییرات طول «متر» و همچنین واحد طول اولیه «متر» است؛ کرنش بدون بعد خواهد شد.

ناگفته پیداست که کرنش هم به دو نوع الاستیک و پلاستیک خواهد بود. همیشه کرنش الاستیک پیش از کرنش پلاستیک رخ می‌دهد. همچنین کرنش ممکن است به صورت لحظه‌ای رخ دهد و یا اینکه در بستر زمان انجام پذیرد. کرنش در بستر زمان را اصطلاحاً خزش می‌نامند. برای ایجاد تغییر شکل دائمی در ماده (که منظور نظر ما در این درس است) حتماً باید در قطعه کرنش پلاستیک ایجاد شود.

می‌توان ثابت نمود که در کرنش الاستیک، حجم ماده تغییر می‌کند ولی در کرنش پلاستیک حجم ماده ثابت می‌ماند. تقریباً بیشتر مواد در نیروهای کم دچار تغییر شکل الاستیک شده و اگر نیرو از حدی بیشتر شود، دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شوند.

تخریب (انهدام):

انهدام ناشی از نیروهای مکانیکی می‌تواند با دو تعبیر شکست و پاره‌شدن بیان شود. در عملیات شکل‌دهی منطقاً رسیدن به این مرحله مورد نظر نیست. معمولاً انهدام مکانیکی برای مواد با کرنش پلاستیک بسیار زیاد (مواد پلیمری) را پاره شدن می‌نامند. تخریب یا انهدام مکانیکی می‌تواند با ساز و کارهای گوناگونی انجام شود که عبارت‌اند از: شکست ترد، شکست نرم، خستگی، خزش، شکست خوردگی.

رابطه‌ی بین تنش و کرنش:

در جریان شکل‌دهی مواد، دانستن ارتباط بین تنش و کرنش بسیار سودمند خواهد بود. عمدتاً ارتباط بین این دو پارامتر در دو حالت الاستیک و پلاستیک متفاوت می‌باشد.

در ناحیه‌ی الاستیک بین تنش و کرنش رابطه‌ای خطی برقرار است. بدین معنا که با افزایش تنش، کرنش نیز با ضریبی ثابت افزایش می‌یابد. رابطه‌ی بین این دو پارامتر توسط معادله‌ی هوک بیان شده است:

$$\sigma = E\varepsilon$$

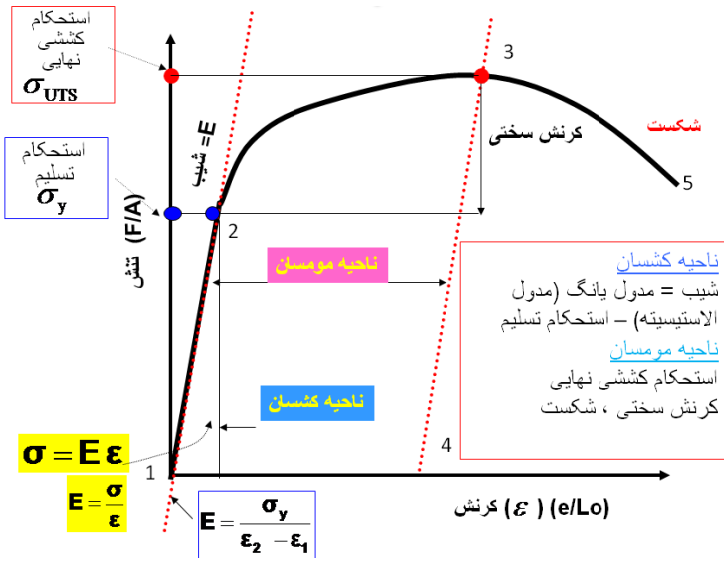
در این رابطه، E مدول الاستیسیته یا مدول یانگ نام دارد که برای مواد مختلف مقدار متفاوتی دارد. از آنجا که کرنش بدون بعد است، واحد مدول الاستیسیته نیز همچون تنش، پاسکال خواهد بود.

در ناحیه‌ی پلاستیک معمولاً رابطه‌ی بین تنش و کرنش خطی نیست و توسط معادله‌ای به نام معادله‌ی کارسختی بیان می‌شود:

$$\sigma = k\varepsilon^n$$

در این رابطه k را ضریب کارسختی و n را توان کارسختی می‌نامند. n کمیتی بدون بعد است و واحد k پاسکال است.

ورود از ناحیه‌ی الاستیک به پلاستیک توسط نقطه‌ای به نام «نقطه‌ی تسلیم» مشخص می‌شود.



شکل شماره ۳: منحنی تنش–کرنش

گفتار سوم:

خواص مکانیکی مواد

چگونگیِ پاسخ مواد گوناگون در برابر تنش‌های اعمالی، مشابه یکدیگر نیست. برخی بدون تغییر شکل پلاستیک، می‌شکنند. برخی پس از تغییر شکل پلاستیک قابل توجه، پاره می‌شوند. برخی تغییر شکل الاستیک خوبی دارند و برخی نه. برخی با کمی تنش، دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شوند و برخی نیاز به تنش‌های بسیار بیشتری دارند تا تغییر شکل پلاستیک بدهند. برخی در برابر ساییده شدن مقاوم هستند و برخی نه و ...

اینکه هر کدام از مواد گوناگون، چگونه و تا چه حدی کرنش می‌کنند و می‌شکنند و چه پاسخی در برابر تنش‌های اعمالی می‌دهند؛ برخواسته از بخشی از ویژگی‌های ساختاری مواد است که آن را خواص مکانیکی مواد می‌نامند.

تعدادی آزمون (تست) برای بررسی ویژگیهای مکانیکی مواد و شناسایی رفتار مکانیکی آنها طراحی شده است. به دلیل اینکه در اغلب این تست‌ها قطعه تا مرز انهدام مورد بررسی قرار می‌گیرد، این تست‌ها را مخرب می‌نامند. مهم‌ترین آزمون‌های مکانیکی عبارتند از:

- آزمون کشش
- آزمون ضربه
- آزمون سختی‌سنجی
- آزمون فشار
- آزمون برش
- آزمون خستگی
- آزمون خمش
- آزمون پیچش
- آزمون خزش

از این میان، آزمون کشش یکی از مهمترین آزمون‌های مکانیکی است که به کمک آن می‌توان بخش قابل توجهی از خواص مکانیکی هر ماده‌ای را مورد تحلیل و شناسایی قرار داد. نتیجه آزمون کشش معمولاً به صورت منحنی معروف به منحنی تنش–کرنش ارائه می‌گردد. در ادامه مهمترین خواص مکانیکی مواد معرفی شده است:

تردی و نرمی:

اگر پاسخ ماده‌ای صرفاً کرنش الاستیک و سپس شکست باشد، آن ماده را ترد می‌نامند و اگر پاسخ ماده‌ای شامل کرنش الاستیک، کرنش پلاستیک و سپس شکست باشد آن ماده را نرم می‌نامند.

درصد انعطاف‌پذیری:

به مقدار کرنش ماده پیش از شکست گفته می‌شود.

سفتی:

به مقاومت ماده در برابر تغییر شکل الاستیک می‌گویند. مقدار این پارامتر متناسب با مدول الاستیسیته (مدول یانگ) است و هرچه شیب خط ناحیه الاستیک بیشتر باشد، ماده سفت‌تر است.

استحکام تسلیم:

به مقدار تنشی که ماده می‌تواند تحمل کند، پیش از آنکه وارد مرحله کرنش پلاستیک شود، تنش تسلیم یا استحکام تسلیم می‌گویند. هرچه استحکام تسلیم ماده‌ای بیشتر باشد، آن ماده به سادگی تغییر شکل پلاستیک نمی‌دهد.

استحکام نهایی:

به بیشترین تنشی که یک ماده می‌تواند تحمل کند استحکام نهایی می‌گویند. در صورت اعمال تنش بیش از استحکام نهایی گلویی شدن در سطح مقطع ماده رخ داده و قطعه محکوم به انهدام خواهد شد.

استحکام شکست:

به تنشی که ماده در آن می‌شکند، استحکام شکست می‌گویند. از آنجا که در محاسبات مهندسی نیروی مورد نیاز همواره بر سطح مقطع اولیه تقسیم می‌گردد. استحکام شکست کمتر از استحکام نهایی به دست می‌آید. به عبارت دیگر برای شکست یک ماده، نیرویی کمتر از نیروی نهایی مورد نیاز است.

سختی:

به مقاومت ماده در برابر تغییر شکل موضعی روی سطح اطلاق می‌شود. تغییر شکل‌هایی از جمله خط برداشتن، ساییده شدن، فرو رفتن ساچمه و ...

قابلیت ارتجاعی:

به مقدار انرژی جذب شده توسط ماده در مرحله الاستیک که ماده می‌تواند پس از برداشتن نیرو، این انرژی را باز پس دهد، قابلیت ارتجاعی می‌گویند. به عبارتی دارا بودن همزمان دو صفت استحکام تسلیم بالا و کرنش الاستیک خوب، بیانگر قابلیت ارتجاعی بالاست. مقدار این پارامتر را می‌توان با اندازه‌گیری سطح زیر منحنی تنش‌کرنش در ناحیه الاستیک به دست آورد.

چقرمگی:

به مقدار انرژی جذب شده پیش از شکست چقرمگی می‌گویند. اگر ماده‌ای ضمن دارا بودن استحکام بالا، انعطاف‌پذیری خوبی داشته باشد به اصطلاح آن ماده چقرمه است. نباید فراموش کرد که افزایش استحکام عموماً منجر به کاهش انعطاف‌پذیری می‌شود و در نتیجه، بهترین چقرمگی، در حالتی بین‌آبین از بیشترین استحکام و بیشترین انعطاف‌پذیری، رخ خواهد داد. مقدار این پارامتر را می‌توان با اندازه‌گیری سطح زیر منحنی تنش‌کرنش به دست آورد.

گفتار چهارم:

خواص حرارتی مواد

مهم‌ترین خواص حرارتی مواد عبارتند از:

گرما:

گرما انرژی جابجا شده از یک جسم به جسم دیگر یا از ناحیه‌ای به ناحیه‌ای دیگر، طی برهم‌کنش‌های گرمایی است. انتقال انرژی گرمایی از راه‌های گوناگون مانند رسانش گرمایی، تابش و همرفت انجام می‌شود.

دما:

یکی از ویژگی‌های ماده است که میزان گرمی آن را نشان می‌دهد و جهت جریان گرما را مشخص می‌کند. اگر دو جسم دارای دمای متفاوت باشند، انرژی گرمایی از جسم با دمای بیشتر به جسم با دمای کمتر منتقل می‌شود تا هنگامی که دمای دو جسم به تعادل برسد. در دستگاه بین‌المللی از یکای کلوین استفاده می‌شود؛ ولی یکاهای دیگری مانند سلسیوس و فارنهایت نیز برای اندازه‌گیری دما به کار می‌روند.

ظرفیت گرمایی:

ظرفیت گرمایی یا ظرفیت حرارتی یک سامانه عبارت است از نسبت گرمای مبادله شده با سیستم به تغییر دمای ناشی از مبادله گرما. مفهوم ظرفیت گرمایی فقط در مواردی به کار می‌رود که مبادله گرما با سیستم تنها باعث تغییر دمای سیستم شود و در مواردی که تغییرفاز ایجاد می‌شود، به کارنمی‌رود.

ظرفیت گرمایی ویژه:

ظرفیت گرمایی ویژه معادل مقدار گرمایی است که لازم است مقدار مشخص از ماده‌ای دریافت کند تا دمای آن یک واحد افزایش یابد این مقدار مشخص معمولاً ۱ گرم است.

$$C = \frac{q}{m\Delta T}$$

گرمای نهان تغییر فازی:

گرمایی است که ماده در هنگام تبدیل از حالتی به حالت دیگر از دست داده یا جذب می‌کند. نام دیگر گرمای نهان، «گذار فازی» و یا «انتالپی تبدیل» است. اثر گرما در چنین دگرگونی‌هایی برگشت‌پذیر است. گرمای جذب شده توسط یک جامد در هنگام مایع‌شدن در نقطه ذوب را گرمای نهان ذوب و گرمای جذب شده توسط یک مایع برای تبدیل شدن به بخار در فشار یک اتمسفر و در نقطه جوش را گرمای نهان تبخیر می‌گویند. این تغییر، زمانی که تغییر فاز جامد به مایع داریم گرماگیر و در جهت عکس گرماده است.

معادله گرمای نهان ذوب به این صورت است:

$$L = \frac{q}{m}$$

ضریب هدایت حرارتی:

بیان‌کننده نرخ انتقال حرارت بین یک سطح جامد و سیال اطراف به روش همرفت می‌باشد. این کمیت بر اساس رابطه زیر تعریف می شود:

$$k = \frac{q}{A.\Delta T}$$

در این رابطه q مقدار حرارت منتقل‌شده بر حسب وات، A سطحی که حرارت از آن منتقل شده بر حسب m^2 و ΔT اختلاف دما بین سطح و سیال اطراف آن است.

ضریب نفوذ گرمایی:

به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c}$$

در این رابطه، k ضریب هدایت حرارتی، c گرمای ویژه و ρ چگالی است.

ضریب انبساط حرارتی:

وقتی به یک جسم گرما می‌دهیم افزایش انرژی جنبشی ذرات سازنده باعث جنب‌وجوش مولکول‌ها و درخواست برای فضای بیشتر و در نهایت افزایش حجم یا انبساط می‌شود. به مقدار یا عدد افزایش حجم جامد، مایع یا گاز که بر اثر افزایش دمای یکسان است، ضریب انبساط حرارتی می‌گویند که بر دو عامل تعداد ذرات و میزان گرما استوار است. ضریب انبساط حرارتی به صورت خطی و حجمی تعریف می‌شود.

گفتار پنجم:

مکانیزم‌های تغییرشکل

از دیدگاه اتمی، تغییر شکل مواد بر اساس دو مکانیزم «لغزش» و یا «دوقلویی» رخ می‌دهد. پیش از بررسی این دو مکانیزم لازم است با نقایص کریستالی در جامدات به ویژه نابجایی، به عنوان مهم‌ترین عیب در بحث تغییر شکل، آشنا شویم:

نقایص کریستالی در جامدات:

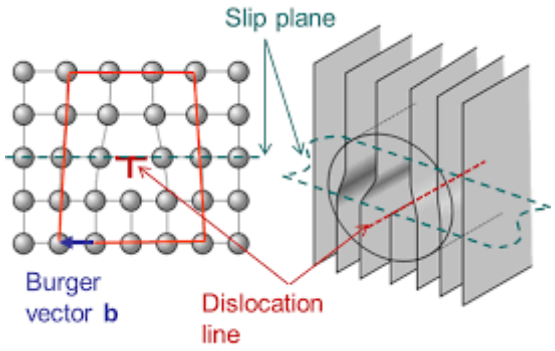
به کمک روابط ترمودینامیکی می‌توان ثابت نمود که هرگز نمی‌توان ماده‌ای با شبکه کریستالی کامل و بدون نقص تولید کرد. به عبارت دیگر همواره در شبکه‌های کریستالی نقایصی وجود دارد. این نقایص در دست‌یابی به خواسته‌های مهندسان، گاه نقش مفید و گاه نقش مخرب خواهند داشت.

مهم‌ترین عیوب شبکه کریستالی در جامدات عبارتند از:

- نقطه‌ای (بدون بعد)
  - جای‌خالی (تهی‌جای)
  - اتم جانشینی
  - اتم بین‌نشینی
- خطی (یک‌بعدی)
  - نابجایی
- صفحه‌ای (دوبعدی)
  - مرزدانه
  - مرز فرعی
  - مرز دوقلویی
  - ناحیه نقص در چیدمان
- حجمی (سه‌بعدی)
  - ترک
  - حفره
  - آخال

نابجایی (*Dislocation*):

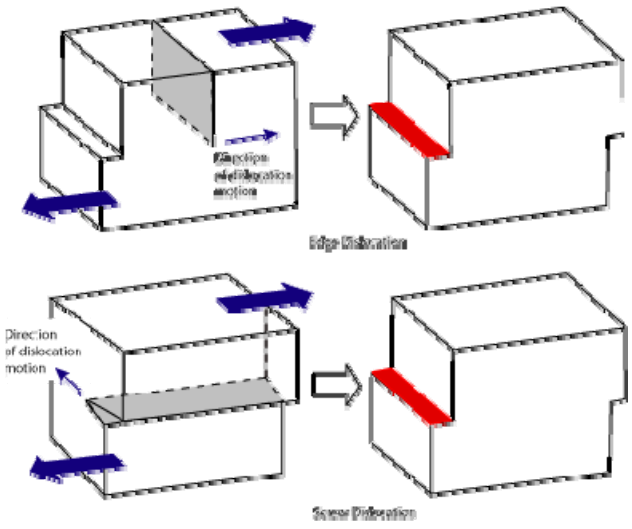
هرگاه، به هنگام چیدمان اتمی در شکل‌گیری شبکه کریستالی جامدات، به هنگام انجماد، عملیات‌حرارتی و عملیت مکانیکی، صفحاتی از اتم‌ها در موقعیت اصلی خود قرار نگیرند؛ نقصی خطی در ساختار بلور ایجاد می‌گردد که نابجایی نام دارد. در شکل زیر می‌توان بخشی از یک بلور کریستال را که به دلیل نقص در چیدمان صفحات کریستالی، حاوی یک خط نابجایی است؛ مشاهده کرد.



در تصویر ارائه‌شده صرفاً بخشی از بلور مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه بلورهای کامل به دانه‌های مجاور و به عبارتی مرزدانه‌ها منتهی می‌شوند؛ نابجایی‌ها هرگز به صورت خطی با دو انتهای آزاد وجود نخوهند داشت. بلکه یا دو سر نابجایی به مرزدانه‌ها متصل خواهد شد و یا خط نابجایی به صورت حلقه در داخل یک بلور وجود خواهد داشت.

بردار نشان‌دهنده جهت و مقدار حرکت نابجایی را بردار برگرز (b) می‌نامند. بسته به زاویه‌ی بین خط نابجایی و بردار برگرز آن می‌توان سه‌نوع نابجایی تعریف کرد.

- نابجایی لبه‌ای : خط نابجایی بر بردار برگرز عمود است.
- نابجایی پیچی: خط نابجایی با بردار برگرز موازی است.
- نابجایی مختلط: خط نابجایی با بردار برگرز زاویه‌ای بین صفر تا نود درجه می‌سازد.



لغزش:

مهم‌ترین مکانیزم تغییر فرم لغزش نام دارد که عبارت از جابجایی یک صفحه‌ی کریستالی بر روی صفحه‌ای دیگر در جهتی مشخص. در این فرآیند اتم‌ها به اندازه‌ی مضرب صحیحی از فاصله‌ی اتمی در امتداد صفحه لغزش حرکت می‌کند. محصول لغزش صفحه کریستالی ایجاد خطی بر روی کریستال است که آن را خط لغزش می‌نامند.

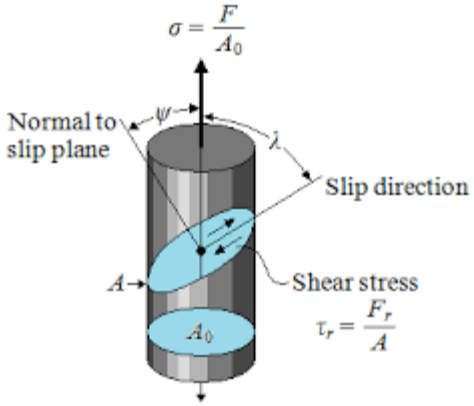
صفحات پردانسیته به دلیل اینکه از یکدیگر فاصله‌ی بیشتری دارند و در نتیجه ممانعت برای حرکت صفحه کمتر است؛ مرجح‌ترین صفحات برای لغزش محسوب می‌شوند. همچنین لغزش در جهات پردانسیته شامل کمترین میزان جابجایی است و به دلیل نیاز به انرژی کمتر مرجح خواهد بود. مجموع هر صفحه لغزشی و جهت لغزشی را سیستم لغزشی می‌نامند.

۱۲ سیستم لغزشی در شبکه *FCC*، ۱۲ سیستم در شبکه *HCP* و ۴۸ سیستم لغزشی در شبکه *BCC* وجود دارد. اما در شبکه‌ی *HCP* صرفاً ۳ سیستم که روی صفحه‌ی قاعده‌ی سلول واحد این شبکه قرار دارند فعال هستند و همچنین اغلب سیستم‌های لغزشی شبکه *BCC* غیرفعال بوده و یا با کمترین میزان ناخالصی و ... غیرفعال می‌شوند. به همین جهت از میان سه شبکه‌ی یاد شده شبکه‌ی *FCC* دارای بیشترین قابلیت تغییر شکل است.

محاسبه تنش تئوری لازم برای لغزش:

به منظور لغزش صفحات کریستالی بر روی یکدیگر لازم است که تنش برشی بر صفحه وارد آید. رابطه بین تنش اعمالی و تنش برشی بحرانی برای لغزش یک سیستم لغزشی توسط رابطه‌ی اشمید بیان می‌شود:

$$\tau_r = \sigma cos\psi cos\lambda$$



بر اساس این رابطه هرگاه مقدار σ، و زوایای ψ و λ به گونه‌ای باشد که از حد τ_r تجاوز کند؛ لغزش آغاز خواهد شد. مقدار τ_r جزء خواص ذاتی فلز است و به ترکیب‌شیمیایی، آلیاژسازی، عملیات حرارتی و دما بستگی دارد.

بر این اساس اگر تنش اعمالی بر صفحه کریستالی کاملاً عمود باشد؛ فرآیند لغزش رخ نمی‌دهد و در صورتی‌که تنش اعمالی با صفحه کریستالی مورد نظر زاویه داشته باشد؛ مؤلفه‌ی برشی آن منجر به لغزش خواهد شد.

به کمک محاسبات می‌توان نشان داد که، با فرض کامل بودن شبکه کریستالی، تنش لازم برای لغزش یک صفحه اتمی بر روی صفحه دیگر عبارت است از:

$$\tau_{th} = \frac{G}{2\pi}$$

نقش نابجایی‌ها در لغزش:

همانگونه که در بحث نفوذ اتم‌ها، حضور تهی‌جای‌ها در شبکه کریستالی منجر به تسهیل فرآیند نفوذ اتمی می‌شود؛ می‌توان اذعان داشت که وجود نابجایی‌ها در شبکه کریستالی، لغزش صفحات به روی یکدیگر را بسیار تسهیل می‌نماید. در بحث نفوذ اشاره شده است که حرکت اتم‌ها در یک جهت، معادل حرکت تهی‌جای در جهت مخالف در نظر گرفته می‌شود. اینجا نیز باید متوجه بود که آنچه تحت عنوان حرکت نابجایی مشخص شده است در واقع حرکت تک‌تک‌صفحات اتمی در جهت مخالف می‌باشد. بر اساس رابطه پیرلزنابارو، تنش لازم برای حرکت نابجایی عبارت است از:

$$\tau_{PN} = \frac{2G}{1-\nu} exp\left(-\frac{2\pi w}{b}\right)$$

که در این رابطه b بردار برگرز نابجایی و w عرض نابجایی است.

تا زمانی‌که نابجایی‌ها به راحتی در داخل شبکه فلز حرکت کنند؛ با افزایش تعداد نابجایی، نیروی لازم برای تغییر شکل کاهش می‌یابد و هنگامی‌که نابجایی‌ها به علت افزایش تعداد نتوانند به راحتی در شبکه حرکت کنند؛ با افزایش آنها نیروی لازم برای تغییر شکل افزایش می‌یابد. کند شدن حرکت نابجایی‌ها به دلیل برخورد نابجایی با نابجایی دیگر، حضور میدان تنشی ناشی از حضور نواقص نقطه‌ای و حضور مرز دانه، مرز فازی و مرز فرعی در مسیر حرکت نابجایی است.

دوقلویی:

دومین مکانیزم مهم تغییر شکل، مکانیزم دوقلویی است. هنگامی‌که شرایط لغزش مهیا نباشد از جمله اینکه به دلیل بارگذاری سریع و دمای پایین، زمان برای تغییر شکل با مکانیزم لغزش کافی نباشد؛ مکانیزم دوقلویی که شامل جابجایی دسته‌جمعی صفحات کریستالی است؛ محتمل خواهد بود. در مکانیزم دوقلویی، آرایش اتمی صفحات تغییر شکل‌یافته نسبت به صفحات تغییرنیافته متقارن بوده و اصطلاح دوقلویی به همین جهت در این باره به کار می‌رود. تشکیل دوقلویی عمدتاً همراه با صدای خفیفی در فلز است. انواع دوقلویی عبارتند از:

- دوقلویی مکانیکی: ناشی از عملیات مکانیکی که صرفاً در شبکه‌های HCP و BCC رخ می‌دهد.
- دوقلویی حرارتی: ناشی از عملیات آنیل کردن که در شبکه‌های FCC دیده می‌شود.

تفاوت لغزش و دوقلویی:

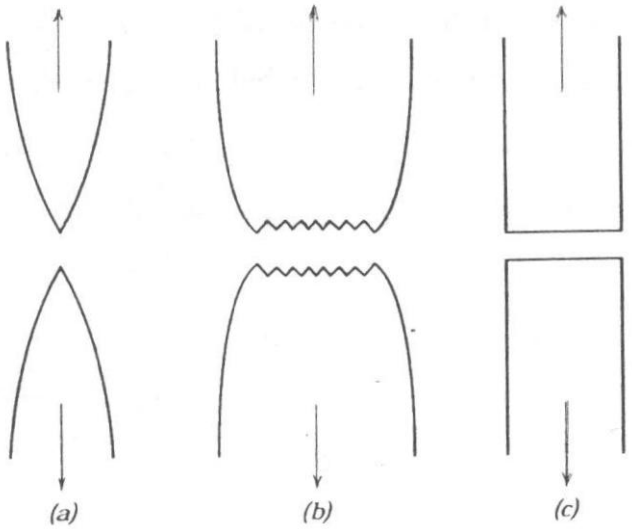
- در لغزش آرایش کریستالی در قسمت تغییر شکل یافته و نیافته مشابه یکدیگر است. درحالیکه در دوقلویی، جهت صفحات کریستالی قسمت تغییر شکل یافته با قسمت تغییر نیافته متفاوت است.
- مقدار حرکت صفحات لغزشی به اندازه‌ی مضارب صحیحی از فاصله‌ی اتمی خواهد بود درحالیکه مقدار حرکت صفحات دوقلویی معمولاً به مراتب کمتر از یک فاصله‌ی اتمی است.
- خطوط لغزش باریک و خطوط دوقلویی پهن هستند.
- لغزش در زمان‌هایی در حد میلی‌ثانیه رخ می‌دهد درحالیکه دوقلویی در زمان‌های به مراتب سریع‌تر و در حد میکروثانیه رخ می‌دهد.
- میزان تغییر شکل حاصل از مکانیزم دوقلویی کمتر از لغزش است.

گفتار ششم:

شکست

شکست ساده عبارت است از جدا شدن یا خرد شدن یک قطعه به دو یا چند تکه بر اثر تنش استاتیکی در دمای پایین نسبت به نقطه ذوب مواد. بر اساس میزان تغییر شکل پلاستیک پیش از شکست می‌توان شکست ساده را به دو گروه تقسیم نمود:

- شکست نرم: تغییر شکل پلاستیک و انرژی جذب شده پیش از شکست مقدار قابل توجهی دارد.
- شکست ترد: تغییر شکل پلاستیک و انرژی جذب شده پیش از شکست ناچیز است.



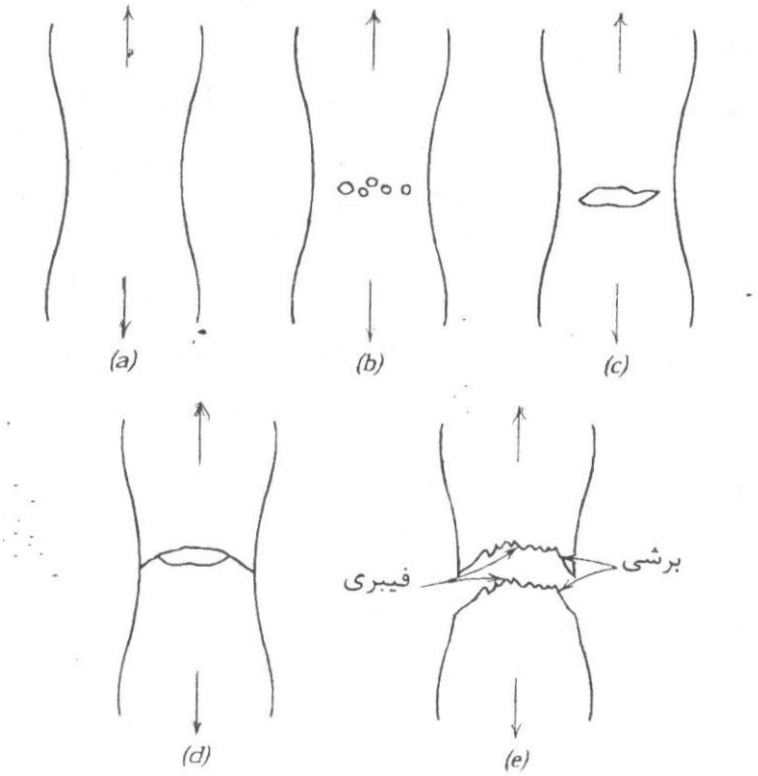
در واقع این دو وضعیت کاملاً از هم مستقل نیستند و به صورت طیف به هم پیوسته‌اند. دمای محیط، نرخ کرنش و حالت تنش می‌تواند یک وضعیت را به دیگری تبدیل کند. شکست نرم به دو دلیل همواره مرجح است: یکم اینکه تغییر شکل پیش از شکست به عنوان هشدار عمل می‌کند و دوم اینکه شکست نرم نیاز به انرژی کرنشی بیشتری برای انهدام دارد.

شکست نرم:

مکانیزم شکست شامل دو مرحله شکل‌گیری ترک و انتشار ترک است. در شکست نرم، تغییر شکل وسیع در نزدیکی ترک در حال رشد شکل می‌گیرد. افزایش طول ترک در این نوع شکست به آرامی رخ می‌دهد. این نوع ترک‌ها را اصطلاحاً ترک پایدار می‌نامند. بدین معنی که تا هنگامی‌که تنش اعمالی ثابت است؛ ترک گسترش نمی‌یابد.

مراحل رخداد شکست نرم عبارتند از:

- گلویی شدن
- ایجاد حفره‌های ریز در قسمت میانی مقطع
- بزرگ شدن و به هم پیوستن حفره‌ها و شکل‌گیری ترک بیضی‌شکل
- رشد آهسته ترک در جهت موازی با جهت اصلی
- انتشار سریع ترک در محیط خارجی منطقه گلویی در زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور تنش اعمالی و شکست قطعه

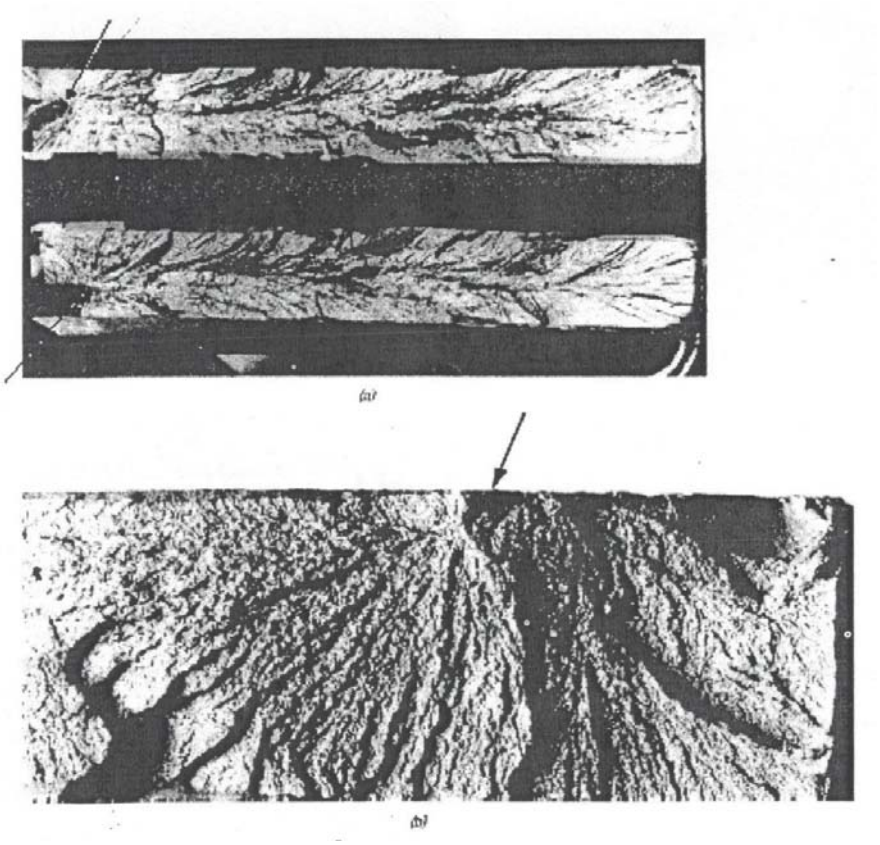


سطح مقطع چنین شکستی را فنجان–مخروطی می‌نامند. چرا که یکی از دو سطح دارای شکل فنجان و دیگری دارای شکل مخروط است. قسمت داخلی مرکزی معمولاً سطح دندانه‌ای دارد که نشانه تغییر شکل پلاستیک است.

شکست ترد:

مکانیزم شکست شامل دو مرحله شکل‌گیری ترک و انتشار ترک است. در شکست ترد، ترک‌ها بدون کوچک‌ترین تغییر شکل پلاستیک و بسیار سریع انتشار پیدا می‌کند. این ترک‌ها را ترک ناپایدار می‌نامند. در این شرایط ترک به صورت

خودبه‌خود و بدون تغییر در تنش اعمالی گسترش می‌یابد. جهت حرکت ترک تقریباً عمود بر جهت تنش کششی اعمالی است. سطح شکست نسبتاً مسطح است و هیچ‌گونه نشانه‌ای از تغییر شکل پلاستیک در آن مشاهده نمی‌شود. گاهی روی سطح مقطع خطوط V شکل منشعب از محل شروع ترک دیده می‌شود.



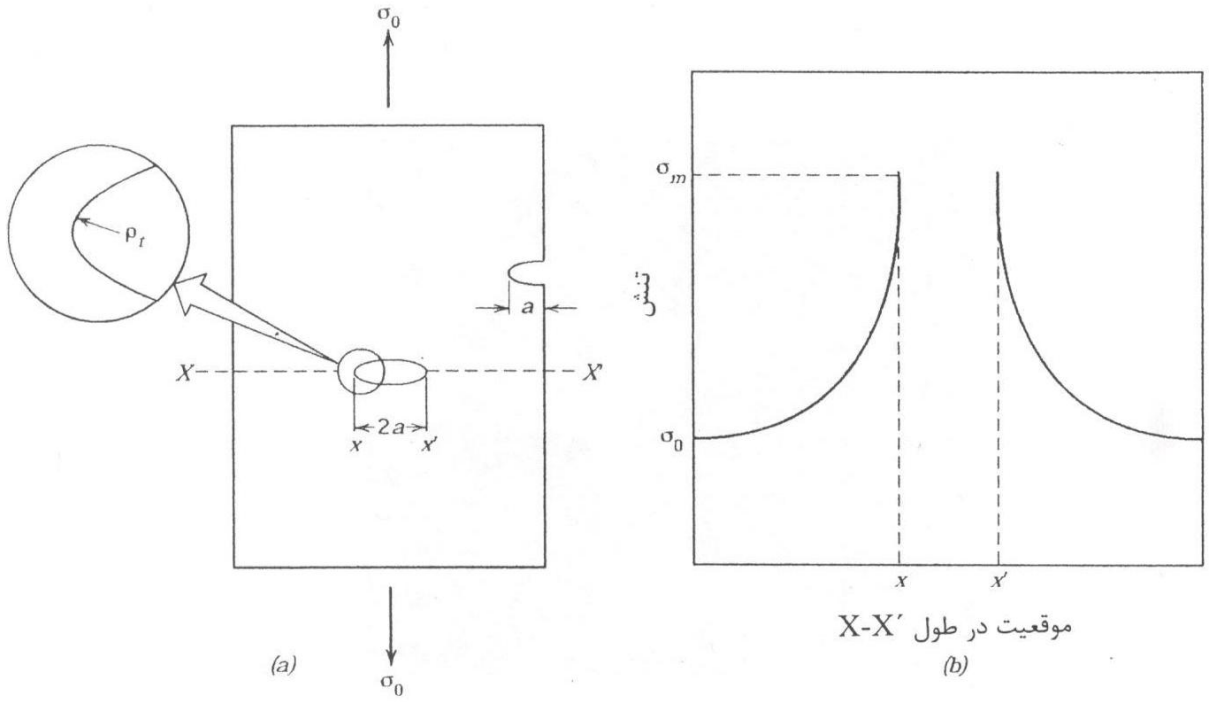
اصول مکانیک شکست:

شکست ترد در موادی که در حالت عادی نرم هستند باعث شده است تا اهمیت فهم بهتر مکانیزم‌های شکست آشکار شود. تلاش‌های وسیع تحقیقاتی در چندین‌دهه گذشته، به گشودن‌شدن بحث مکانیک شکست هدایت شده است. این مبحث به کمی‌کردن روابط بین خواص مواد، سطح تنش، حضور ترک‌های ریز که تولیدکننده ترک هستند و مکانیزم‌های انتشار ترک منجر شده است. امروزه مهندسان طراح برای پیش‌بینی و سپس جلوگیری از انهدام‌های ساختاری بهتر، مجهز شده‌اند. در ادامه برخی از اصول مکانیک شکست معرفی شده است.

تمرکز تنش

مقاومت در برابر شکست یک ماده جامد تابعی است از نیروهای چسبندگی موجود بین اتم‌های آن ماده. بر این اساس استحکام چسبندگی تئوری یک جامد پلاستیک ترد، حدود یک‌دهم مدول الاستیسیته تقریب زده شده است. اما مشاهدات تجربی نشان داده است که مقاومت شکست بیشتر مواد مهندسی معمولاً بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ مرتبه پایین‌تر از مقدار تئوری

آنهاست. در دهه ۱۹۲۰ دانشمندی به نام گریفیث بیان داشت که اختلاف بین مقدار تئوری و مقدار تجربی می تواند به علت وجود ضعف‌ها و ترک‌های بسیار ریز و میکروسکوپی باشد که همیشه در شرایط معمولی در سطح اجسام و نیز در قسمت داخلی آنها وجود دارد. این ترک‌ها باعث کاهش مقاومت در برابر شکست می‌شود. تنش اعمالی در رأس ترک متمرکز می‌شود. مقدار بزرگی تشدید تمرکز تنش، بستگی به موقعیت و هندسه ترک دارد. این پدیده در شکل زیر که پروفیل تنش در داخل سطح‌مقطعی که دارای ترک داخلی است؛ نشان داده شده است.



همانطور که مشاهده می‌شود؛ اندازه این تنش موضعی با دور شدن از نقطه رأس ترک، کاهش می یابد. در فواصل دور که اثر تنش ناچیز است؛ مقدار تنش با تنش کلی برابر است. به عبارت دیگر، بار اعمالی در سطح‌مقطع عمود بر آن توزیع می‌شود. به دلیل قابلیت تشدید تنش اعمالی، در مکان های مذکور، این ترکها را گاهی بالابرنده‌تنش می‌نامند.

با فرض بیضی‌بودن شکل ترک و عمود بودن آن بر جهت اعمال تنش؛ بیشترین تنش در انتهای ترک برابر است با:

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{1/2}$$

که σ_0 اندازه تنش کششی اعمالی نامی و ρ_t شعاع انحنا در رأس ترک و a بیانگر طول ترک واقع در سطح قطعه یا نصف طول ترک داخلی است. برای ترک‌های ریز نسبتاً بلند که شعاع انحنای کمی دارند؛ عبارت $\left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{1/2}$ خیلی بزرگ است. در چنین شرایطی معادله به شکل زیر خواهد بود:

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2\left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{1/2}$$

در این رابطه، نسبت $\frac{\sigma_m}{\sigma_0}$ به عنوان ضریب تمرکز تنش نشان (K_t)داده می‌شود که به راحتی می‌توان آن را معیاری برای میزان تشدید تنش خارجی در راس ترک دانست.

در راستای این نظریه باید گفت که تشدید تنش تنها به این ترک‌های میکروسکوپی محدود نمی‌شود. بلکه این تشدید ممکن است در ناپیوستگی‌های داخلی مانند حفره‌ها، گوشه‌های تیز و شیارهای V شکل در ساختارهای بزرگ رخ دهد.
به علاوه اثر عوامل بالابرنده تنش، در مواد ترد محسوس‌تر از مواد نرم است. برای مواد نرم، در صورت بالا رفتن مقدار تنش بیشینه از مقدار تنش تسلیم، تغییرشکل پلاستیک رخ می‌دهد و این پدیده باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش در مجاورت عوامل بالابرنده تنش و به‌وجودآمدن بیشینه ضریب تمرکزتنش به مقدار کمتر از مقدار تئوری آن می‌شود. اما در قطعات ترد چنین پدیده‌ای اتفاق نمی‌افتد و لذا تمرکز تنش تئوری به وجود خواهد آمد.
با استفاده از اصول مکانیک شکست می‌توان نشان داد که مقدار تنش بحرانی مورد نیاز برای انتشار ترک در مواد ترد به صورت زیر است:

$$\sigma_C = \left(\frac{2E\gamma_S}{\pi a}\right)^{1/2}$$

تمامی مواد ترد شامل تعدادی ترک‌های ریز هستند که اندازه، شکل و جهت آنها با یکدیگر متفاوت است. هنگامی که مقدار تنش کششی در نوک از این ترک‌های مویی از مقدار تنش بحرانی تجاوز نماید؛ ترک می‌تواند اشاعه یابد و نهایتاً منجر به شکست ماده می‌شود. استحکام شکست قطعات فلزی و سرامیکی بسیار کوچک و فاقد عیب، نزدیک به استحکام شکست تئوری آنهاست.

چقرمگی شکست

علاوه بر استفاده از اصول مکانیک شکست، رابطه زیر برای ارتباط‌دادن تنش‌بحرانی اشاعه ترک و طول ترک به کار می‌رود:

$$K_C = Y\sigma_C\sqrt{\pi a}$$

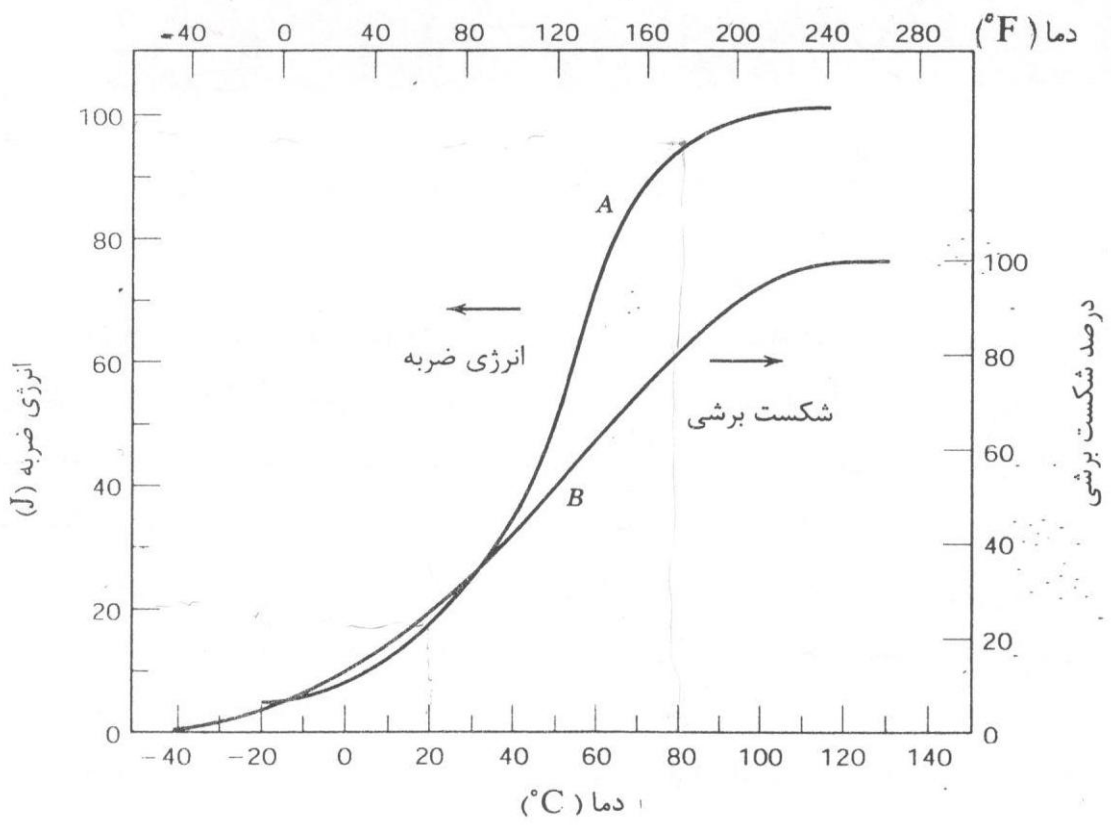
در این رابطه چقرمگی شکست نام دارد که میزان مقاومت ماده را به شکست ترد در حضور یک ترک نشان می‌دهد. واحدهای معمول برای چقرمگی شکست $MPa\sqrt{m}$ یا $Psi\sqrt{in}$ است. به علاوه Y یک پارامتر بدون بعد بوده و تابع طول ترک، اندازه و هندسه نمونه و همچنین وضعیت اعمال نیرو است.
مواد ترد که تغییر شکل پلاستیک محسوس آنها در هنگام پیشروی ترک غیرممکن است؛ مقدار چقرمگی‌شکست کمتری دارند و در نتیجه نسبت به انهدام‌های وحشتناک آسیب‌پذیرتر هستند.
مکانیک شکست به ویژه در پیش‌گویی انهدام شدید در موادی که نرمی متوسطی دارند؛ استفاده دارد. مقادیر چقرمگی شکست برای برخی از مواد در جدول زیر آمده است.

ماده	استحکام تسلیم (MPa)	چقرمگی شکست $(MPa\sqrt{m})$
فولاد آلیاژی ۴۳۴۰ تمپر شده در $260°C$	۱۶۴۰	۵۰
فولاد آلیاژی ۴۳۴۰ تمپر شده در $425°C$	۱۴۲۰	۸۷/۴
آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵–$T651$	۴۹۵	۲۴
آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴–$T3$	۳۴۵	۴۴
بتن	–	۰/۲–۱/۴
آلومینا	–	۲/۷–۵
پلی‌کربنات	۶۲/۱	۲/۲

مهمترین عوامل مؤثر بر چقرمگی‌شکست عبارتند از: دما، نرخ کرنش و ریزساختار. هرچه دما کاهش یابد و نرخ کرنش افزایش یابد؛ چقرمگی‌شکست کاهش می‌یابد. همچنین افزایش استحکام تسلیم حاصل از محلول‌جامد یا کرنش‌سختی باعث کاهش چقرمگی‌شکست است. کاهش اندازه‌دانه معمولاً منجر به افزایش چقرمگی‌شکست می‌شود.
در هنگام طراحی‌های مهندسی با توجه به جنس‌قطعه مقدار چقرمگی‌شکست مشخص شده و ضمن انجام آزمایش‌های غیرمخرب، می توان اندازه ترک‌ها را نیز به دست آورد. بر این اساس و به کمک معادله به‌دست‌آمده می توان مقدار تنش بحرانی و به تبع آن مقدار مجاز تنش طراحی را تعیین نمود.

تبدیل شکست نرم به ترد:

مشاهدات تجربی نشان داده است که در بسیاری از مواقع شکست قطعاتی که اساساً نرم محسوب می‌شدند؛ به صورت ترد رخ داده است. بررسی‌های بیشتر در این زمینه توسط پژوهشگران نشان داد که با کاهش دما برای بسیاری از مواد انتقال از حالت نرم به ترد رخ می‌دهد. حالت انتقالی از نرم به ترد، به دما و انرژی جذب شده بستگی دارد. در واقع انرژی جذب شده همواره با کاهش دما کاهش می‌یابد. اما در برخی مواد در یک محدوده معین دمایی، افت شدیدی در مقدار انرژی جذب شده نسبت به سایر محدوده‌ها مشاهده می‌شود. به این محدوده دما، محدوده دمای تبدیل شکست نرم به ترد می‌گویند.



ظاهر شکست نشانگر طبیعت شکست است و ممکن است در تعیین دمای تبدیل استفاده شود. برای شکست نرم این سطح دندانه‌ای یا تیره است و برعکس، برای سطوح شکست ترد، بافت دانه‌ای و براق دارد. در طی انتقال نرم به ترد هر دو نوع سطح مشاهده می‌شود.

برای جلوگیری از انهدام موادی که دارای رفتار نرم و ترد هستند؛ باید آنها را در دمای بالاتر از دمای تبدیل استفاده نمود. مثال کلاسیک این نوع شکست، انهدام کشتی‌هایی بود که در زمان جنگ‌جهانی دوم، قطعات آنها توسط جوش به هم متصل شده بود. این کشتی‌ها دور از محدوده جنگ، ناگهان و به طور وحشتناکی، از وسط به دو نیم شدند. این پدیده از آنجا ناشی شده بود که مخازن کشتی در دمای اتاق تست شده بودند و دارای استحکام کششی کافی بودند؛ اما در دماهای پایین و در حدود $4°C$، درحوالی دمای تبدیل آلیاژ، شکست ترد رخ داده بود.

تمام فلزات رفتار نرم به ترد از خود نشان نمی‌دهند. فلزاتی که ساختار آنها FCC است شامل آلومینیوم و آلیاژهای پایه‌مس حتی در دماهای خیلی پایین نرم هستند. ولی آلیاژهای با ساختار BCC و HCP این حالت انتقالی را از خود نشان می‌دهند. برای چنین موادی دمای تبدیل، هم به ترکیب آلیاژ و هم به ریز ساختار وابسته است. برای مثال با کاهش میانگین اندازه‌دانه برای فولاد می‌توان دمای تبدیل را پایین آورد. در نتیجه، می‌توان با کنترل و بهبود اندازه‌دانه، هم استحکام و هم چقرمگی‌شکست فولاد را افزایش داد. از طرف دیگر، افزایش مقدار کربن در فولاد، درحالی‌که استحکام آن را افزایش می‌دهد؛ منجر به افزایش دمای انتقال فولاد می‌شود.

نباید فراموش کرد که انتقال نرم به ترد، برای بیشتر سرامیک‌ها و پلیمرها نیز رخ می‌دهد. این پدیده برای مواد سرامیکی معمولاً در دماهای بالاتر از $1000°C$ رخ می‌دهد.

گفتار هفتم:

خستگی

خستگی نوعی از شکست است که در سازه‌هایی که در معرض تنش‌های دینامیکی یا نوسانی قرار می‌گیرد؛ رخ می‌دهد. معمولاً اغلب پل‌ها و قطعات خودرو و هواپیما در معرض شکست خستگی هستند. شکست خستگی در تنشی خیلی کمتر از استحکام کششی یا حتی تنش تسلیم رخ می‌دهد. شکست خستگی حتی در مواد نرم هم به صورت ترد بوده و درنتیجه ناگهانی و غیرمترقبه است.

واژه «خستگی» به این دلیل استفاده می‌شود که این نوع شکست، معمولاً پس از مدت زمان طولانی از سیکل تنش‌کرنش تکراری رخ می‌دهد. حدود ۹۰٪ فلزات، پلیمرها و سرامیک‌ها برای شکست خستگی مستعد هستند.

تنش‌های سیکلی:

تنش اعمالی ممکن است محوری (کششی یا فشاری)، خمشی یا پیچشی باشد. عموماً منحنی تغییرات تنش‌سیکلی–زمان به سه صورت مشاهده می‌شود:

- سیکل تنش معکوس (منظم و سینوسی نسبت به زمان. تنش بیشینه و کمینه نسبت به محور تنش صفر تقارن دارد)
- سیکل تنش تکرار شده (تنش بیشینه و کمینه نسبت به محور تنش صفر تقارن ندارد)
- سیکل تنش نامنظم

تعاریف زیر در این حوزه استفاده می‌شود:

تنش متوسط:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{min} + \sigma_{max}}{2}$$

محدوده تغییرات تنش:

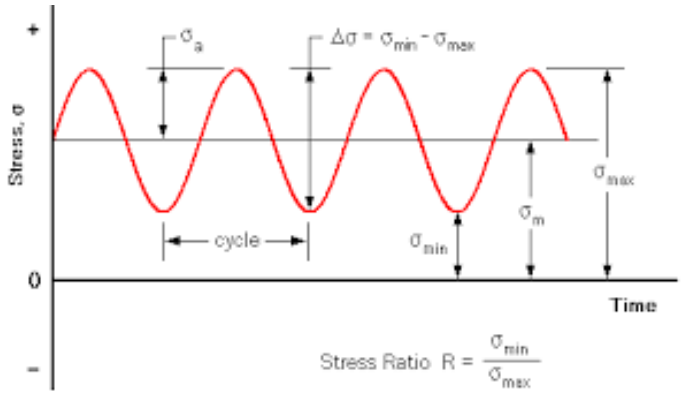
$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

دامنه تنش:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

نسبت تنش:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$



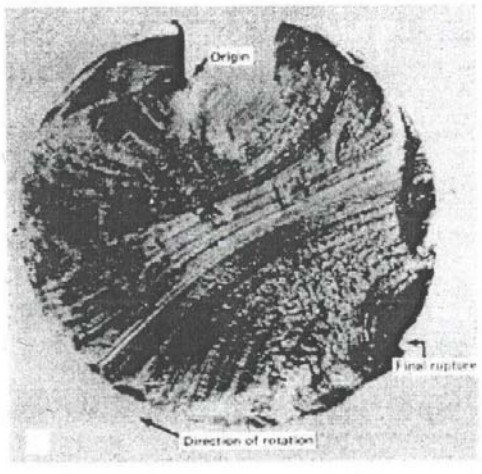
سازوکار فرآیند خستگی:

مکانیزم این نوع شکست به صورت جوانه‌زنی و رشد ترک است. سطح شکست عمود بر جهت تنش اعمالی است. سه مرحله برای فرآیند خستگی به ترتیب رخ می‌دهد:

- جوانه‌زنی ترک: در برخی از مواضع تمرکز تنش، ترک‌های بسیار ریز شکل می‌گیرند.
- رشد ترک: در هر سیکل تنش، ترک مقداری رشد می‌کند.
- شکست نهایی: طول ترک به مقدار بحرانی می‌رسد و شکست ناگهانی اتفاق می‌افتد.

ترک‌های خستگی معمولاً از سطح قطعه و در نقاط تمرکز تنش از جمله خط و خراش، گوشه‌های تیز، شیارها و فرورفتگی‌ها و ... ایجاد می‌شوند.

سطح شکست ناشی از خستگی معمولاً شامل خطوطی به شکل خطوط ساحلی است که وجود فرآیند خستگی را تأیید می‌کند.

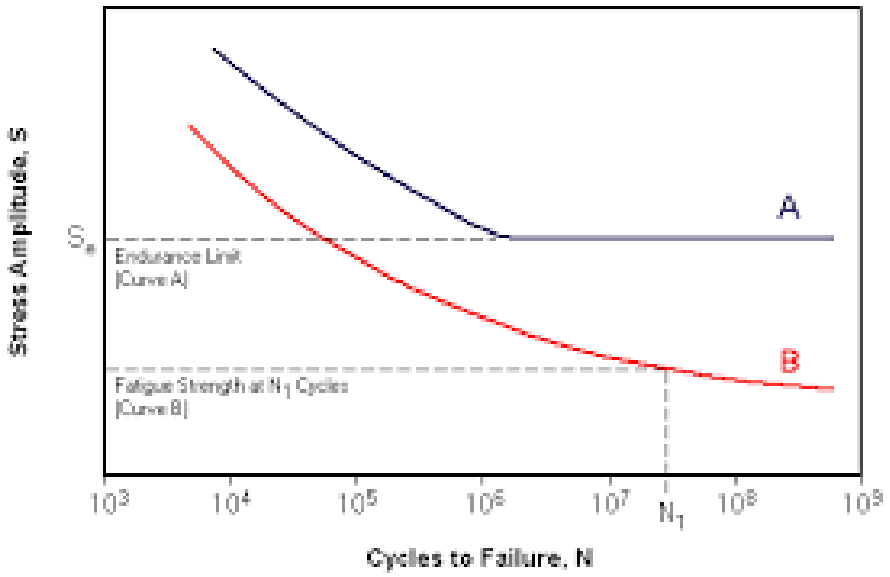


حد خستگی / استحکام خستگی:

همانند سایر خصوصیات مکانیکی، خواص خستگی مواد از آزمایشات شبیه‌سازی تعیین می‌گردد. در این آزمایشات نمونه‌هایی تحت سیکل تنش با دامنه تنش در حدود دو سوم استحکام کششی استاتیک تا مقادیری کمتر قرار گرفته و تعداد سیکل‌ها تا شکست اندازه‌گیری می‌شود. نتایج به دست آمده به صورت تنش (S) بر حسب لگاریتم تعداد سیکل‌ها تا شکست (N) رسم می‌شود. به طور کلی هرچه مقدار تنش بیشتر باشد؛ تعداد سیکل‌ها تا شکست قطعه کمتر است.

دو نوع منحنی S_N مشاهده می‌شود:

- شامل حد خستگی: برای برخی آلیاژهای پایه آهن و آلیاژهای تیتانیوم، منحنی در تنش‌های کمتر افقی شده و در واقع تنش حدی‌ای وجود دارد که در تنش‌های کمتر از آن انهدام خستگی رخ نمی‌دهد. برای بسیاری از فولادها، محدوده حد خستگی، ٪۶۰-۳۵ استحکام کششی است.
- بدون حد خستگی: برای بیشتر آلیاژهای غیرآهنی نظیر آلومینیوم، مس و منیزیم، حد خستگی وجود ندارد. برای این‌گونه مواد معمولاً مقدار تنشی را که قطعه می‌تواند $۱۰^۷$ سیکل را تحمل کند؛ به عنوان استحکام خستگی در نظر می‌گیرند.



عمر خستگی:

تعداد سیکل‌ها تا شکست در یک تنش معین عمر خستگی نامیده می‌شود. این مفهوم را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود.

- خستگی کم‌چرخه: به همراه بارهای نسبتاً زیاد. در هر سیکل علاوه بر کرنش الاستیک، کرنش پلاستیک نیز وجود دارد. در تعداد سیکل‌های کمتر از $۱۰^۵$ سیکل شکست رخ می‌دهد. عمر خستگی نسبتاً کوتاه است.
- خستگی پرچرخه: برای تنش‌های پایین. تغییرشکل کاملاً الاستیک است. تعداد سیکل لازم برای شکست بیش از $۱۰^۵$ است. عمر خستگی زیاد است.

عوامل مؤثر بر عمر خستگی:

- مقدار تنش متوسط: افزایش تنش متوسط باعث کاهش عمر خستگی می‌شود.
- طراحی هندسی: شیارها، ناپیوستگی هندسی، شکاف‌ها، سوراخ‌ها تغییر مقطع ناگهانی و گوشه‌های تیز منجر به تمرکز تنش و جوانه‌زنی ترک شده و عمر خستگی را کاهش می‌دهد. هرچه ناپیوستگی‌ها، شعاع انحنای کمتر داشته و در واقع تیزتر باشند؛ تمرکز تنش بیشتر است.
- شرایط سطح قطعه: عمر خستگی به شرایط سطحی قطعه به شدت وابسته است چرا که در بسیاری از بارگذاری‌ها، تنش بیشینه روی سطح قطعه ایجاد می‌شود. خط و خش ناشی از عملیات ماشین‌کاری می‌تواند منجر به کاهش عمر خستگی گردد. پولیش کردن سطح می‌تواند مانع از رخداد چنین پدیده‌ای شود. همچنین ایجاد تنش پسماند فشاری (معمولاً به روش ساچمه‌زنی) روی لایه نازکی از سطح می‌تواند تنش‌های کششی وارد به قطعه را خنثی کرده و باعث کاهش احتمال ایجاد ترک گردد. افزایش سختی سطحی نیز می‌تواند منجر به افزایش عمر خستگی گردد. این کار برای فولادها توسط روش‌های عملیات‌حرارتی از جمله کربوره‌کردن انجام می‌شود.
- عوامل محیطی: عوامل خورنده می‌توانند منجر به خستگی خوردگی شوند.

گفتار هشتم:

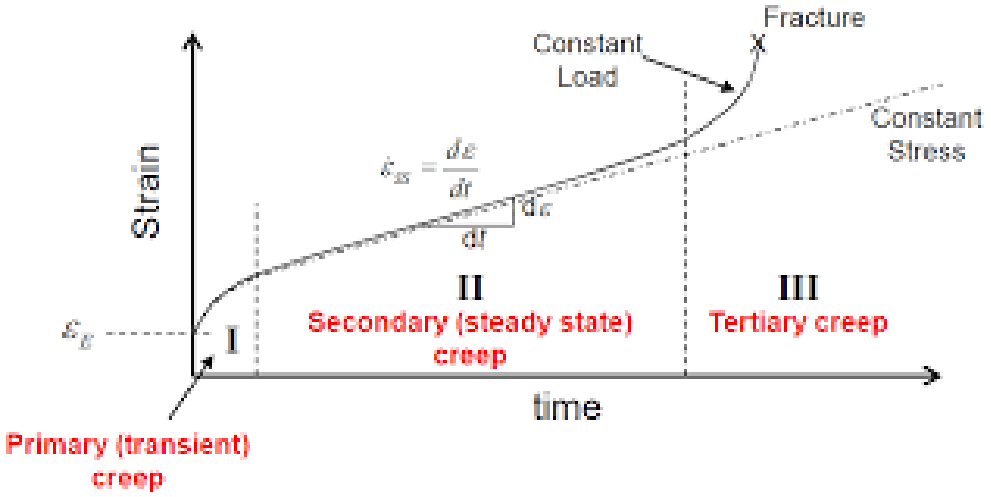
خزش

تغییرشکل دائمی در زمان طولانی، در تنش‌های ثابت استاتیکی کمتر از حد تسلیم ولی در دماهای بالا (بالاتر از ۰/۴ دمای ذوب هر ماده) خزش نامیده می‌شود. این نوع تغییرشکل عمدتاً در قطعاتی که در کاربردهای دمابالا نظیر پره‌های توربین در موتور جت، ژنراتورهای بخار، خطوط بخار فشار قوی و ... هستند؛ رخ می‌دهد. فرجام پدیده خزش، شکست خزشی است که معمولاً پدیده‌ای نامطلوب است.

عمر خزشی:

برای تعیین عمر خزشی یک قطعه از آزمون خزش استفاده می‌شود. بدین‌صورت که قطعه در دمای ثابت تحت تنش ثابت قرار گرفته و کرنش اندازه‌گیری شده و نسبت به زمان رسم می‌شود. در اثر اعمال بار ابتدا تغییر شکل ناگهانی رخ می‌دهد که معمولاً الاستیک بوده و ارتباطی به خزش ندارد. اما پس از آن با گذشت زمان کرنش خزشی آغاز می‌شود که شامل سه مرحله است:

- خزش گذرا (اولیه): در این مرحله نرخ کرنش با افزایش زمان کم می‌شود. به عبارتی شیب منحنی با زمان کاهش می‌یابد. یعنی مقاومت ماده افزایش یافته و قطعه کارسخت می‌شود.
- خزش پایدار (ثانویه): در این مرحله نرخ خزش (شیب نمودار) ثابت است چرا که بین کارسختی از سویی و بازیابی از سوی دیگر تعادل برقرار است. این مرحله از خزش معمولاً طولانی‌ترین زمان را داراست و به همین دلیل نرخ خزش در این مرحله عامل تعیین‌کننده‌ای در تعیین عمر خزشی قطعه خواهد بود.
- خزش نهایی (ثالثیه): در این مرحله نرخ خزش افزایش یافته و منجر به گسیختگی می‌شود. در این مرحله جدایش مرزدانه‌ای، شکل‌گیری ترک‌ها، حفره‌ها و سوراخ‌های داخلی و گلویی‌شدن در مجاورت منطقه تغییر شکل باعث کاهش سطح مقطع و در نتیجه افزایش نرخ کرنش می‌شود.



عوامل مؤثر بر عمر خزشی:

- نقطه ذوب: هرچه بیشتر باشد، عمر خزشی بیشتر است.
- مدول الاستیسیته: هرچه بیشتر باشد، عمر خزشی بیشتر است.
- اندازه دانه: هرچه بیشتر باشد، به دلیل کاهش میزان مرز دانه‌ها و در نتیجه کاهش لغزش مرزدانه‌ای، عمر خزشی بیشتر می‌شود.
- دمای محیط: با افزایش دما عمر خزشی مواد کاهش می‌یابد.
- تنش اعمالی: با افزایش تنش اعمالی عمر خزشی مواد کاهش می‌یابد.

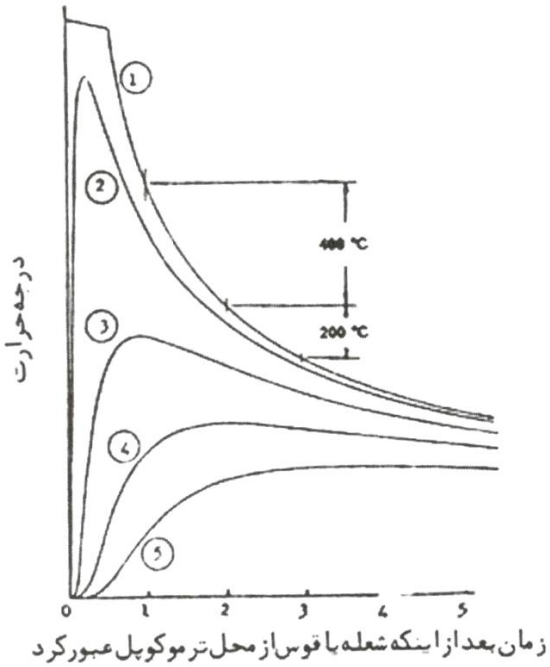
گفتار نهم:

توزیع حرارت

در فرآیندهای جوشکاری ذوبی، به منظور ذوب‌کردن موضع اتصال و الکترود از منابع حرارتی مختلف نظیر قوس الکتریکی، شعله، مقاومت الکتریکی، اشعه لیزر و ... استفاده می‌شود. در بیشتر روش‌های جوشکاری حالت جامد نیز حرارت به صورت مجزا یا در حین فرآیند به وجود می‌آید و منطقه جوش و حوالی آن را گرم می‌کند. از طرفی به دلیل هدایت‌حرارتی، به عنوان یکی از خواص مواد به ویژه آلیاژهای فلزی، بخشی از حرارت جوشکاری به مناطق اطراف منتقل می‌شود و می‌تواند موجب تأثیراتی همچون تلفات انرژی، ایجاد تنش و پیچیدگی، تغییرات متالورژیکی و ... گردد.
مطالعه در زمینه چرخه گرمایی و تأثیرات آن گاهی تجربی است و گاه با حل معادلات انتقال‌حرارت می‌توان پیش‌بینی‌هایی انجام داد.

چرخه گرمایی

بر اساس شکل زیر، نمودار تغییرات دما نسبت به زمان در نقاط مختلف پیرامون خط‌جوش شامل قسمت‌های زیر است:



- نرخ گرم‌شدن: عوامل مؤثر بر این فاکتور عبارتند از: فاصله تا منبع حرارتی، طبیعت منبع حرارتی، شدت تمرکز حرارت و بازده انتقال حرارت از منبع حرارتی به موضع اتصال. نرخ گرم شدن در روش‌های جوشکاری پلاسما، الکترود دستی و اکسی استیلن به ترتیب کاهش می‌یابد.
- دمای بیشینه: این عامل تحت تأثیر نرخ حرارت داده‌شده و تلف شده قرار دارد. تا هنگامیکه نرخ حرارت داده‌شده بیشتر از حرارت تلف‌شده باشد؛ دمای موضع اتصال افزایش می‌یابد و به مقدار بیشینه می‌رسد. در نتیجه برای رسیدن به دمای ذوب، منبع حرارتی باید حرارتی بیشتر از میزان تلف‌شده توسط هدایت، جابجایی و یا تشعشع تولید کند. از این روست که برای جوشکاری فلزاتی با اتلاف حرارتی بالا، نظیر مس و آلومینیوم، نیاز به منبع حرارتی قوی‌تر و با تمرکز حرارتی بیشتر و حتی در مواردی پیش‌گرم‌کردن است.

معادله معروف آدامز برای تعیین بیشینه‌دما در نقطه‌ای خاص، تعیین وسعت منطقه متأثر از حرارت و تأثیر پیش‌گرم به کار می‌رود:

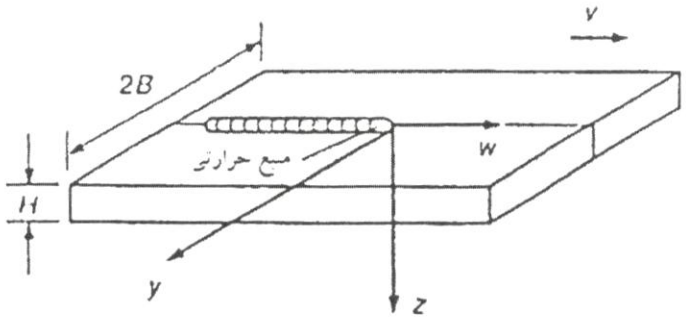
$$\frac{1}{T_P - T_0} = \frac{4.13\rho C_P t y}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

در این رابطه T_P بیشینه‌دمای موضع موردنظر، T_0 دمای اولیه، T_m دمای ذوب، y فاصله نسبت به خط‌ذوب بر حسب میلیمتر، ρ چگالی ماده بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، C_P گرمای‌ویژه بر حسب ژول‌برگرم‌برسانتیگراد، t ضخامت بر حسب میلیمتر و H_{net} حرارت داده‌شده بر حسب ژول بر ثانیه بر میلیمتر است.

مقدار حرارت داده شده را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$H_{net} = \eta \frac{E.I}{v}$$

که در این رابطه E ولتاژ بر حسب ولت، I شدت جریان بر حسب آمپر، v سرعت جوشکاری بر حسب mm/min و η کمیت بدون بعد نشانگر بازده فرآیند یا بازده منبع حرارتی است.



- زمان توقف در دمای بیشینه یا در یک ردیف‌حرارتی خاص: زمان توقف در هر دما خطوط هم‌دمای توزیع حرارت را تعیین می‌کند. به‌طورکلی هرچه نرخ حرارت‌دادن و سردشدن بیشتر باشد و یا نقاط به منبع‌حرارتی نزدیکتر باشند؛ منحنی‌های توزیع دما فشرده‌تر می‌شوند. هنگامیکه، مشابه جوش مقاومتی، منبع حرارتی نقطه‌ای و ساکن باشد؛ خطوط هم‌دما به صورت دایره‌های متحدالمرکز و وقتی که منبع در حال حرکت باشد به شکل بیضی، سهمی و در نهایت دوکی دیده می‌شود.

- سرعت سردشدن: این عامل بسته به مکان متفاوت است. ساده‌ترین معادلات مربوط به محاسبه سرعت سردشدن در مرکز جوش هستند. در معادلات پیش رو، ضریب انبساط حرارتی و گرمای‌ویژه ثابت در نظر گرفته شده و همچنین ابعاد صفحه بینهایت و منبع حرارتی نقطه‌ای فرض شده است.

برای ورق ضخیم:
$$R = \frac{2\pi\lambda(T_C - T_0)^2}{H_{net}}$$

برای ورق نازک:
$$R = \frac{2\pi\lambda\rho C_P t^2 (T_C - T_0)^3}{(H_{net})^2}$$

در این روابط R سرعت سرد شدن بر حسب $°C/sec$ و λ هدایت‌حرارتی بر حسب $J/mm.sec.°C$ است.

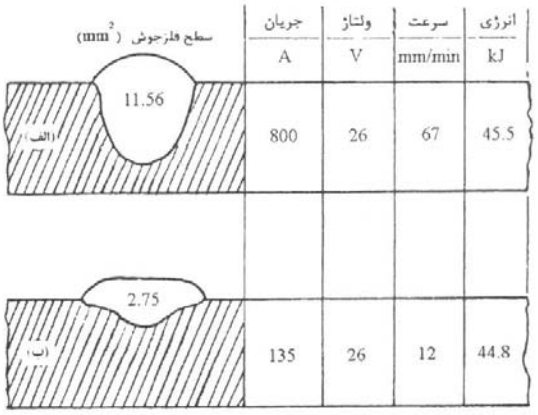
به منظور تعیین نازک یا ضخیم بودن ورق از کمیت بدون بعد φ استفاده می‌شود. اگر مقدار این کمیت از ۰/۷۵ بیشتر باشد ورق ضخیم و در غیر این صورت نازک در نظر گرفته می‌شود.

$$\varphi = t\sqrt{\frac{\rho C_P (T_C - T_0)}{H_{net}}}$$

- نقطه پایانی سیکل: نقطه نهایی سیکل گرم و سرد شدن، ضرورتاً دمای محیط نیست و در واقع دمایی است که تعادل حرارتی بین فلز جوش، منطقه متأثر از حرارت و فلز پایه به وجود آمده باشد. اگر قطعه پیش‌گرم نشده و یا بزرگ باشد؛ این دما درجه حرارت محیط است ولی در صورتی که قطعه پیش‌گرم شده و یا کوچک باشد؛ نقطه پایانی دمای محیط نخواهد بود. هر چند در نهایت کل قطعه به دمای محیط خواهد رسید.

عوامل مؤثر بر چرخه گرمایی

- مختصات موضع مورد نظر نسبت به منبع حرارتی
- طبیعت منبع حرارتی: تفاوت پهنا و عمق ذوب در روش‌های الکترود دستی و پلاسما ناشی از همین عامل است.
- متغیرهای فرآیند

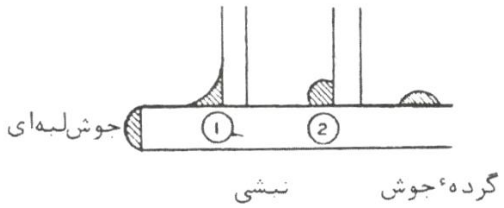


- جنس قطعه: ضریب هدایت حرارتی (k)، گرمای ویژه (c) و چگالی (ρ) عوامل مؤثر دراین قسمت هستند که در رابطه ضریب نفوذ حرارتی خودنمایی می‌کنند:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c}$$

مجموعه این عوامل تحت عنوان فروکشی حرارتی مطرح می‌گردد.

- ابعاد قطعه: در جوشکاری، برعکس ریخته‌گری، هرچه قطعه ضخیم‌تر باشد؛ سریع‌تر سرد می‌شود و انتقال حرارت از دو بعد به سه‌بعد افزایش می‌یابد. یکی از مشکلات در جوشکاری دو قطعه با ضخامت متفاوت، عدم ذوب کافی در قطعه ضخیم‌تر است که ناشی از همین عامل است. طول و عرض قطعه نیز در صورتی‌که مقادیر کمی داشته باشند؛ مشابه ضخامت تأثیرگذار خواهند بود.
- دمای قطعه و محیط: با استفاده از پیش‌گرم کردن و یا جوش چندپاسه می‌توان دمای قطعه را افزایش داد. همچنین با استفاده از مبرد و یا پشت‌بند مسی می‌توان دمای قطعه را کاهش داد. دمای محیط هنگامی‌که ۳۰-۲۰ درجه زیر صفر باشد؛ تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سیکل حرارتی دارد.
- طرح و هندسه اتصال و قطعه: به دلیل تفاوت در جهات انتقال حرارت، سرعت سرد شدن جوش نبشی حدوداً سه برابر سرعت سرد شدن جوش لبه‌ای است. انحراف جوش از مسیر وسط به سمت یکی از لبه‌ها، جوش رسوب‌داده‌شده قبلی، نگهدارنده‌ها و هرگونه قطعه اضافی دیگری که در تماس با قطعه کار باشد؛ در این خصوص تأثیرگذار است.
- شکل مقطع جوش در حجم ثابت: جوش نبشی مقعر، در مقایسه با جوش نبشی محدب، سطح تماس کمتری با قطعه کار دارد.



تأثیر چرخه گرمایی در جوشکاری

منطقه جوش را می‌توان به سه‌ناحیه فلز جوش، متأثر از حرارت و فلز پایه تقسیم‌بندی نمود و تأثیر سیکل حرارتی را بر هر یک از مناطق فوق بررسی کرد.

- فلز جوش: سیکل حرارتی بر فلز جوش و خواص آن تأثیر بسزایی دارد. مقدار ذوب موضعی، عمق و حجم ذوب، میزان رقت و ترکیب شیمیایی جوش با حرارت داده شده کنترل می‌شوند. در صورتی‌که دمای بیشینه و زمان توقف به اندازه کافی نباشد؛ عیب ذوب ناقص و در صورتی‌که دمای بیشینه و زمان توقف بیش از اندازه باشد؛ عیب ذوب اضافی ایجاد خواهد شد. همچنین، به دلیل وابستگی ترمودینامیکی و سینتیکی واکنش‌ها به دما، سیکل حرارتی در واکنش‌های سرباره، گاز و فلزمذاب نیز تأثیر دارد. نحوه انجماد، قطر دندریت‌ها و عملکرد مواد جوانه‌زا در فلز جوش، توسط سیکل‌حرارتی تعیین می‌شود. از طرفی اندازه و مورفولوژی دانه‌های ایجادشده ضمن انجماد در ساختار نهایی، به ویژه برای فولادهای دارای تحول یوتکتوئید، تأثیرگذارند. اندازه نهایی دانه‌ها و فازها در فلز جوش نیز بر خواص مکانیکی و خوردگی به طور مستقیم یا غیر مستقیم اثر دارد.
- ناحیه متأثر از حرارت (*HAZ*): به‌طورکلی تأثیرات سیکل حرارتی بر ناحیه متأثر از حرارت را می‌توان شامل موارد زیر دانست:

- ذوب ترکیبات بین‌فلزی در مرز دانه‌ها: در برخی آلیاژها، ترکیبات بین‌فلزی با نقطه‌ذوب پایین وجود دارد که اگر دمای ناحیه متأثر از حرارت از نقطه ذوب این ترکیبات بالاتر رود؛ فازهای مزبور در مرزدانه‌ها ذوب می‌شوند و غالباً با تنش‌های انبساطی و انقباضی حین سرد شدن، منجر به ترک‌های مرزدانه‌ای می‌شوند.
- رشد دانه‌ها: برخی دانه‌ای درشت با حذف دانه‌های ریز درشت‌تر می‌شوند و ناحیه درشت‌دانه را به وجود می‌آورند. دما و زمان بیشتر فرصت رشد دانه‌ها را افزایش می‌دهد. با افزایش فاصله نسبت به خط‌ذوب مشکل یادشده کاهش می‌یابد. استفاده از روش‌های با تمرکز حرارتی بیشتر، حرارت ورودی کمتر و زمان کوتاه‌تر می‌تواند جلوی ایجاد مشکل فوق را بگیرد.
- تغییرات فازی: نرخ سردشدن حین تحول یوتکتوئید در محدوده دمایی $800–500°C$ می‌تواند فازهای مختلفی نظیر فریت‌مرزدانه‌ای، فریت‌ویدمن‌اشتتن، فریت‌سوزنی، پرلیت، بینیت بالایی و پایینی، مارتنزیت، آستنیت باقیمانده و ... در ساختار به وجود آورد که بر خواص مکانیکی و خوردگی تأثیر دارند. به عنوان مثال در جوشکاری فولاد کربن متوسط، احتمال تشکیل مارتنزیت و تردی و سختی بالا در اثرسریع سرد شدن در محدوده دمایی یادشده وجود دارد. پیشگرم‌کردن، آرام‌تر سرد کردن و عملیات‌حرارتی تمپر می‌تواند مشکل فوق را برطرف سازد. این مسئله در فلز جوش نیز، پس از انجماد، می‌تواند رخ دهد.
- رسوب ناخالصی‌ها و ترکیبات بین‌فلزی: این‌گونه رسوب‌ها می‌توانند در داخل دانه‌ها و یا در مرزدانه‌ها ایجاد شوند. زمان توقف در هر دمایی می‌تواند شرایط نفوذ برخی عناصر به طرف مرزدانه‌ها یا نواحی به‌خصوصی را به منظور تجمع و ایجاد ناخالصی فراهم سازد. رسوب کاربید کروم در محدوده دمایی $870–420°C$ در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، تشکیل فاز زیگما در محدوده دمایی $930–650°C$ در فولادهای حاوی فریت دلتا، پدیده فراپیری (درشت شدن دانه‌های برخی ترکیبات خاص و کاهش خواص) در آلیاژهای پایه‌آلومینیوم نمونه‌هایی از این بحث به شمار می‌روند. استفاده از روش‌های با تمرکز حرارتی بیشتر، حرارت ورودی کمتر و زمان کوتاه‌تر می‌تواند جلوی ایجاد مشکل فوق را بگیرد.
- تبلور مجدد: در مورد برخی از فولادها و آلیاژهای آلومینیوم، به منظور بهبود خواص، عملیات ترمومکانیکال شامل عملیات مکانیکی کارسرد و عملیت حرارتی آنیل‌ناقص انجام شده است. سیکل حرارتی می‌تواند منجر به پدیده تبلورمجدد در ناحیه HAZ و افت خواص بهبودیافته در این ناحیه شود.

- فلز پایه: سیکل حرارتی جوشکاری می‌تواند باعث تغییر تنش‌های پسماند در فلز پایه شود. اگر فلز پایه قبلاً دارای تنش پسماند باشد؛ این مناطق بر اثر گرم‌شدن و احتمالاً توقف در دمای خاص، فرصت رهاشدن تنش‌های پسماند را به دست می‌آورند و مقدار این تنش‌ها کاهش می‌یابد. اما اگر قطعه قبل از جوشکاری کاملاً تنش‌گیری شده باشد؛ هنگام جوشکاری فلز جوش مایل به انبساط است ولی مناطق اطراف جلوی آن را می‌گیرد. در نتیجه ناحیه فلز جوش تحت تنش فشاری و نواحی اطراف تحت تنش کششی قرار می‌گیرد. در اثنای سرد شدن جوش، فلز جوش تمایل به انقباض دارد و مجدداً توسط مناطق پیرامون آن مهار می‌شود. بنابراین در این حالت فلز جوش تحت تنش کششی و نواحی کناری تحت تنش فشاری قرار می‌گیرد. با تکرار این فرآیند به تدریج تنش‌های پسماند در جوش و اطراف آن افزایش می‌یابد. اگر نرخ سرد شدن به ویژه در نزدیکی دمای پایانی آهسته باشد؛ این تنش‌ها فرصت بیشتری برای رهایی یا خنثی‌کردن یکدیگر خواهند داشت.

گفتار دهم:

تنش‌های پسماند

مقدمه

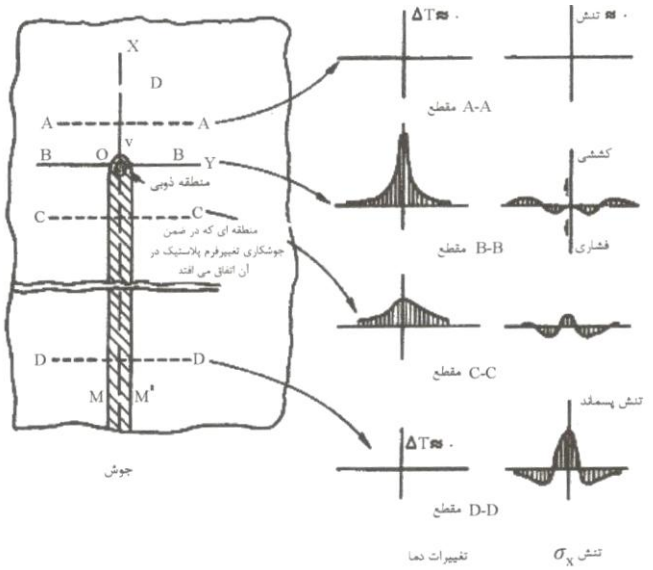
تنش پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری، به واسطه اهمیت آن و تأثیرات آن بر خواص سازه، مدت زمان طولانی مورد توجه طراحان و سازندگان قرار گرفته است. باید توجه داشت که تحلیل دقیق تنش پسماند، بسیار دشوار است؛ زیرا عوامل پیچیده‌ای وجود دارند که در شکل‌گیری تنش پسماند تأثیر می‌گذارند. برای مثال در فرآیندهای ذوبی، توزیع غیر یکنواخت دما ناشی از وجود منبع حرارتی منجر به شکل‌گیری کرنش‌های نامناسب می‌شود که این کرنش‌ها منجر به ایجاد تنش‌هایی در سازه می‌شوند که بعد از سردشدن سازه تا دمای محیط در آن باقی می‌مانند. در دیگر فرآیندهای جوشکاری همانند جوشکاری اصطکاکی‌اغتشاشی، کرنش‌های الاستیکی و پلاستیکی ناشی از تغییر فرم ماده می‌توانند منجر به ایجاد تنش‌های پسماند شوند. به‌طورکلی با تغییر نوع فرآیند جوشکاری، نوع ماده، پارامترهای جوشکاری و غیره توزیع تنش پسماند و مقدار آن تغییر می‌کند. منتها در کلیه موارد می‌توان به نکات مشترک زیر اشاره کرد:

- مقدار تنش پسماند در منطقه فلزجوش و منطقه متأثر از حرارت بیشترین مقدار است.
- حداکثر مقدار تنش پسماند به اندازه تنش تسلیم ماده جوشکاری شده است.
- تغییرات تنش پسماند در منطقه فلزجوش و منطقه متأثر از حرارت می‌تواند بسیار شدید باشد.
- مقدار تنش پسماند ممکن است تغییرات شدیدی از سطح به مغز فلز پایه داشته باشد. این مسئله به ویژه در آلیاژهایی که در حین سرد و گرم شدن تغییر حالت متالورژیکی را تجربه می‌کنند؛ مشاهده می‌شود.
- توزیع تنش پسماند در جوشکاری تک‌پاسه و چندپاسه با یکدیگر تفاوت قابل توجهی دارد.

در جوشکاری، تنش‌های پسماند، همیشه در اثر کرنش‌های الاستیک یا پلاستیک در مقیاس ماکروسکوپی یا میکروسکوپی به وجود می‌آیند. به واسطه اینکه تنش‌های پسماند بدون هرگونه بارگذاری خارجی وجود دارد؛ آنها همواره شرایط تعادل نیرو و گشتاور را ارضا می‌کنند و در شرایط خود تعادلی هستند.

شکل‌گیری تنش‌های پسماند در اثر جوشکاری

به‌طورکلی نواحی دورتر از خط‌جوش از انقباض و انبساط خط‌جوش و فلزپایه نزدیک به آن، جلوگیری می‌کند و در نتیجه پس از سردشدن نمونه جوشکاری شده تا دمای محیط تنش‌های کششی پسماند درخط‌جوش و فلز پایه مجاور آن و تنش‌های فشاری پسماند در نواحی دورتر از آنها وجود خواهند داشت. به منظور درک بهتر مسئله، تغییرات دما و تنش‌هایی که در یک جوش ساده رخ می‌دهد در شکل زیر نشان داده شده است.



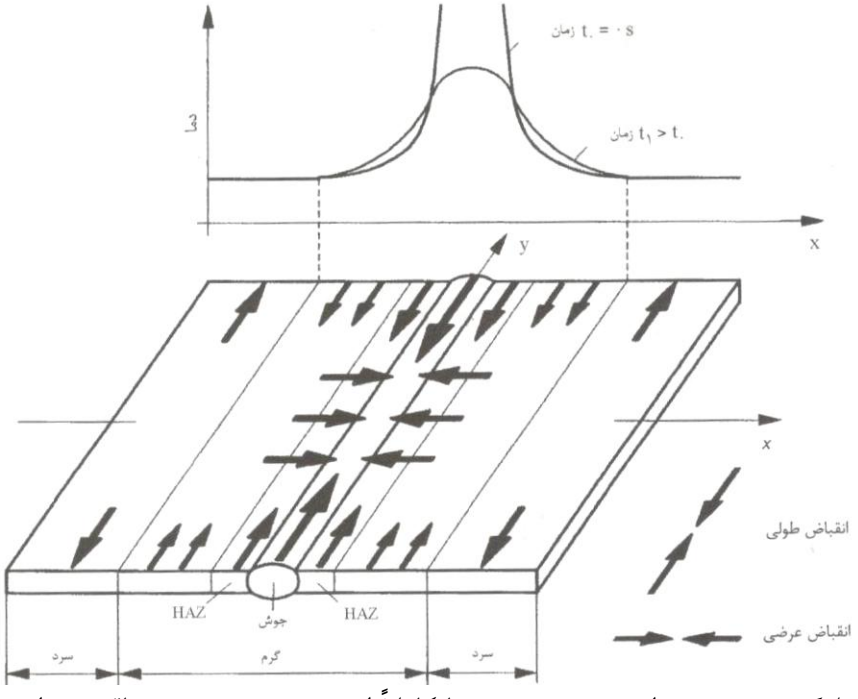
ناحیه هاشورخورده *MM* ناحیه‌ای است که در آن تغییرشکل پلاستیک رخ داده است. قسمت *AA* جلوتر از منبع حرارتی قرار دارد و هنوز به میزان زیادی تحت تأثیر حرارت ورودی قرار نگرفته است. در نتیجه در این قسمت تغییرات دمای ناشی از جوشکاری صفر خواهد بود. در امتداد *BB* که منبع حرارتی را قطع کرده است؛ توزیع دما شیب بسیار زیادی دارد. در امتداد بخش *CC* که اندکی پشت منبع حرارتی قرار دارد؛ توزیع دما شیب کمتری داشته و در امتداد *DD* که به اندازه کافی از منبع حرارتی دور است؛ کاملاً یکنواخت است. چنانچه تنش‌های ناشی از حرارت در امتداد جهت طولی را در نظر بگیریم به دلیل آنکه قسمت *AA* توسط حرارت ورودی تحت تأثیر قرار نگرفته است λ_x برابر صفر است. در امتداد بخش *BB* تنش λ_x در مناطق زیر منبع حرارتی تقریباً صفر است زیرا حوضچه جوش استحکامی ندارد که بتواند باری را تحمل کند. در مناطق کمی دورتر از منبع حرارتی تنش‌ها به دلیل آنکه انبساط این مناطق توسط فلز با دمای کمتر اطراف کنترل می‌شود؛ از نوع فشاری خواهد بود. به واسطه بالا بودن دما و استحکام تسلیم پایین ماده در این مناطق، تنش در این مناطق به اندازه استحکام تسلیم ماده در دمای مشابه هست. مقدار تنش فشاری با افزایش فاصله از جوش و یا با کاهش دما از مقدار حداکثر خود عبور می‌کند. این تنش فشاری با تنش کششی در مناطق دور از جوش متعادل می‌شود.

در امتداد بخش *CC* خط جوش و فلز پایه نزدیک آن هردو سرد می‌شود و تمایل به انقباض خواهند داشت. در نتیجه تنش‌های کششی ایجاد می‌شود و در مناطق نزدیک آنها تنش‌های فشاری به وجود می‌آید. در امتداد بخش *DD* خط جوش و نواحی نزدیک آن سرد و منقبض می‌شوند و در نتیجه تنش‌های کششی بیشتری در مناطق نزدیک جوش و تنش‌های فشاری در مناطق دورتر از جوش ایجاد می‌کند. از آنجا که بخش *DD* پشت منبع حرارتی قرار دارد؛ بنابراین توزیع تنش بعد از این منطقه تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارد و بنابراین توزیع تنش، توزیع تنش پسماند خواهد بود.

منابع تنش پسماند

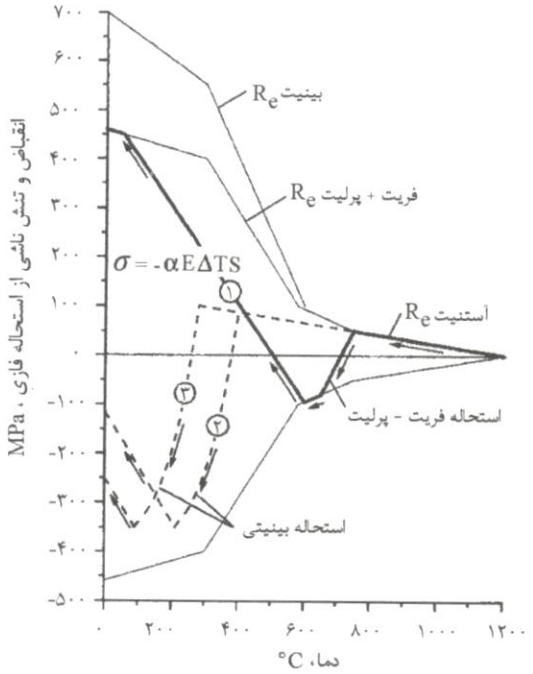
- اختلاف در انقباض نواحی مختلف گرم و سرد شده: در این حالت، بخش حرارت‌دیده، در حین سردشدن بر اساس ضریب انبساط حرارتی و گرادیان دمایی موجود، منقبض می‌شود. با فرض آنکه قسمت ذوب‌شده، هیچ نیرویی به

مناطق اطراف خود اعمال نکند؛ مناطق اطراف آن تنش‌های حرارتی و در نتیجه تنش‌های پسماند متفاوتی نشان می‌دهند. (شکل زیر)

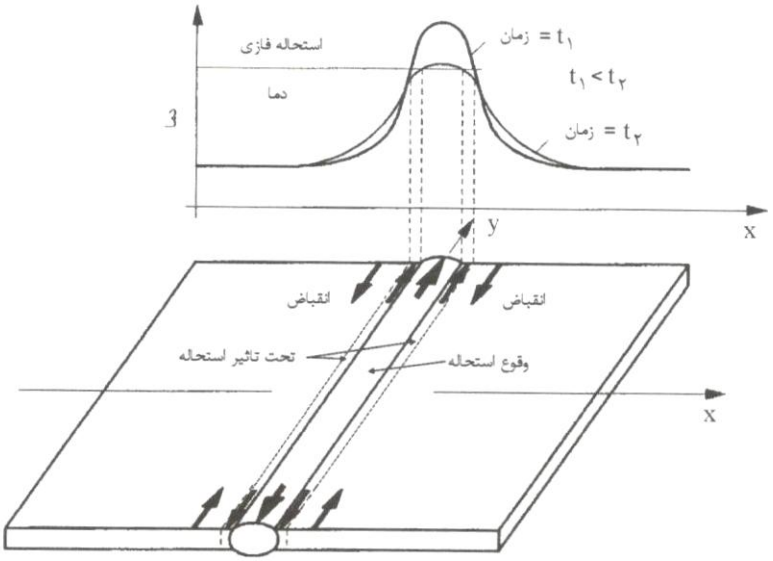


اگر از انقباض جلوگیری نشود؛ در این صورت، تنش ها کاملاً از بین می‌رود و تنشی باقی نخواهد ماند. علاوه بر تنش‌های طولی که در قطعه ایجاد می‌شود؛ تنش‌های عرضی نیز در قطعه جوشکاری‌شده ایجاد می‌شود. البته باید توجه داشت که مقدار تنش پسماند عرضی در حدود یک‌سوم مقدار تنش پسماند طولی است. از طرفی ممکن است مقدار تنش پسماند عرضی به حدود تنش تسلیم ماده نیز برسد. مثلاً در حالت جوشکاری چندپاسه این مسئله محتمل است.

- سرد شدن غیر یکنواخت در راستای ضخامت: این عامل به خصوص در ورقهای ضخیم مطرح است. در این حالت، سطح و نواحی نزدیک آن که زیاد گرم می‌شوند؛ سریع‌تر از قسمت‌های داخلی سرد می‌شوند. در نتیجه تنش‌های حرارتی در مقطع عرضی ایجاد می‌شود. اگر این تنش‌ها از میزان استحکام تسلیم ماده فراتر رود؛ منجر به تغییرشکل پلاستیک می‌شود. این تغییرشکل پلاستیک غیریکنواخت می‌تواند منجر به تنش‌های پسماند پس از سردشدن شود. اگر فرآیند دیگری اثرگذار نباشد؛ در این‌صورت تنش پسماند فشاری، در سطح و تنش پسماند کششی، در مغز قطعه ایجاد می‌گردد. در بسیاری از حالات، تنش‌های پسماند، ناشی از اختلاف سرعت سرد شدن به همراه تنش‌های پسماند ناشی از اختلاف انقباض و یا تغییر فاز است. (شکل زیر)

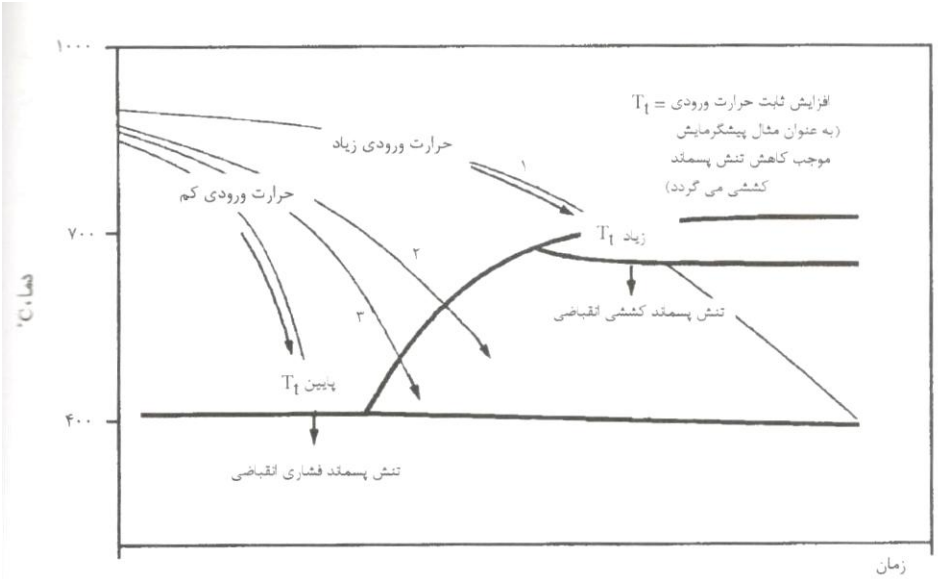


- استحاله فازی غیریکنواخت: به دلایل مختلف نظیر پیک‌دمایی متفاوت در ضمن جوشکاری، سرعت‌های سرمایش مختلف یا تغییرات موضعی در ترکیب‌شیمیایی می‌تواند رخ دهد. (شکل زیر)

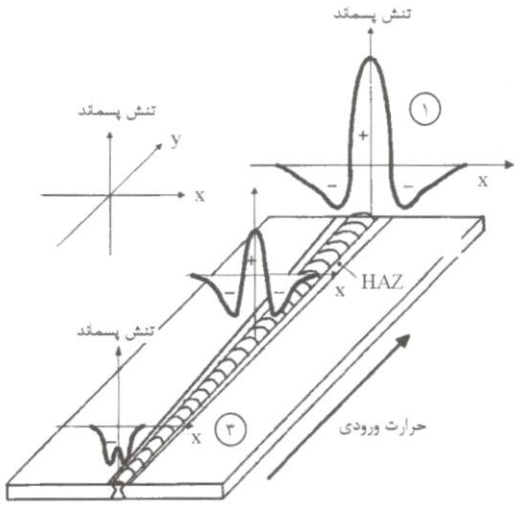


در فولادها، استحاله آستنیت به فریت، بینیت یا مارتنزیت همراه با افزایش حجم است. در نتیجه، تنش پسماند فشاری در مناطقی که با افزایش حجم همراه‌اند؛ به وجود می آید. در مناطق مجاور آن تنش پسماند کششی ایجاد می‌شود. البته باید توجه داشت که فرآیندهای انقباض و استحاله فازی با هم همپوشانی دارد و مقدار تنش پسماند ایجاد شده شدیداً به دمایی که در آن استحاله رخ می‌دهد؛ وابسته است. اگر استحاله فازی رخ دهد؛ در این صورت در اثر افزایش حجم تنش کششی کاهش می‌یابد و به فشاری تبدیل می‌شود. اگر در منطقه استحاله‌یافته ریزساختار فریتی–پرلیتی ایجاد شود؛ در این صورت حداکثر تنش فشاری محدود به استحکام تسلیم فشاری

فازهای ایجادشده می‌شود. اگر استحاله مارتنزیتی رخ دهد؛ به واسطه استحکام‌تسلیم بالا، بیشترین تنش فشاری ایجاد خواهد شد. در پایان استحاله، تنش فشاری به واسطه انقباض در اثر افت دما، کاهش پیدا می‌کند. (شکل بالای صفحه قبل) بر اساس مدول یانگ، ضریب انبساط حرارتی، گرادیان دما، اختلاف دما نسبت به دمای اتاق، تنش های پسماند فشاری و حتی کششی ایجاد می‌شود. حداکثر تنش پسماند کششی وقتی ایجاد می‌شود که استحاله در حداکثر دمای ممکن به پایان برسد. بر اساس نمودار نشان داده شده در شکل زیر مؤثرترین استحاله از نظر تولید تنش پسماند، استحاله در دماهای پایین است.



شکل زیر اثر حرارت ورودی بر پروفیل تنش پسماند ایجاد شده در جوش را نشان می‌دهد. در شرایطی که میزان حرارت ورودی پایین است؛ انقباض و استحاله‌فازی منجر به کاهش تنش پسماند کششی و حتی فشاری‌شدن آن می‌شود و در شرایطی که میزان حرارت ورودی زیاد است؛ در منطقه اطراف خط‌جوش، تنش فشاری و در خط‌جوش، پس از سرد شدن تا دمای اتاق، تنش پسماند کششی ایجاد می‌شود.



پیش‌بینی و محاسبه تنش‌های پسماند

همانطور که پیش از این نیز اشاره شد؛ بر اثر توزیع غیریکنواخت دما در قطعه جوشکاری‌شده، کرنش به طور غیرالاستیک به وجود می‌آید. یکی از راه‌های پیش‌بینی تنش‌های پسماند در نمونه‌های جوشکاری‌شده، شبیه‌سازی فرآیند در ضمن جوشکاری است. در مورد شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری و تعیین تنش پسماند، روش‌های مختلفی وجود دارد که البته بهترین روش، تحلیل هم‌زمان بخش حرارتی و مکانیکی در حل معادلات حاکم است. در روش دیگر ابتدا جریان حرارت در جوشکاری تحلیل می‌شود و سپس توزیع حرارت به‌دست‌آمده به عنوان پارامتر ورودی برای تحلیل تنش و کرنش مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه خواص‌مکانیکی و فیزیکی ماده با دما تغییر می‌کند؛ حل جداگانه بخش حرارتی و مکانیکی منجر به کاهش دقت روش اخیر در پیش‌بینی تنش پسماند می‌شود.

با توجه به اینکه بسیاری از پدیده‌ها، همانند تنش پسماند، پیچیدگی و تغییرات متالورژیکی که در ضمن عملیات جوشکاری رخ می‌دهند؛ وابسته به توزیع غیریکنواخت دما و چرخه گرم و سرد شدن در طی عملیات جوشکاری هستند؛ پیش‌بینی دقیق توزیع دما در طی فرآیند جوشکاری اهمیت بسزایی دارد.

به‌طورکلی روش‌های شبیه‌سازی فرآیندهای جوشکاری را می‌توان به دو بخش تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی کرد که روش‌های عددی خود به روش‌های تفاضل محدود، حجم محدود و المان محدود تقسیم می‌شود.

با توجه به اطلاعات مربوط به توزیع دما که از حل معادلات انتقال حرارت به دست می‌آید؛ می‌توان تنش‌ها و کرنش‌های لحظه‌ای و تنش‌های پسماند در ضمن فرآیند جوشکاری را شبیه‌سازی کرد. باید توجه داشت که محاسبه تنش و کرنش در فرآیند جوشکاری به واسطه حالات پیچیده مکانیکی و حرارتی که در داخل و اطراف فلزجوش ایجاد می‌شود؛ دشوار است. لذا در پیش‌بینی تنش‌های پسماند، معمولاً از روشهای عددی استفاده می‌شود. در روش‌های تحلیلی پیش‌بینی تنش پسماند، از روابط تجربی ساده برای تخمین تنش پسماند در قطعه جوشکاری‌شده استفاده می‌شود. اما باید توجه داشت که با توجه به مشکل در تعریف شرایط مرزی و متغیرهایی همچون نفوذ جوش و اتلاف حرارت، نتایج حاصل از این روش چندان دقیق نخواهد بود. همچنین با توجه به حرکت منبع حرارت در طول قطعه‌کار و ایجاد نواحی پلاستیک و موضعی گذرا، تعیین دقیق تنش‌های پسماند و پیچیدگی حرارتی از لحاظ نظری دشوار است. همانطور که پیش از این گفته شد؛ ماده اطراف فلزجوش که در دمای نسبتاً پایینی است؛ از انقباض آن جلوگیری می‌کند. این امر باعث ایجاد تنش‌های کششی تا حد تنش‌تسلیم ماده می‌شود. در بررسی‌های اولیه وسعت این منطقه کششی به میزان حرارت ورودی جوشکاری نسبت داده می‌شد. اما در تحقیقات بعدی مشخص شد که در نظر گرفتن یک نیروی کششی که با عکس‌العمل توزیع‌شده در تمام سازه جوشکاری‌شده متعادل می‌شود؛ توصیف مناسب‌تری از الگوی تنش پسماند را فراهم می‌کند.

تنش‌ها و کرنش‌های پسماند را می‌توان به طرق مختلف از قبیل عملیات حرارتی پس از جوشکاری، عملیات مکانیکی و یا پیش‌گرم کاهش داد. در عملیات مکانیکی تنش‌گیری، سازه مورد نظر را با باری بزرگتر از بار طراحی‌شده آن ولی کمتر از بار بحرانی، تحت بارگذاری قرار می‌دهند تا تنش‌های پسماند از طریق ایجاد کرنش‌های پلاستیکی از بین برود. عملیات پیش‌گرم در عملیات حرارتی عمدتاً به خاطر جلوگیری از ترک سرد است که معمولاً مابین دمای محیط تا ۲۲۵°C صورت می‌گیرد. یک روش بسیار علمی برای کاهش تنش‌های پسماند جوش و پیچیدگی در جوش‌ها استفاده از روشهای جلوگیری از ایجاد تنش‌های پسماند جوش است که با توجه به شرایط جوشکاری و نوع طرح اتصال در جداول استاندارد نوع تکنیک‌های کاربردی و مقادیر مربوط به آن تعیین شده است.

رفتار یک قطعه جوشکاری‌شده را می‌توان در شرایط تنش چندبعدی با استفاده از روش المان‌محدود با دقت زیادی تحلیل کرد. تنش ایجادشده در قطعه جوشکاری‌شده ناشی از تغییرشکل‌های الاستیک، پلاستیک و گرادیان حرارتی است. تانسور کرنش کل را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^t$

که در این رابطه ε^e کرنش الاستیک، ε^p کرنش پلاستیک و ε^t کرنش حرارتی است. کرنش حرارتی را می توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$\varepsilon^t = \alpha_m(T - T_0)\delta$

که در این رابطه α_m میانگین ضریب انبساط حرارتی، T_0 دمای اولیه و δ ضریب دلتای کرونیکر است.

می‌توان رابطه بالا را با قرار دادن کرنش‌هایی که از تبدیلات فازی جامد القا می‌شوند و در طی مراحل گرم و سرد شدن رخ می‌دهند؛ اصلاح کرد.

به‌طورکلی در شبیه‌سازی فرآیندهای جوشکاری می‌توان یک مقطع عرضی از قطعه جوشکاری‌شده در وسط طول آن را برای محاسبه کرنش‌ها و تنش‌های لحظه‌ای و تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری استفاده کرد. زیرا در قطعات نسبتاً طویل، بزرگترین تنش‌ها به این منطقه ایجاد می‌شود.

شرایط مرزی و اعمال آن در شبیه‌سازی فرآیندهای جوشکاری اهمیت زیادی دارد. به‌طورکلی این شرایط باید به گونه‌ای باشد که امکان انبساط عرضی قطعه جوشکاری‌شده و خمش آن وجود داشته باشد. در برخی از کارهای شبیه‌سازی از مهار قطعه جوشکاری ضخیم خودداری می‌شود و در ورق های نازک تنش را به صورت صفحه‌ای در نظر می‌گیرند و فرض می‌کنند که گرادیان تنش در ضخامت ورق ناچیز است.

گفتار یازدهم:

پیچیدگی، تاب‌برداشتن و تغییر ابعاد

از جمله مسائل مهمی که باید توسط طراح و مسئول تولید هم‌زمان مورد توجه قرار گیرد و تدابیر در مورد آن اتخاذ شود؛ پیچیدگی و تغییر ابعاد اجزای جوش داده‌شده پس از عملیات جوشکاری است. اصولاً دو روش کلی وجود دارد که می‌توان قطعه جوش داده‌شده بدون پیچیدگی با ابعاد صحیح تولید کرد:

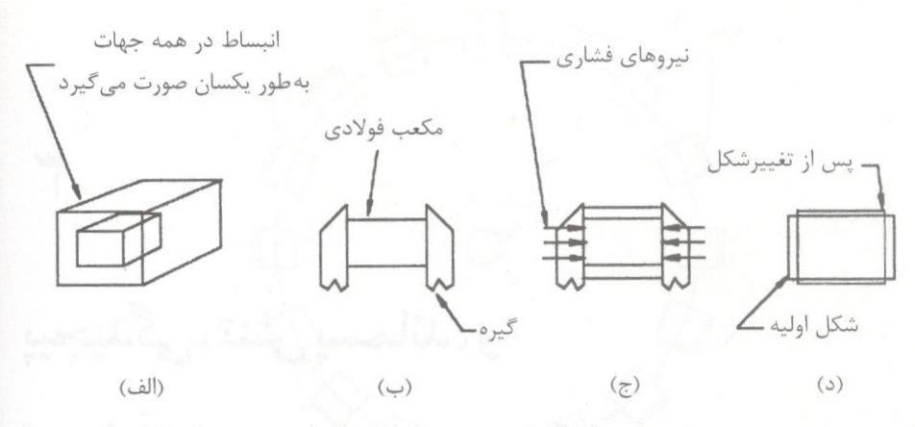
۱. در طراحی و ساخت آن تدابیری اتخاذ شود که قطعه ساخته شده نهایی بدون پیچیدگی باشد.
۲. اندازه ابعاد کمی بزرگ‌تر انتخاب شده و اجازه داده شود تا هر اندازه که می‌خواهد در ضمن عملیات جوشکاری تغییر ابعاد و پیچیدگی در آن ایجاد شود. پس از خاتمه جوشکاری عملیات خاص نظیر ماشین‌کاری، حرارت‌دادن موضعی یا پرس‌کاری برای برطرف کردن تاب برداشتن و تصحیح ابعاد انجام می‌شود.

در صنعت هر دو تدبیر یا مخلوطی از آن متناسب با تعداد کار و شدت این مشکل به کار گرفته می‌شود. در انجام موفقیت‌آمیز هر یک از دو تدبیر بالا، دانش کلی در مورد دلایل به وجود آمدن انواع پیچیدگی و تغییر ابعاد و همچنین تجربه دو شرط بسیار مهم است.

مکانیزم پیچیدگی

پیچیدگی در سازه‌های جوش‌داده‌شده، در نتیجه انبساط و انقباض غیریکنواخت، در ضمن چرخه گرم و سردشدن فرآیند جوشکاری، به‌وجود می‌آید. درضمن گرم و سردشدن قطعه جوشکاری‌شده، کرنش گرمایی یا تغییرشکل‌های حاصل از تغییر دما، در فلز اصلی و فلز جوشکاری‌شده در نزدیکی منطقه جوش به‌وجود می‌آید. تنش‌هایی که در نتیجه این تغییرشکل‌ها اتفاق می‌افتد؛ باعث به‌وجود آمدن نیروهای داخلی می‌شود که موجب پیچیدگی، تاب برداشتن و تغییر ابعاد در قطعه می‌شود. پدیده پیچیدگی را که در ضمن چرخه گرم و سرد شدن اتفاق می‌افتد؛ می‌توان با یک مثال بهتر توضیح داد: مکعب کوچکی از فولاد را در نظر بگیرید که به طور یکنواخت گرم می‌شود. در نتیجه در تمام جهات به طور یکسان منبسط می‌شود. وقتی که منبع حرارت برداشته می‌شود؛ مکعب فولادی سرد شده و به اندازه اولیه خود برمی‌گردد.حال همین مکعب بین دو دیواره صلب و ثابت قرار داده شده؛ به گونه‌ای که دیواره‌های مکعب را در برگیرد و فشار اضافه وارد نشده و تنها از افتادن قطعه جلوگیری شود. چنانچه قطعه مجدداً گرم شود؛ به واسطه ممانعت دیوار، تنها در دو جهت منبسط می‌شود. در نتیجه عکس‌العمل نیروی فشاری در قطعه به وجود خواهد آمد. هنگامی که انبساط حجمی بیشتری اتفاق افتد؛ مکعب در جهت عمودی به میزان بیشتری منبسط می‌شود. بعد از برداشتن منبع حرارتی، مکعب سرد شده؛ به دمای اتاق می‌رسد و قطعه به

طور یکنواخت در تمامی جهات منقبض می‌شود. به این ترتیب در جهت عمودی مکعب نازک‌تر و در جهت افقی مکعب ضخیم‌تر می‌شود و شکل نهایی و ثابت قطعه به دست می‌آید.



عوامل پیچیدگی

همانطور که پیش از این نیز اشاره شد، تنش‌های ایجاد شده در جوش می‌توانند منجر به ایجاد پیچیدگی در سازه شوند. به‌طور کلی، کاهش سرعت جوشکاری و افزایش تعداد مسیرهای جوشکاری، می‌توانند باعث افزایش مقدار پیچیدگی در یک جوش مشخص شود. از این رو جوشکاری به صورت خودکار و با استفاده از فرآیندهایی با شدت تمرکزحرارت بیشتر و با نرخ رسوب بالاتر که بتوان سرعت جوشکاری را افزایش داد؛ می توانند مقدار پیچیدگی را کاهش دهند.

به طور کلی مهمترین عوامل به وجود آورنده پیچیدگی‌ها عبارتند از:

۱. **حرارت داده شده:** یکی از عوامل مؤثر در ترک برداشتن است. اگر قطعه‌ای به طور یکنواخت حرارت داده و سپس آرام سرد شود و هیچ‌گونه پیچیدگی مخالف سر راه انبساط و انقباض قطعه نباشد؛ پس از چرخه حرارتی فوق هیچ‌گونه پیچیدگی در آن مشاهده نخواهد شد. واضح است که گرم و سرد شدن در اجزای مورد جوش به این صورت نیست و حرارت موضعی موجب انبساط و انقباض شده؛ تنش هایی در جوش و مناطق مجاور آن به وجود می‌آید که با تغییرشکل این مناطق تمام و یا قسمتی از تنش‌ها رها می‌شود. میزان پیچیدگی و نوع آن به مقدار حرارت داده شده و روشی که این حرارت به کار رفته، بستگی مستقیم دارد. انواع دیگر چرخه حرارتی غیر از جوشکاری، نظیر برش‌کاری و پیش‌گرم‌کردن نیز می‌تواند موجب وقوع این پدیده شود.

۲. **درجه مهار یا ممانعت:** میزان مهار به‌کاررفته برای جلوگیری از تغییرات انبساطی و انقباضی مواضع مختلف در چرخه گرم و سرد شدن ناشی از جوشکاری، عامل دیگری برای شکل‌گیری یا عدم شکل‌گیری پیچیدگی و تاب‌برداشتن است. اگر از طرق مختلف مکانیکی و ...، از رها شدن تنش‌ها توسط تغییرشکل مناطق جوش و اطراف آن، جلوگیری شود؛ این تنش‌ها در این مواضع باقی می‌مانند و در بعضی شرایط می‌توانند موجب ترک‌برداشتن جوش یا مناطق مجاور آن شوند. این مشکل در قطعات ضخیم جدی‌تر خواهد بود.

۳. **تنش‌های پسماند در قطعات و اجزای مورد جوش:** این تنش‌ها که ضمن ریخته‌گری، آهن‌گری و یا برش‌کاری در قطعه باقی مانده‌اند؛ می‌توانند توسط تنش‌های ایجادشده ناشی از جوشکاری؛ تجمیع، تشدید و یا در مواردی خنثی شود. به هر حال تنش نهایی در قطعه، ترکیبی از این تنش‌هاست. پیش‌بینی و محاسبه این تنش‌ها

بسیار مشکل و غالباً مدل‌های ریاضی زیادی در این موارد پیش‌بینی شده است؛ اما تجربه عملی کمک سریع‌تری برای خنثی‌کردن این نوع تنش‌ها می‌کند.

۴. **خواص فلز قطعه کار:** واضح است که میزان حرارت فروکشی، انتقال حرارت، ضریب انبساط حرارتی، قابلیت تغییرشکل‌پذیری، مقاومت و بعضی خواص دیگر فلز یا آلیاژ قطعه، در شرایط مساوی از نظر طرح اتصال و روش جوشکاری، تأثیر مهمی در میزان تاب دارد. برای مثال در جوشکاری قطعات مسی و آلیاژهای آن مشکل پیچیدگی و تاب‌برداشتن، به مراتب بیشتر از فولادهای معمولی است.

انواع پیچیدگی

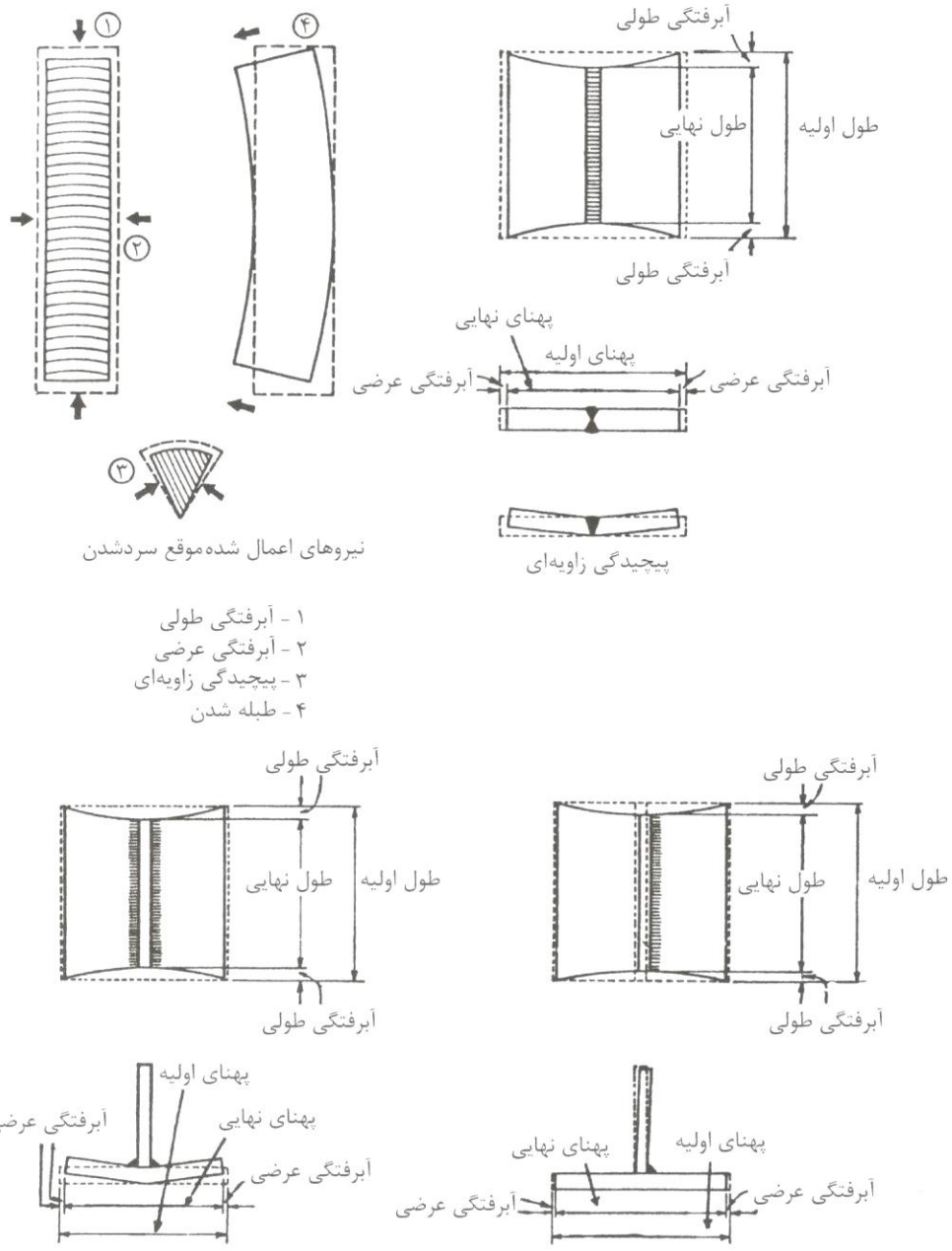
انواع مختلف پیچیدگی که در ضمن فرآیند جوشکاری ایجاد می‌شود؛ عبارتند از:

۱. **انقباض:** یکی از پیچیدگی‌هایی که در ضمن جوشکاری رخ می‌دهد؛ انقباض هم‌صفحه صفحاتی است که به یکدیگر جوشکاری می‌شوند. این انقباض‌ها هم در جهت عرضی و هم در جهت طولی اتفاق می‌افتد. نمونه‌ای از انقباض‌های عرضی و طولی، در شکل زیر نشان داده شده است.

بر اساس بررسی‌های انجام‌یافته در زمینه پیچیدگی انقباضی، مشخص شد که قسمت عمده انقباض عرضی در یک جوش لب‌به‌لب، در نتیجه انقباض فلزپایه است و انقباض فلزجوش، تنها حدود ۱۰٪ انقباض کل را شامل می‌شود. به طورکلی، پیچیدگی انقباضی وقتی که اجزای جوشکاری‌شده‌ی مهارنشده، باید به طور دقیق نصب شوند؛ اهمیت پیدا می‌کند. در صورت مهار کردن انقباض، تنش‌های کششی عرضی ایجاد می‌شوند. در محاسبه میزان انقباض، محققین مختلف، روابط متعددی را ارائه نموده‌اند که در اینجا تنها به رابطه‌ای که توسط اسپراراژن ارائه شده است؛ اشاره می‌شود. میزان انقباض عرضی در جوش لب‌به‌لب در این روش به صورت زیر ارائه شده است:

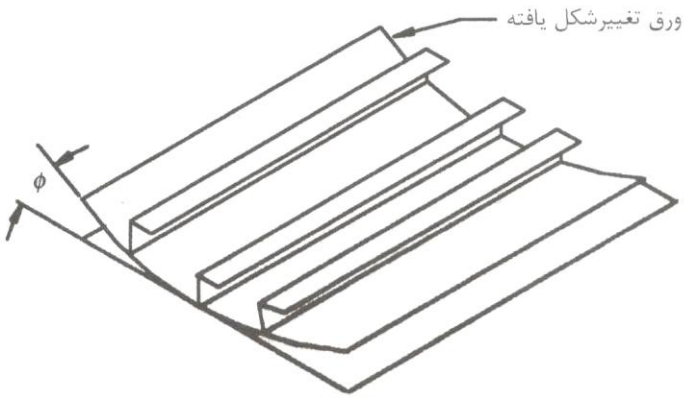
$$S = 0.2\frac{A}{t} + 0.05r$$

در این رابطه A سطح مقطع عرضی و r فاصله اولیه ریشه جوش و t ضخامت ورق است.

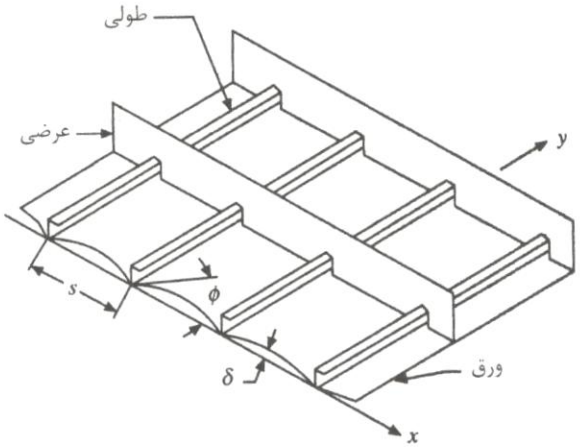


۲. **پیچیدگی زاویه‌ای:** این پیچیدگی در نتیجه جوشکاری لب‌به‌لب دو صفحه بر اثر گشتاور خمشی ایجاد شده، توسط شکل‌گیری نیروهای انقباضی غیریکنواخت در عرض ضخامت صفحه، در نواحی نزدیک خط مرکزی جوش رخ می‌دهد. پیچیدگی زاویه‌ای بر حسب هندسه اتصال می‌تواند متفاوت باشد. مثلاً در طرح اتصال لب‌به‌لب بدون پخ، به واسطه توزیع یکنواخت حرارت، پیچیدگی زاویه‌ای کمتری ایجاد می‌شود. درحالی‌که در طرح اتصال با پخ Vشکل، پیچیدگی زاویه‌ای بیشتر می‌شود. البته اتصالات با پخ X میزان پیچیدگی زاویه‌ای حداقل مقدار را دارد. در

شرایطی که چند قطعه به صورت گوشه‌ای و بدون قید و بست همانند شکل زیر به هم جوشکاری می‌شوند؛ در هر اتصال صفحه دچار خمیدگی شده یک ساختار چند ضلعی ایجاد می‌شود.



اما در صورتی که صفحه تقویت شده به کمک تعدادی نگهدارنده عرضی مهار شود؛ همانند شکل زیر ایجاد خواهد شد.

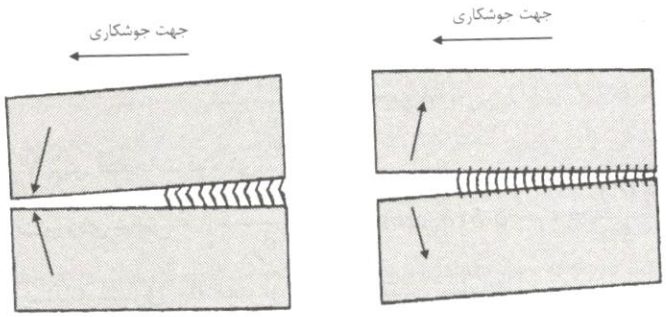


در شرایطی که اندازه جوشهای طولی مشابه باشند؛ مقدار پیچیدگی در کلیه دهانه‌ها یکسان است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\delta}{s} = \left[\frac{1}{4} - \left[\frac{x}{s} - \frac{1}{2}\right]^2\right]\varphi$$

در این رابطه δ و φ در شکل بالا نشان داده شده است.

۳. **پیچیدگی چرخشی:** اغلب در اتصالات لب‌به‌لب رخ می‌دهد. در ضمن جوشکاری دستی ورق‌های فولادی نرم از یک انتها به سمت انتهای دیگر، دو ورق تمایل دارند که به یکدیگر نزدیک شوند. ولی در جوشکاری به کمک فرآیند زیرپودری این دو ورق تمایل دارند که از یکدیگر دور شوند.



به‌طورکلی حرارت ورودی و سرعت جوشکاری پارامترهایی هستند که بر روی پیچیدگی چرخشی تأثیر می‌گذارند.

۴. **پیچیدگی خمشی:** به‌طورکلی دو عامل در ایجاد آن تأثیر دارد. یکی از این عوامل، تنش‌های پسماند فشاری است که احتمال خمش موضعی را در صفحه یا تقویت‌کننده افزایش می‌دهد. عامل دیگر، تغییرشکل زاویه‌ای در جوش‌ها است. در یک صفحه تنش‌های فشاری می‌توانند استحکام خمشی و تنش بحرانی الاستیک را برای یک ورق مستطیل‌شکل کاهش دهند. در این رابطه تنش تسلیم و تنش پسماند فشاری است. در ورق‌های نازک کاهش تنش بحرانی ممکن است بیشتر از تنش بحرانی اولیه باشد. در این صورت ورق قبل از اینکه تحت بارگذاری خارجی قرار بگیرد؛ خم می‌شود. تنش خمشی اولیه را می‌توان بر اساس رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\delta_C = \frac{2 \times 10^5 H_{net}}{bt}$$

از طرفی:

$$H_{net} = \eta \frac{E.I}{v}$$

که η ضریب کارایی قوس، E ولتاژ، I جریان جوشکاری، v سرعت جوشکاری بر حسب mm/s و t ضخامت و b عرض ورق بر حسب mm است.

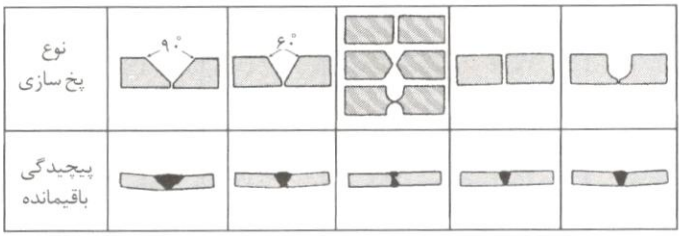
روش های کنترل و کاهش پیچیدگی

همانطور که اشاره شد؛ می‌توان تدابیری در طراحی و روش جوشکاری پیش بینی کرد تا موجب کاهش یا عدم وقوع پیچیدگی شود. به طور کلی بهتر است حتی‌الامکان از تعداد جوش کمتر و اندازه کوچک‌تر برای دستیابی به استحکام خاص استفاده شود؛ تا علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه تولید، میزان پیچیدگی و تغییر ابعاد هم کمتر می‌شود. همچنین با استفاده از بعضی قطعات آهنگری شده در برخی مواضع و یا عدم رسوب فلز جوش اضافی می‌توان تا حدودی به این هدف رسید.
نکات مهم دیگر برای نیل به هدف فوق عبارتند از:

الف) طرح اتصال

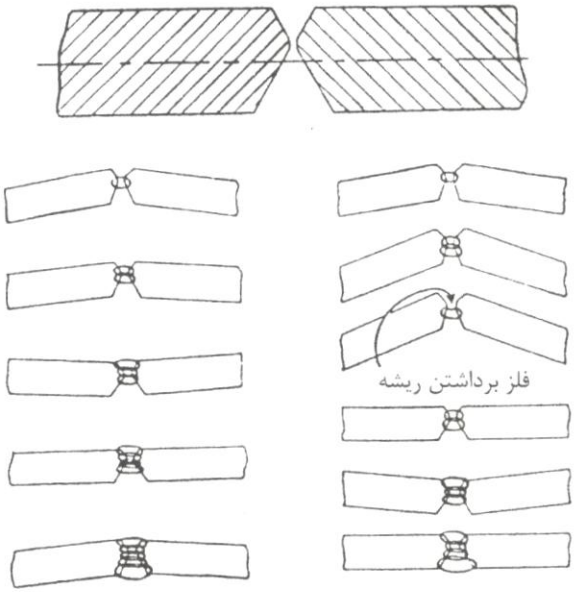
اتصالات مورد جوش باید در موقعیتی باشند که دست‌یابی به آنها به سهولت امکان‌پذیر باشد؛ تا با ایجاد جوش سالم و سریع از تمرکز حرارت اضافی، در مواضع غیرضروری، اجتناب شود. استفاده از قیدوبند و نگهدارنده و وضعیت‌دهنده‌ها می‌تواند کمکی در نیل به این هدف باشد. به‌طورکلی، مسئله پیچیدگی، با کاهش ضخامت قطعه‌کار بیشتر می‌شود.

انواع مختلف پیچیدگی در اتصالات جوش لب‌به‌لب می‌تواند اتفاق افتد که طرح آماده‌سازی لبه‌ها و روش رسوب‌دادن فلز جوش در درز اتصال در میزان این پیچیدگی‌ها مؤثر است. برای مثال، فاصله شکاف ریشه‌ای بر روی انقباض حاصل از انجماد عرضی و طرح پخ‌سازی (V یک طرفه و دوطرفه و زاویه آن) بر روی پیچیدگی زاویه‌ای تأثیر مستقیم دارد.

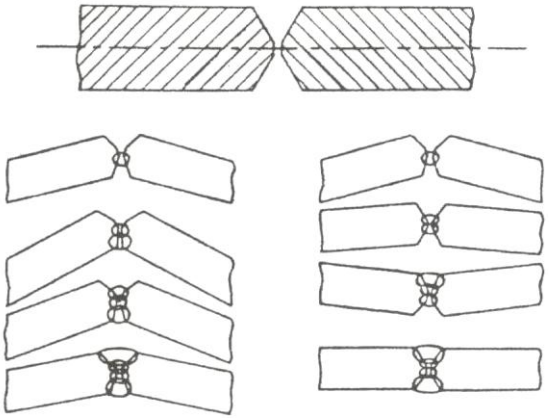


پخ‌سازی دوطرفه می‌تواند موجب بالانس حرارتی در ضمن جوشکاری برای قطعه شده و پیچیدگی زاویه‌ای را کمتر کند. در قطعات نازک کمتر از $16mm$–۱۳پخ‌سازی یک‌طرفه به‌صرفه‌تر است. شکل زیر اثر تعداد پاس‌های جوش را بر روی پیچیدگی زاویه جوش لب‌به‌لب نشان می‌دهد.

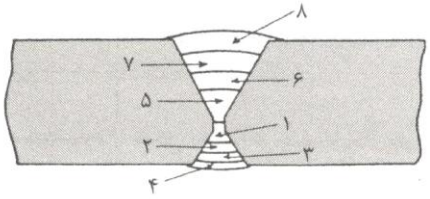
تعداد پاس	× میلی‌متر	تعداد پاس	× میلی‌متر
۱	۸	۹	۲۰٫۷
۲	۹٫۶	۱۰	۲۲٫۳
۳	۱۱٫۲	۱۱	۲۳٫۹
۴	۱۲٫۷	۱۲	۲۵٫۴
۵	۱۴٫۳	۱۳	۲۷
۶	۱۵٫۹	۱۴	۲۸٫۶
۷	۱۷٫۵	۱۵	۳۰٫۲
۸	۱۹٫۱		



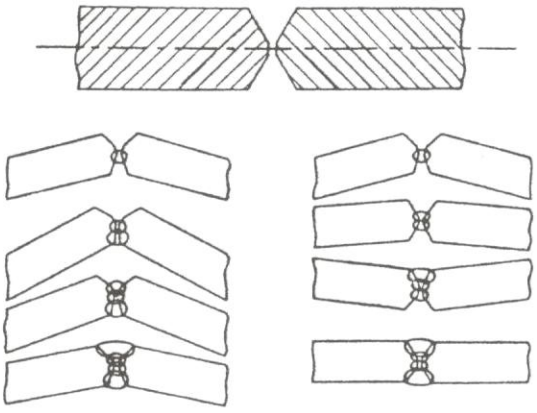
در طرح پخ دوطرفه غیرمتعادل، جوش‌دادن در شکاف بزرگتر در مرحله اول و سپس برداشتن قسمتی از اولین پاس توسط قوس یا شعله از پشت درز جوش و بالاخره جوشکاری این قسمت تعادل حرارتی لازم را به وجود می‌آورد.



اگر جوشکاری کامل یک طرف الزامی باشد؛ باید طرف دیگر دارای چنان تنش انقباضی باشد تا پیچیدگی زاویه‌ای ایجاد شده ناشی از پرکردن شکاف اولیه را جبران کند.



اما در پخ‌های دوطرفه متعادل یا مشابه، ردیف پاس‌ها و روش جوشکاری ممکن است چنان باشد تا تعادل لازم حرارتی برای اجتناب از پیچیدگی به وجود آید. شکل زیر ردیف و ترتیب صحیح و غلط در جوش لب‌به‌لب با پخ جناقی دوطرفه متعادل را نشان می‌دهد.



جوشکاری قائم و همزمان در دو طرف به کمک دو جوشکار یکی از روش‌های موفق دستیابی نفوذ کامل و غلبه بر پیچیدگی زاویه‌ای است. در جوش نبشی نیز باید حجم فلز جوش را در کمینه مقدار خود با توجه به دست‌یابی به مقاومت مورد نظر نگاه داشت.

جوش لب‌روی‌هم در بسیاری موارد به کار گرفته می‌شود. این نوع جوش با مشکلات کمتری از نظر پیچیدگی روبروست. به ویژه اگر از جوش نبشی دوبله استفاده شود. شکل زیر جوش نبشی تکی و دوبله بر روی اتصال لب‌روی‌هم را نشان می‌دهد.

این نوع اتصال در موارد مسیر طولانی با مشکل انقباض حاصل از انجماد طولی مواجه بوده ولی پیچیدگی زاویه‌ای و یا انقباض حاصل از انجماد عرضی ناچیز و جزئی است. مشکل دیگر بلند شدن لبه‌ای از لبه دیگر در اتصال لب‌روی‌هم نبشی تکی است که در شکل فوق مشهود است.

به‌طورکلی در طراحی جوش قطعه یا قطعات باید تعادل حرارتی را در حول محور خنثی قطعه به وجود آورد تا با مشکلات کمتری از نظر پیچیدگی روبرو شد.

ب) دقت ساخت

یکی دیگر از عواملی است که باید در کاهش پیچیدگی در نظر داشت. اجزای یک ترکیب یا اسکلت باید با دقت در شکل و اندازه‌های لازم بریده و تراشیده شوند. در غیر این صورت طبیعی است که پس از جوشکاری این اجزا، ترکیب دو اسکلت دارای شکل تابیده خواهد بود که حتی ابعاد آن نیز اندازه مورد نظر را ندارد و احتمالاً این مشکل با مسئله تاب‌برداشتن ناشی از جوشکاری اشتباه می‌شود. هرچند می‌تواند پیچیدگی‌های حاصل از جوشکاری را نیز تشدید کند.

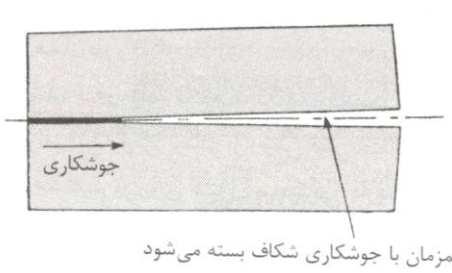
از طرف دیگر بی‌دقتی در اندازه و شکل اجزا، موجب اشکال در سوار کردن و نصب صحیح آنها می‌شود. این تنش‌ها می‌تواند با تنش‌های پسماند از چرخه حرارتی جوشکاری جمع شده؛ موجب شکست یا بروز انواع پیچیدگی در قطعه پس از رها شدن از نگهدارنده‌ها و فک‌ها شود. این بی‌دقتی حتی ممکن است موجب تغییر فاصله ریشه درز جوش در سرتاسر مسیر جوش شود و در مواقعی که این فاصله زیاد باشد؛ نیاز به رسوب فلزجوش بیشتری است که علاوه بر ازدیاد انقباض حاصل از انجماد عرضی، موجب افزایش انواع دیگر پیچیدگی نیز می‌شود. در مواضعی که فاصله ریشه درز جوش کم است؛ فقدان نفوذ جوش را سبب می‌شود که بعد از مشخص شدن در بازرسی باید منطقه مذکور را با شعله یا قوس برداشت و مجدداً فلزجوش را رسوب داد که مجموعاً موجب هزینه اضافی، افزایش حرارت موضعی و در نتیجه پیچیدگی موضعی می‌شود.

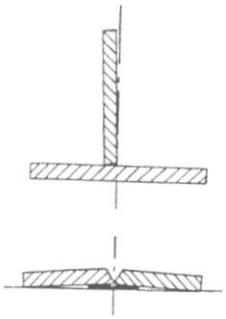
بنابراین دقت ساخت در سوار و جفت‌کردن صحیح اجزا در کنار یکدیگر، بدون نیروی اضافی، عامل مهمی در کاهش انواع پیچیدگی است. حمل‌ونقل و جابجا کردن قطعات بدون آسیب‌دیدن و خم‌شدن لبه‌ها یا گوشه‌هایی از آن به ویژه در قطعات نازک ظریف می‌تواند حائز اهمیت باشد.

ج) سوار کردن اجزا

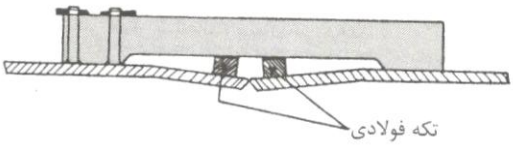
دو روش اصلی برای سوار کردن قطعات قبل از جوشکاری وجود دارد:

۱. روش پیش‌نشاندن: به دلیل آزادی اجزا در ضمن جوشکاری و کاهش تنش‌ها بیشتر از مهارکردن مورد توجه است؛ ولی در قطعات پیچیده طرح پیش‌نشانی، مشکل و حتی در مورد قطعات ساده هم نیاز به تجربه کافی دارد. گاهی می‌توان با تقسیم اسکلت و اجزای کوچکتر از این روش استفاده کرد. غالباً در مرحله نهایی، روش مهارکردن مناسب‌تر خواهد بود. مثال ساده برای این تکنیک در جوش نبشی و لب‌به‌لب در شکل‌های زیر نشان داده شده است.

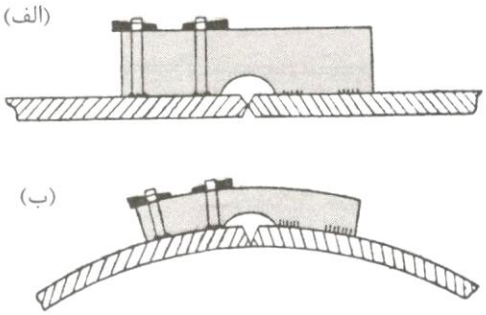




در مورد صفحات نازک مطابق شکل زیر از پشت‌بندهای قوی همراه با قطعات کوچک لبه‌ای می‌توان استفاده کرد و پیچیدگی زاویه‌ای را کنترل کرد.



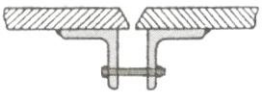
۲. روش مهارکردن: همانطور که از نام آن استنباط می‌شود؛ برای کنترل پیچیدگی، اجزای تحت نیروهای اعمال شده به وسیله فک‌ها، نگهدارنده‌ها و یا خال‌جوش‌زدن در ضمن جوشکاری مهار می‌شود. این روش بیشتر از روش قبلی متداول است. میزان مهارکردن اجزا در زمان جوشکاری تأثیر مستقیم بر روی کنترل پیچیدگی دارد. بالاترین پیچیدگی هنگامی اتفاق می‌افتد که فلز اصلی برای تغییرشکل ناشی از «انقباض حاصل از انجماد» آزاد باشد و کمترین پیچیدگی وقتی است که امکان حرکت کم برای اجزا وجود داشته باشد. در این حالت تنش پسماند قطعه زیاد است که در بیشتر موارد اهمیت چندانی ندارد؛ اما در برخی مواقع این تنش‌ها موجب ترکیدگی در جوش می‌شود. پیشگرم‌کردن قطعه در کاهش این عیب و در صورت لزوم تنش‌گیری پس از جوشکاری قطعه قبل از باز کردن مهار می‌تواند مفید باشد. مهار کردن حرکت اجزا در تمام جهات خطرناک است و معمولاً سعی می‌شود تا حرکت در یک جهت، آزاد و در جهت دیگر مهار شود. شکل زیر مهارکردن با پشت‌بند قوی در دو حالت تخت و محیطی را نشان می‌دهد.



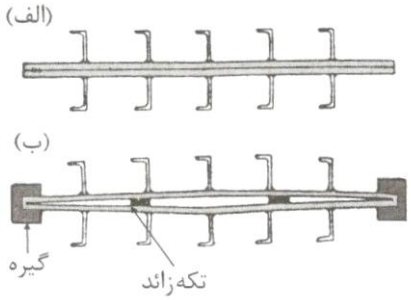
استفاده از فک‌ها و نگهدارنده‌ها نیز در روش مهارکردن بسیار متداول است. فک‌ها و نگهدارنده‌ها با توجه به تعداد قطعات و طرح اتصال طراحی شده و ضمناً باید دارای خصوصیات زیر باشند:

- اجزای اسکلت را دقیق در کنار یکدیگر نگه دارند.
- کار کردن با آنها ساده و سریع باشد.
- به اندازه کافی محکم باشد تا در ضمن جوشکاری تاب بر ندارد.
- مواضع مختلف مورد جوش قطعه در آن قابل دسترس باشد.
- بعد از جوشکاری بتوان قطعه جوش‌داده‌شده را از آن بیرون آورد.

شکل زیر استفاده از فک‌های تغییرپذیر را برای نزدیک‌کردن فاصله ریشه درز جوش نشان می‌دهد.



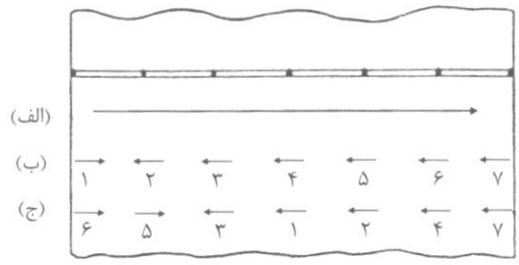
تدابیر دیگری که در روش مهارکردن برای قطعات مشابه به کار می‌رود؛ سوارکردن پشت‌به‌پشت است. شکل زیر دو قطعه مشابه را که از پشت به همدیگر خال‌جوش شده و یا توسط زائده لبه‌ای و فک‌ها به یکدیگر مهار شده‌اند؛ نشان می‌دهد.



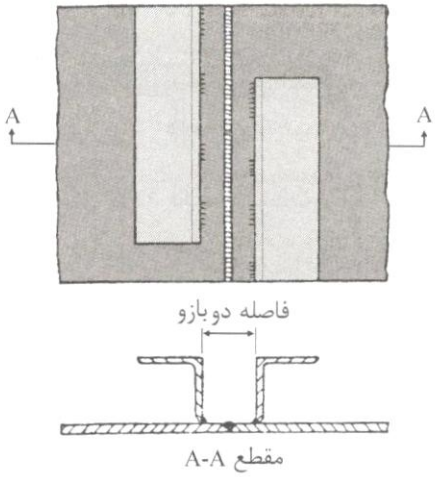
جوشکاری در محور خنثی به طریقی انجام می‌شود تا تعادل حرارتی در حول محور برقرار باشد. این روش به ویژه هنگامی موفقیت‌آمیز است که تنش‌گیری هم قبل از جدا کردن قطعات اجرا شود. اگر تنش‌گیری لازم نباشد ممکن است بتوان از حالت دوم سوارکردن پشت‌به‌پشت یعنی به کمک زائده لبه‌ای و فک استفاده کرد. درصورتیکه ضخامت زائده‌ها صحیح انتخاب شود؛ هیچ‌گونه پیچیدگی پس از جوشکاری و بازکردن فک‌ها دیده نخواهد شد.

استفاده از بازوهای موقتی در مواقع خاص و خال‌جوش‌زدن آن به قطعه قبل از جوشکاری نیز، حالت دیگر برای مهارکردن است. این بازوهای موقتی باید قدرت تحمل نیروی اعمال‌شده از اجزای ناشی از تنش‌های حرارتی را داشته باشد. عملیات حرارتی تنش‌گیری ممکن است قبل از برداشتن این بازوها انجام شود.

خال‌جوش‌زدن‌ها در جوشهای لب‌به‌لب بسیار متداول است و اگر به تعداد کافی باشد؛ فقط در برابر انقباض حاصل از انجماد عرضی مقاومت می‌کند. ترتیب خال‌جوش‌زدن، طول و فاصله آنها نسبت به یکدیگر و جهت رسوب‌دادن نیز باید مورد توجه قرار گیرد. شکل زیر تناوب در خال‌جوش‌زدن را نشان می‌دهد.



گاهی از تقویت‌کننده‌های نبشی و سپری برای کنترل انقباض طولی فلز جامد استفاده می‌شود که شکل زیر نمونه‌ای از این نوع مهارکردن را نشان می‌دهد.



د) انقباض مجاز

در تمام قطعات جوش‌داده‌شده، عموماً پس از جوشکاری و انجماد جوش، به دلیل سردکردن تا درجه حرارت محیط، انقباض خطی در سه جهت طولی، عرضی و ضخامت اتفاق می‌افتد که با درجه حرارت و اندازه قسمت حرارت‌دیده و نوع جنس متناسب است. کاهش خطی ناشی از انقباض باید محاسبه و در طراحی و سوارکردن قطعه به صورت اضافه‌مجاز در نظر گرفته شود. تشخیص مقدار اضافه‌مجاز انقباض در شرایط عملی مشکل است و نیاز به تجربه زیاد دارد ولی در شرایط تئوری می‌توان از روابطی استفاده کرد.

در روش قوس‌الکتریکی به دلیل کنترل حرارت حاصل و موضع حرارتی اعداد تجربی در حد مطلوبی دقیق‌اند. انقباض عرضی در جوش نبشی معادل ۰/۸ mm به ازای هر جوش که طول ساق آن از سه‌چهارم ضخامت ورق بیشتر نباشد؛ کافی

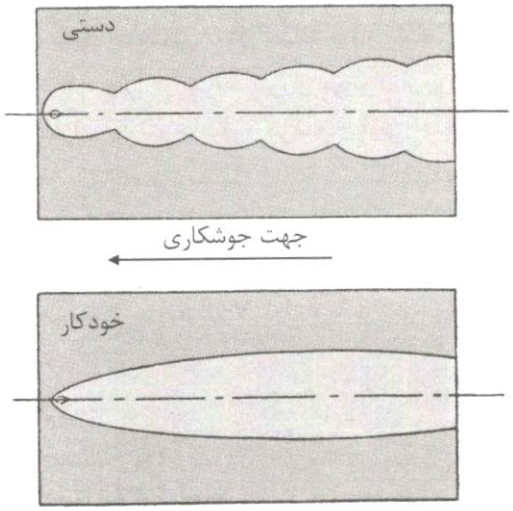
است. همین انقباض در جوش سربه‌سر، ۱/۵–۳mm به‌ازای هر جوش با اتصال V با زاویه ۶۰° بسته به تعداد پاس‌های جوش است. انقباض طولی در جوش نبشی برابر ۰/۸mm به ازای هر ۳m از جوش و در جوش لب‌به‌لب معادل ۳mm به ازای هر ۳m از جوش است.

در مواردی که اندازه دقیق ابعاد یا انقباض‌مجاز در تمام قسمت‌ها نیازی نباشد؛ می‌توان انقباض حاصل از انجماد را در جزئی که در مرحله نهایی جوش داده شده است؛ پیش‌بینی کرد. همچنین در بعضی موارد، ماشین‌کاری قطعه جوش‌داده‌شده ضروری است؛ بنابراین مقدار مجاز برای ماشین‌کاری و انقباض حاصل از انجماد ناشی از جوشکاری را باید توأماً در نظر گرفت.

هـ) روش عملیات جوشکاری

مجموعه عملیات جوشکاری را می‌توان شامل نوع فرآیند جوشکاری، نوع و اندازه الکترود، مفتول و یا سیم جوش، تعداد و ترتیب پاس‌های جوش، اندازه جوش و وضعیت جوشکاری، شدت جریان جوشکاری یا اندازه نازل مشعل، سرعت جوشکاری و ولتاژ و بالاخره تکنیک رسوب فلز جوش دانست. تمام عوامل فوق به نحوی بر روی نوع و میزان پیچیدگی اثر دارد. البته عمدتاً علاوه بر کنترل پیچیدگی، پارامترهای دیگری نظیر خواص جوش، امکانات و هزینه‌ها بر تنظیم مقادیر عوامل یادشده اثرگذارند.

۱. نوع فرآیند جوشکاری: به ندرت انتخاب روش جوشکاری بر اساس مقدار پیچیدگی حاصل برروی قطعه جوش‌داده‌شده انجام می‌گیرد. اما به‌هرحال تأثیر زیاد دستی یا خودکار بودن فرآیند جوشکاری بر روی میزان پیچیدگی، اثبات شده است. فرآیندهای خودکار غالباً سرعت جوشکاری بیشتر و نرخ رسوب بالاتر (و در نتیجه تعداد پاس جوش، کمتر) است؛ که خود موجب کاهش پیچیدگی نسبت به حالت دستی یا نیمه‌خودکار می‌شود. از طرف دیگر روش خودکار چون مداوم است؛ چرخه حرارتی نیز یکنواخت‌تر در نتیجه تنش‌های ایجادشده یکنواخت و ساده‌تر خواهد بود. شکل زیر خطوط هم‌دمای حاصل از جوشکاری دستی و خودکار را نشان می‌دهد.

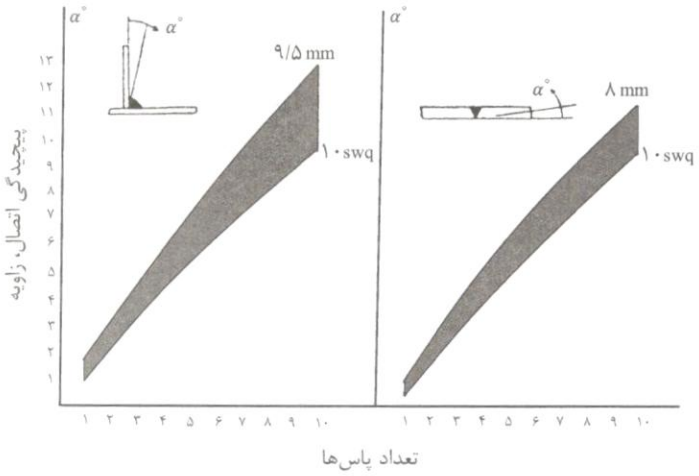


واضح است هم‌دماهای یکنواخت تنش‌های انقباضی و انبساطی به وجود می‌آورد که به کاهش پیچیدگی کمک می‌کند. از طرف دیگر شدت منبع حرارتی در شیب و مقدار حرارت تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. وسعت منطقه تحت تأثیر حرارت و پیچیدگی در روش‌های شعله‌ای وسیع‌تر از روشهای قوس‌الکتریکی است و همچنین وسعت این

منطقه در روشهای قوس‌الکتریکی بیشتر از قوس‌پلاسما می‌باشد. علت این امر این است که حرارت‌دادن آرام‌تر زمینه نفوذ حرارت به اطراف را بیشتر می‌سازد.

۲. نوع و اندازه الکترود، سیم و یا مفتول: حجم لازم جوش باید در کوتاه‌ترین زمان ممکن رسوب داده شود تا مقدار حرارت کمینه باشد. بنابراین استفاده از بزرگترین الکترود مجاز می‌تواند در پایین‌نگه‌داشتن تعداد پاس‌ها و مقدار حرارت و در نتیجه کاهش پیچیدگی مثبت باشد. انتخاب نوع الکترود بر اساس ضوابط دیگری نیز انجام می‌گیرد؛ اما این انتخاب تا حدودی برای میزان پیچیدگی اثر دارد. برای مثال حضور پودر آهن در الکترود موجب افزایش نرخ رسوب و کاهش حرارت داده‌شده می‌شود. در جوشکاری با گاز، اندازه مفتول حساس است و بسته به شرایط کار دارای حد معین و مشخصی است.

۳. تعداد و ترتیب پاس‌ها: شکل زیر تأثیر تعداد پاس‌های جوش برای پیچیدگی زاویه‌ای در حالت جوش نبشی و لب‌به‌لب را به خوبی نشان می‌دهد. تعادل حرارتی در دوطرف اتصال یا حول محور خنثی نیز قبلاً بررسی شده است و لزومی به تکرار آن نیست.

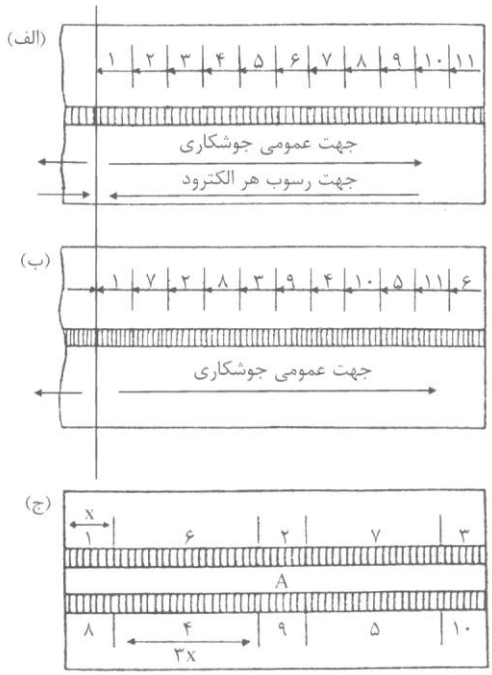


۴. اندازه رسوب و وضعیت جوشکاری: اندازه و حجم رسوب خود تابعی از اندازه الکترود، سرعت جوشکاری و عوامل دیگر است. اما به هر حال رسوب در یک پاس موجب پیچیدگی کمتری نسبت به همان حجم فلز جوش که در چند پاس رسوب داده شده، می‌شود. در روش رسوب‌داده‌شده در حالت قائم، میزان پیچیدگی کمتر از شرایط مشابه اما در وضعیت افقی است.

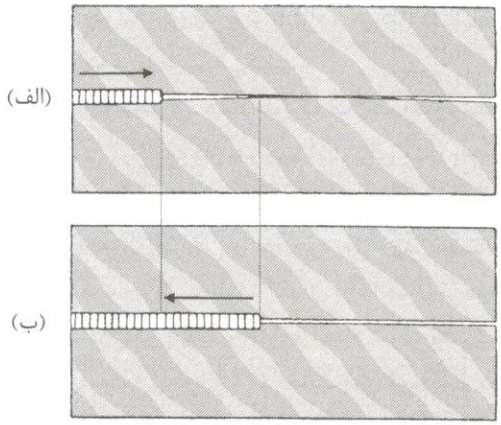
۵. شدت جریان یا اندازه نازل، سرعت جوشکاری و ولتاژ: این عوامل باید متناسب با الکترود و قطعه‌کار باشد. استفاده از بزرگترین الکترود ممکن برای قطعه خاص امکان استفاده از شدت‌جریان بالاتر با سرعت جوشکاری سریع‌تر را فراهم می‌کند که نتیجه آن نرخ رسوب بالاتر، در یک پاس است و پیچیدگی کمتر را میسر می‌کند.

۶. تکنیک و نحوه اجرای جوشکاری: همانطور که قبلاً هم اشاره شده است؛ باید سعی شود تعادل حرارتی حول محور خنثی در قطعه‌کار به وجود آید. برای مثال پخ جناغی یا V دوطرفه و جوشکاری در وضعیت قائم توسط دو جوشکار به طور هم‌زمان در دو طرف درز جوش و با سرعت یکسان حالت ایده‌آل تعادل حرارتی را به وجود می‌آورد. جهت جوشکاری نیز حائز اهمیت است و به‌طورکلی حرکت جوش به طرف انتهای آزاد اتصال ترجیح دارد. در اتصالات با درز طولانی تمام جوش باید در یک جهت و مداوم انجام شود. تکنیک «گام به پس» روش مفیدی برای کاهش

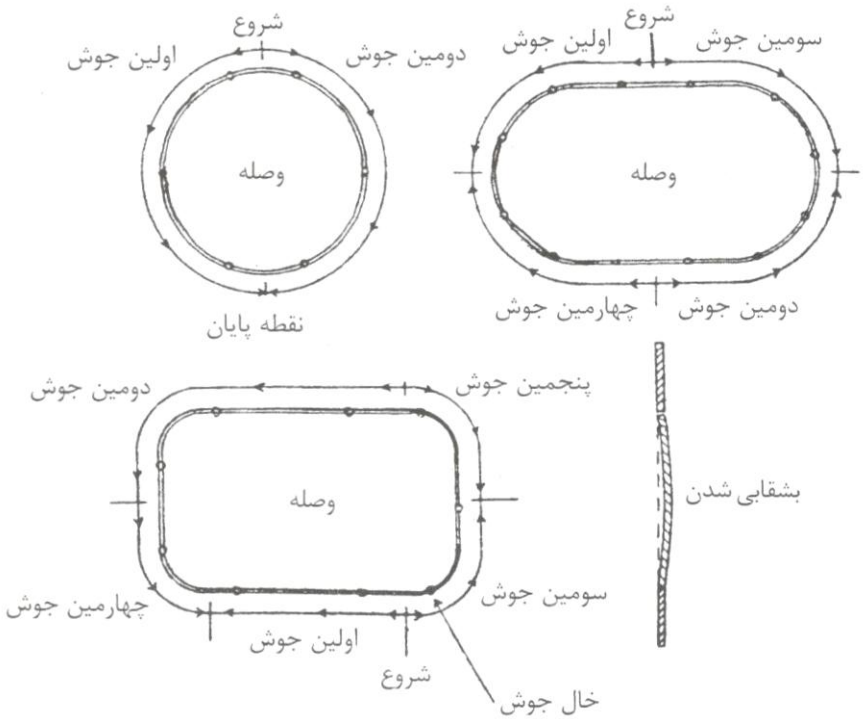
پیچیدگی است. شکل زیر حالت‌های گوناگون در ترکیب یا ردیف و جهت امتداد عملیات جوشکاری را نشان می‌دهد.



شکل زیر تأثیر تغییر جهت امتداد جوشکاری برای سوار شدن لبه درزجوش را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل زیر حالت دیگری از تغییر جهت امتداد جوشکاری محیطی را نشان می‌دهد که غالباً در بعضی تعمیرات با وصله‌کاری پیش می‌آید.



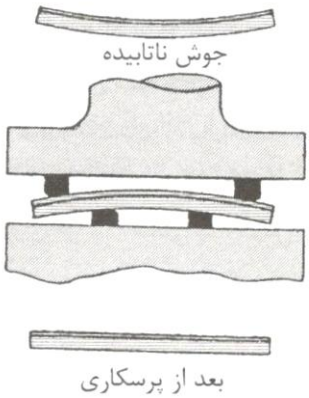
دور نگه داشتن زیاد مشعل نسبت به موضع جوش موجب پخش بیشتر حرارت به اطراف مسیر جوش می‌شود و احتمال افزایش پیچیدگی را بیشتر می‌کند. همینطور حرکت‌های بیجا و بی‌مورد به مشعل یا الکترود و یا عدم تمرکز متجانس حرارت در لبه‌های مورد جوش، موجب افزایش پیچیدگی خواهد شد.

اصلاح پیچیدگی

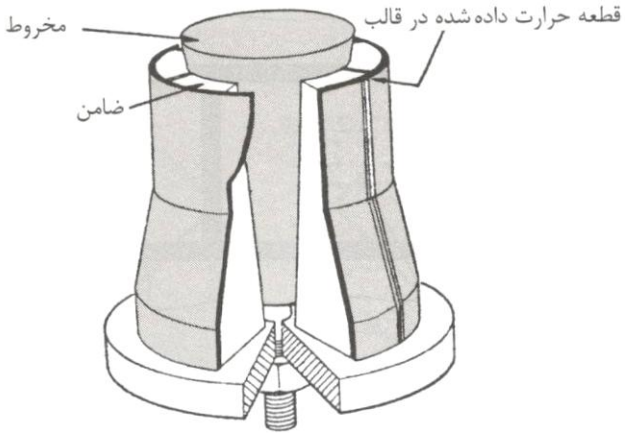
همیشه امکان کنترل دقیق پیچیدگی در حد مورد نظر و به ویژه در مورد قطعات جدید وجود ندارد. از طرف دیگر در حالت‌های خاص ممکن است بروز پیچیدگی و اصلاح آن به روش‌های مختلف به‌صرفه‌تر از پیش‌گیری باشد. در ادامه به روش های اصلاح پیچیدگی اشاره می شود:

۱. انحنای زیاد در درز جوش لب‌به‌لب را ممکن است بتوان با ایجاد شیار سراسری به کمک شعله یا قوس در پشت آن (قسمت محدب) و رسوب مجدد فلزجوش در شیار، ترمیم نمود. اندازه شیار باید چنان باشد که مجموع اثرات حرارت برداشتن فلز و پرکردن شیار، تعادل لازم با حرارت اولیه را برقرار و تنش خمیدگی حاصل را خنثی کند.

۲. در بعضی موارد می‌توان پیچیدگی قطعات را به کمک روش‌های مکانیکی و اعمال فشار برطرف کرد. شکل زیر.

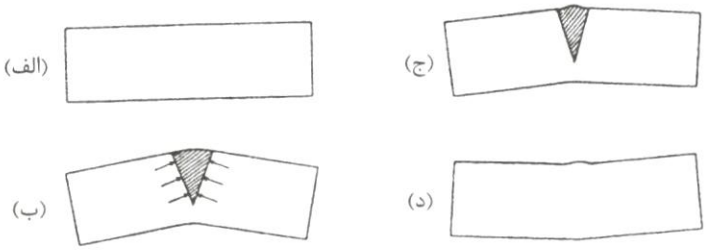


گاهی با گرم‌کردن قطعه و گذاردن آن در قالب‌های پیش‌طرح‌شده و احتمالاً کشیدن آن در قالب و سپس بیرون آوردن آن پس از سردشدن کامل در قالب، شکل اصلی تثبیت خواهد شد. شکل زیر.

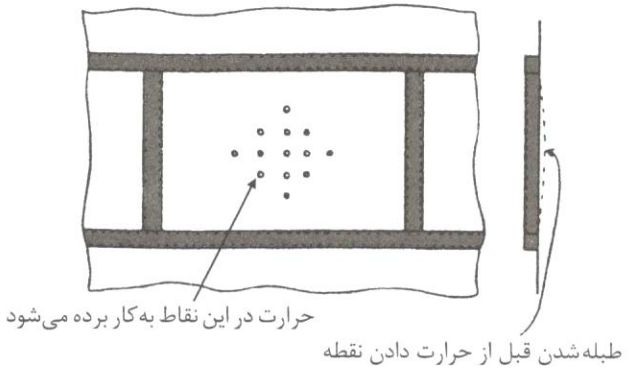


عملی شبیه آنچه در بالا گفته شد؛ برای مسلح کردن یک اتصال لب‌به‌لب تاب‌دار نیز انجام می‌شود. بدین ترتیب قطعه را به کمک فک‌ها و اعمال فشار بر روی صفحه تخت و قوی نگه می‌دارد و عملیات تنش‌گیری انجام می‌شود. پس از تنش‌گیری و سرد شدن کامل قطعه، فک‌ها را باز می‌کنند. برای فولاد معمولی عملیات تنش‌گیری شامل گرم‌کردن آرام تا $۶۵۰°C$، نگه‌داشتن به مدت یک ساعت به ازای هر $۲/۵cm$، سپس سردکردن در کوره تا دمای $۳۰۰°C$ و بعد در هوا می‌باشد.

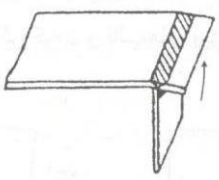
۳. از فنون دیگر برای تصحیح پیچیدگی، تمرکز حرارت موضعی توسط شعله است. اثر حرارت موضعی بر روی تغییرشکل قطعه در شکل زیر نشان داده شده است.



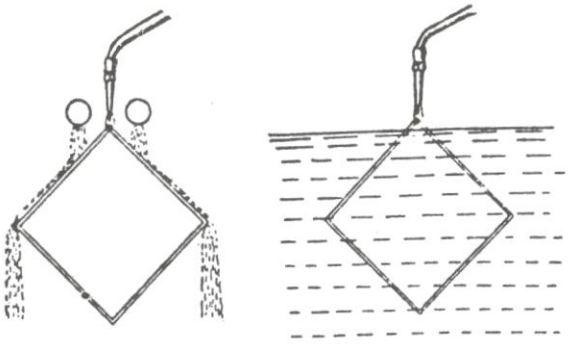
با این روش می‌توان تعادل بین انقباض ناشی از حرارت موضعی و انقباض ایجاد شده ناشی از جوشکاری به وجود آورد. اگرچه مجموع این دو انقباض موجب جمع‌شدن کلی در قطع می‌شود؛ اما در مواردی که اندازه قطعه کمی بزرگتر انتخاب شده باشد؛ این عمل امکان‌پذیر است. البته باید توجه داشت این روش نیاز به مهارت و تجربه زیاد دارد. زیرا چه بسا تعادل انقباض در گوشه‌ای از قطعه، موجب تغییرات ابعاد و پیچیدگی‌هایی در درز جوش و کناره‌های دیگر قطعه شود. این پدیده ممکن است ناشی از حرارت‌دادن سطح وسیع یا بالارفتن فوق‌العاده درجه‌حرارت باشد. به‌طورکلی بهتر است درجه‌حرارت ضمن این عملیات بیش از $650-600^{\circ}C$ نباشد. هنگام اتصال ورق نازک به قاب قوی، وسط ورق نازک برآمدگی یا فرورفتگی‌هایی ایجاد می‌شود که ممکن است با حرارت‌دادن نقطه‌ای از وسط به کناره‌ها در طرف محدب آن، عیب را کاهش داد. شکل زیر.



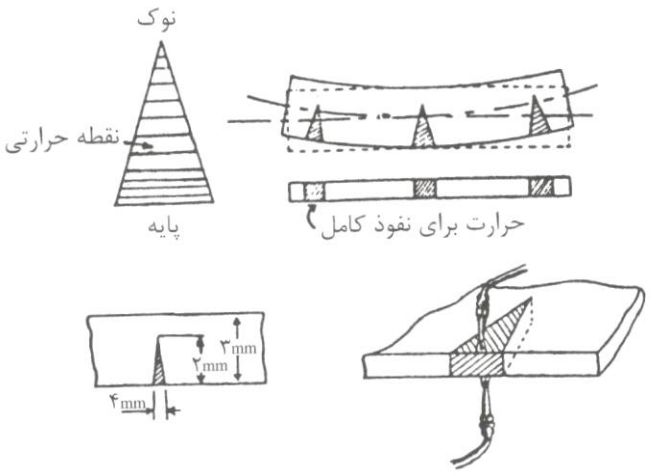
حرارت‌دادن موضعی خطی، برای برطرف‌کردن پیچیدگی زاویه‌ای در جوش نبشی بسیار متداول است. شکل زیر.



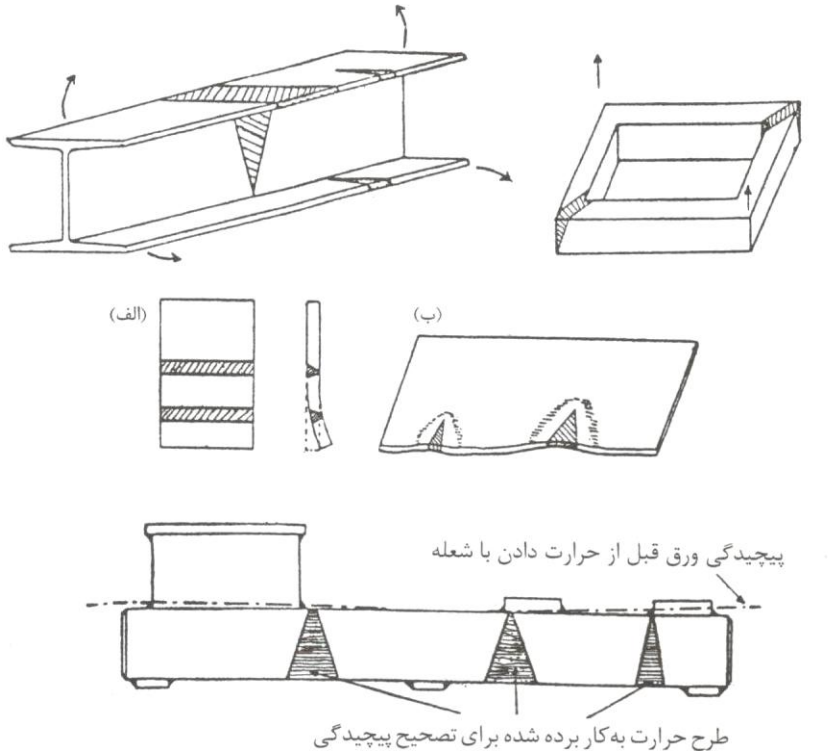
حرارت‌دادن در امتداد خط‌جوش و در پشت آن انجام می‌شود. می‌توان قسمت‌های مختلف را با سیستم‌های متفاوت سرد نگه داشت. شکل زیر.



در مورد قطعات پیچیده و ضخیم، رفع پیچیدگی به کمک حرارت‌دادن کمی مشکل‌تر است. طرح‌های حرارت موضعی متفاوتی در قسمت‌های مختلف آن باید اجرا شود که نیاز به تجربه زیاد دارد. حرارت‌دادن لبه‌ی مثلثی یکی از روش‌های متداول در این مورد است. شکل زیر.



ارتفاع و قاعده این مثلث، شدت حرارت و فاصله این مواضع حرارت‌داده‌شده عواملی است که برای تسهیل پیچیدگی قابل کنترل و تنظیم است. مثال‌های دیگر از حرارت‌دادن موضعی در شکل زیر نشان داده شده است.



منابع و مراجع:

در تدوین جزوه حاضر، عمده مطالب از مراجع زیر استخراج شده‌اند:

- مقدمه‌ای بر مهندسی و علم مواد. نوشته: *W.Callister*. ترجمه: دکتر علی شکوه‌فر. انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیر.
- تکنولوژی جوشکاری. جلد سوم: طراحی و بازرسی. دکترامیرحسین کوکبی؛ حامد جمشیدی اول. انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.
- تکنولوژی جوشکاری. جلد دوم: متالورژی. دکترامیرحسین کوکبی؛ بهروز بیدختی؛ حامد جمشیدی اول. انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.
- متالورژی جوشکاری. نوشته: *Sindo Kou*. ترجمه: داریوش ورکیانی. ناشر: آینده‌سازان شهرآب.