

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# جریان حرارت در جوشکاری

احسان عسکری

[askari.put@gmail.com](mailto:askari.put@gmail.com)

پاییز ۹۰

# انتقال حرارت در جوش

- جریان حرارت در جوشکاری، به میزان زیادی بر استحاله های فازی در حین جوشکاری و در نتیجه بر ریز ساختار نهایی و خواص جوش تاثیر می گذارد.
- همچنین جریان حرارت حرارت، دلیل اصلی ایجاد تنش های باقیمانده و پیچیدگی در قطعه است.
- اولین قدم در این مبحث مطالعه و دانستن خواص حرارتی فلزی است که می خواهد روی آن جوشکاری صورت گیرد بنابراین ابتدا به سراغ این خواص و تعریف آنها می رویم .

# هدایت حرارتی

- انتقال حرارت در فلزات از طریق حرکت الکترونها و افزایش میزان نوسان اتمها با افزایش دما ، صورت می گیرد. میزان انتقال حرارت در یک فلز را با ضریب هدایت حرارتی نشان می دهند. این ضریب را که با  $k$  یا  $\lambda$  نمایش می دهند، بدین صورت تعریف می کنند.

$$[k] = \frac{j}{\text{sec cm } ^0k}$$

- میزان حرارتی که در واحد زمان ، در واحد طول ماده منتقل می شود ، وقتی که اختلاف درجه حرارت برابر بایک درجه سانتیگراد باشد.

# هدایت حرارتی

- در واقع وقتی فلزی را گرم می کنیم، ارتعاش اتمها بیشتر و حرکت الکترونها نیز تشدید می شود و حرارت بدین وسیله یعنی هم با ارتعاش اتمها و هم حرکت الکترونها به قسمت های دیگر منتقل می شود.
- با افزایش دمای یک فلز میزان هدایت حرارتی آن کاهش می یابد چرا که احتمال برخورد الکترونها با اتمها و همچنین برخوردشان با یکدیگر بیشتر شده و متفرق می شوند، بنابراین انتقال حرارت کاهش می یابد.
- این موضوع در فرایند جوشکاری اهمیت پیدا می کند چرا که در حین جوشکاری فلز پایه به یکباره گرم می شود بنابراین می توانیم بگوییم که هدایت حرارتی آن کاهش می یابد.
- عناصر آلیاژی نیز باعث کاهش هدایت حرارتی می شوند چرا که نظم اتمی را به هم می زنند و در نتیجه میزان پراکندگی الکترونها را در اثر برخورد افزایش می دهند.

# هدایت حرارتی

- برای نشان دادن میزان اثر عوامل روی حرکت الکترونها از تعریفی به عنوان متوسط مسیر آزاد استفاده می کنند که نشان دهنده متوسط مسیر طی شده توسط یک الکترون در بین دو برخورد متوالی می باشد.
- هر عاملی که متوسط مسیر آزاد را کاهش دهد باعث کاهش هدایت حرارتی می شود.
- از آنجائیکه که این خاصیت نشان دهنده انتشار حرارت در فلز پایه می باشد، بنابراین روی میزان حرارت ورودی منبع و میزان درجه حرارت پیش گرم و همچنین روی سرعت سرد شدن فلز پایه در هنگام جوشکاری تاثیر زیادی می گذرد.

# ظرفیت گرمای ویژه

- این خاصیت نشان دهنده میزان گرمایی است که واحد جرم یک فلز (ماده) دریافت می کند تا درجه حرارت آن یک درجه سانتیگراد (یک درجه کلوین) افزایش یابد که با  $C_p$  نمایش می دهند.
- در واقع این پارامتر نشان دهنده میزان خاصیت جذب گرما یا به عبارتی نگهداری گرما توسط یک ماده می باشد.
- این خاصیت درجوشکاری، میزان حرارت لازم برای ایجاد ذوب موضعی درفلز را نشان می دهد. بنابراین برای دانستن حرارت لازم ایجاد ذوب در یک فلز هم باید به ظرفیت گرمایی آن و هم به نقطه ذوب آن توجه کرد.

# ظرفیت گرمای ویژه

- مثلاً آلومنیوم دارای ظرفیت گرمایی بالاتری نسبت به فولاد می باشد ولی چون نقطه ذوب پایینتری دارد اگر بخواهیم میزان منبع حرارت ورودی را طوری تعیین کنیم که به طوریکسان (با حجم یکسان) در آنها ذوب صورت گیرد تقریباً برای هر دو و میزان حرارت منبع یکسان می باشد.
- اثر ظرفیت گرمای ویژه بیشتر روی گازهای محافظ مورد استفاده در جوشکاری می باشد به عنوان مثال هلیوم نسبت به آرگون گرمای بیشتری را لازم دارد تا دمایش یک درجه افزایش یابد.



# نفوذ پذیری حرارتی

•  $\alpha$  نفوذ پذیری حرارتی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\alpha = \frac{K}{\rho C}$$

• که در این رابطه:

□ K هدایت حرارتی

□  $\rho$  چگالی

□ C گرمای ویژه

# ضریب انبساط حرارتی

- این ضریب میزان افزایش حجم در اثر افزایش دما را نشان می دهد. بنابراین ضریب انبساط حرارتی را به صورت تغییر حجم یک فلز با حجم واحد وقتی که درجه حرارت آنرا یک درجه افزایش دهیم ، تعریف می کنند.

$$\alpha_V = \frac{\Delta V}{\Delta T V_0}$$

- و به طور معمول داریم:

$$\alpha_V = 3\alpha_L$$

- در این رابطه  $\alpha_L$  ضریب انبساط طولی ،  $\alpha_V$  ضریب انبساط حجمی ،  $T$  دما ،  $\Delta$  نشانه تغییرات ،  $V_0$  حجم اولیه می باشد.

# ضریب انبساط حرارتی

- ضریب انبساط حرارتی بسیار به تراکم شبکه کریستالی (نوع ساختار کریستالی) بستگی دارد.
  - هرچه که شبکه کریستالی متراکم تر باشد، میزان افزایش حجم ناشی از افزایش دما نیز بیشتر خواهد بود. یعنی اینکه هرچه شبکه بازتر باشد (غیرمتراکم) تغییر حجم آن نیز در حین گرم کردن کمتر می باشد به همین دلیل با افزایش دما، میزان ضریب انبساط حرارتی کاهش می یابد.
- اثر ضریب انبساط حرارتی در جوشکاری روی میزان اعوجاج در فلز پایه و ترکهای ناشی از انبساط و انقباض در فلز پایه می باشد.
  - هرچه این ضریب بیشتر باشد، حساسیت فلز به ایجاد ترک و اعوجاج از انبساط و انقباض در حین جوشکاری بیشتر است.

# نقطه ذوب یا بازده ذوب

- درجه حرارتی که در آن درجه حرارت ماده جامد به مذاب تبدیل می شود نقطه ذوب نامیده می شود.
  - در آلیاژها نقطه ذوب نداریم بلکه ذوب (تبدیل جامد به مذاب) در یک محدوده دمایی صورت می گیرد که به آن محدوده ذوب می گویند.
  - البته ترکیبات خاصی مانند یوتکتیک یا ترکیبات بین فلزی دارای نقطه ذوب هستند.
- نقطه ذوب همراه با گرمای ویژه، میزان حرارت لازم برای ایجاد ذوب را در حین جوشکاری تعیین می کند.

# نقطه جوش

- درجه حرارتی که در آن ماده از حالت مایع به حالت بخار تبدیل می شود.
- در جوشکاری وجود فلزاتی که دارای نقطه تبخیر پایینی هستند اهمیت زیادی پیدا می کند (مانند روی) را که در درجه حرارتهای نسبتاً نزدیک به نقطه ذوبشان، میزان زیادی از این فلزات تبخیر می شود دلیل این امر نزدیک بودن نقطه ذوب به نقطه تبخیر آنها می باشد.
- تاثیر دیگر این پارامتر، وجود بخار فلز پایه در حد فاصل بین نوک الکتروود (بری ایجاد قوس) و فلز جوش می باشد چرا که وجود بخارات فلز در پایداری قوس نقش دارد.

# مکانیزه های انتقال حرارت

- گرما به سه صورت رسانش، همرفتی و تابش منتقل می شود.

- در فرایند جوشکاری فرایند رسانش بسیار اهمیت پیدا می کند یعنی هم هنگام انتقال گرما از منبع حرارتی به فلز جوش هم هنگام انتقال گرما از فلز جوش به پایه مهمترین مکانیزم انتقال حرارت رسانش می باشد.

$$q = \frac{Q}{A}$$

$$[q] = \frac{j}{\text{sec m}^2}$$

$$[Q] = \frac{j}{\text{sec}}$$

- برای نشان دادن میزان انتقال حرارت از پارامترهای  $Q$ ،  $q$  استفاده می کنند که  $Q$  نشان دهنده میزان انتقال گرما در واحد زمان می باشد که به آن آهنگ انتقال گرما نیز می گویند و  $q$  که به آن شارژ گرمایی گفته می شود، نشان دهنده میزان انتقال گرما در واحد زمان از واحد سطح می باشد.

# انتقال گرما از طریق همرفت

- وقتی که یک سیال در تماس با یک جامد باشد، بطوریکه بین آن دو اختلاف دما وجود داشته باشد با حرکت سیال بر روی سطح جامد، انتقال حرارت صورت می گیرد یعنی اینکه سیال گرم از سطح دور می شود و جای آنرا سیال سرد می گیرد.

- رابطه ای که برای این انتقال حرارت ذکر شده به صورت ذیل می باشد.

$$q = h (T_w - T_\infty)$$

- در این رابطه  $h$  ضریب انتقال گرما،  $T_w$  دمای سطح جامد و  $T_\infty$  دمای سطح سیال می باشد.

# انتقال حرارت از طریق تابش

- در اثر گرم شدن سطوح جامد، یکسری امواج الکترومغناطیس از آن ساطع می شود که توسط آنها گرما منتقل می شود، این مکانیزم انتقال حرارت را، تابش گویند و میزان آن را می توان از طریق رابطه زیر محاسبه کرد:

$$q = \varepsilon \delta (T_W^4 - T_\infty^4)$$

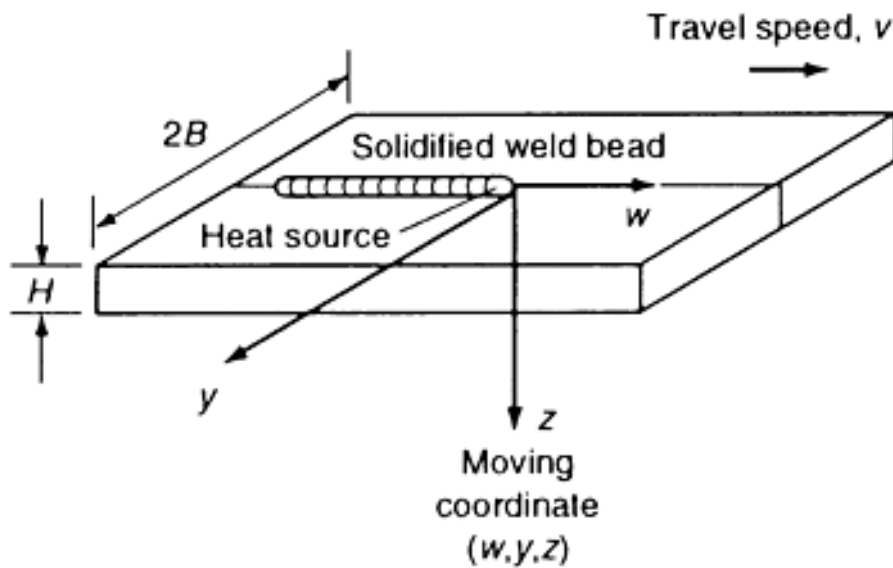


# انتقال حرارت از طریق رسانش

- در این روش انتقال حرارت از طریق حرکت الکترونها و ارتعاش اتم های درون فلزات هستند

$$q = -k \frac{dT}{dX}$$

- در این رابطه  $\frac{dT}{dX}$  شیب حرارتی می باشد.



SCHEMATIC OF THE WELDING THERMAL MODEL

Three metallurgical zones are formed in the plate upon completion of the thermal cycle:

- ✓ the weld-metal (WM) zone,
- ✓ the heated-affected zone (HAZ),
- ✓ the base-metal (BM) zone.

# Heat Flow in Fusion Welding

- The peak temperature and the subsequent cooling rates determine the HAZ structures, whereas the thermal gradients, the solidification rates, and the cooling rates at the liquid-solid pool boundary determine the solidification structure of the WM zone.
- The size and flow direction of the pool determines the amount of dilution and weld penetration.
- Thermally related welding problems can be categorized as:
  - SOLIDIFICATION RATES IN THE WELD POOL
  - COOLING RATES IN THE HAZ AND ITS VICINITY
  - THERMAL STRAINS IN THE GENERAL DOMAIN OF THE WELDMENT

# راندمان منبع حرارتی

- بخشی از توان حاصل از منبع حرارتی به قطعه کار منتقل شده و بخش باقیمانده آن به محیط اطراف منتقل می شود.

- $\eta$  راندمان منبع حرارتی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta = \frac{Q_{\text{شوج}} t_{\text{شوج}}}{Q_{\text{ي م ا}}} = \frac{Q}{Q_{\text{ي م ا}}}$$

- در این رابطه:

- $Q$  نرخ انتقال حرارت از منبع حرارتی به قطعه کار

- $Q_{\text{اسمی}}$  توان اسمی منبع حرارتی

- $t_{\text{جوشکاری}}$  زمان جوشکاری

# راندمان منبع حرارتی

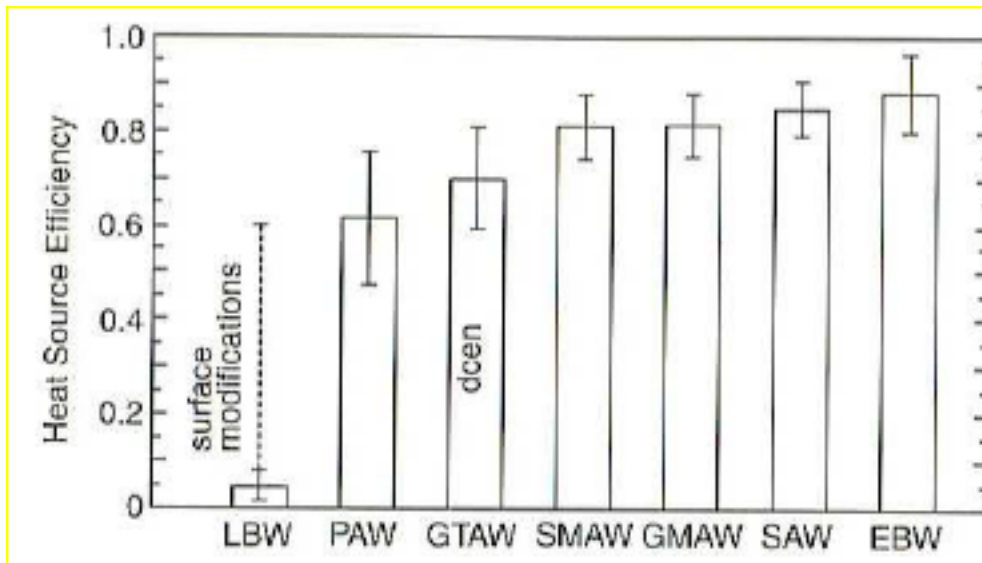
- با داشتن راندمان منبع حرارتی می توان نرخ انتقال حرارت به قطعه کار،  $Q$ ، را محاسبه کرد.

- در جوشکاری قوسی با ولتاژ ثابت  $E$  و جریان ثابت  $I$ ، راندمان قوس به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta = \frac{Q t_{\text{شوج}}}{EI t_{\text{شوج}}} = \frac{Q}{EI}$$

- در مبحث جوشکاری، معمولا منظور از حرارت ورودی،  $Q_{\text{اسمی}}$ ، و یا در جوشکاری قوسی  $EI$  است.
- همچنین منظور از حرارت ورودی در واحد طول جوش،  $Q_{\text{اسمی}}/V$ ، است که در آن  $V$  سرعت جوشکاری است.

# راندمان منبع حرارتی



راندمان منبع حرارتی در چندین فرایند جوشکاری:

- **LBW**: راندمان منبع حرارتی به دلیل بازتاب زیاد سطح فلز بسیار کم است. با اصلاح سطح مانند زبر کردن، اکسید کردن و یا پوشش دهی می توان راندمان را افزایش داد.
- **PAW**: راندمان حرارتی به دلیل آنکه بازتاب مشکلی ایجاد نمی کند بسیار بیشتر از LBW است.

# راندمان منبع حرارتی

- **GTAW**: بر خلاف PAW، تفلات حرارتی از پلاسمای قوس به سیستم آبگرد نازل مشعل وجود ندارد. در DCEN برخورد الکترون های مهمترین منبع انتقال حرارت به قطعه کار به شمار می رود. تابع کار الکترون ها به صورت گرما آزاد می شود و همچنین انرژی جنبشی آنها نیز در هنگام برخورد به قطعه کار به حرارت تبدیل میشود. اما در AC GTAW، الکترونها، فقط در نیم سیکلی که الکتروود منفی است، قطعه کار را بمباران می کنند بنابراین راندمان قوس کمتر است. در DCEP به دلیل بمباران شدن الکتروود توسط الکترون ها به جای بمباران شدن قطعه کار، راندمان قوس حتی کمتر نیز خواهد بود.

# راندمان منبع حرارتی

- **GMAW**، **SMAW**: بر خلاف GTAW انتقال حرارت به الکتروود، مجدداً توسط قطرات مذاب به قطعه کار باز می‌گردد بنابراین راندمان قوس بهبود می‌یابد.
- **SAW**: بر خلاف GMAW یا SMAW، قوس توسط مواد عایق حرارت مانند سرباره مذاب و فلاکس پوشیده می‌شود. بنابراین، تلفات حرارتی به محیط اطراف کاهش یافته و راندمان قوس افزایش می‌یابد.
- **EBW**: سوراخ کلیدی در EBW نقش یک جسم سیاه را داشته و انرژی پرتو الکترونی را در خود به دام می‌اندازد. در نتیجه راندمان پرتو الکترونی بسیار زیاد خواهد بود.



# راندمان ذوب

- توانایی منبع حرارتی در ذوب کردن فلز پایه (علاوه بر فلز پرکننده)
- یکی از روش های تعیین راندمان ذوب قوس جوشکاری،  $\eta_m$  به صورت زیر است:

$$\eta_m = \frac{(A_{\text{پایه}} V_{t_{\text{شوج}}}) H_{\text{پایه}} + (A_{\text{پرکننده}} V_{t_{\text{شوج}}}) H_{\text{پرکننده}}}{\eta E I t_{\text{شوج}}}$$

- در این رابطه:

□  $A_{\text{پایه}}$  و  $A_{\text{پرکننده}}$  به ترتیب سهم فلز پایه و فلز

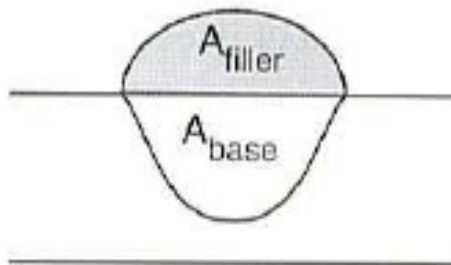
پرکننده در فلز جوش

□  $H_{\text{پایه}}$  و  $H_{\text{پرکننده}}$  به ترتیب انرژی لازم برای

افزایش دمای واحد حجم فلز پایه و فلز پرکننده

تا نقطه ذوب و ذوب کردن آن است.

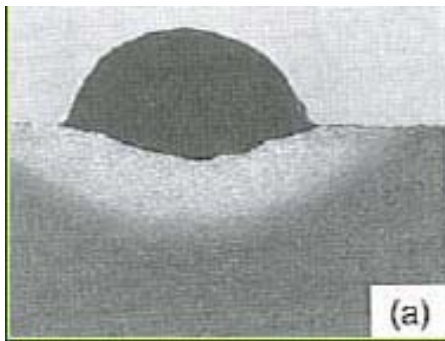
□  $V$  سرعت جوشکاری



مقطع عرضی جوش

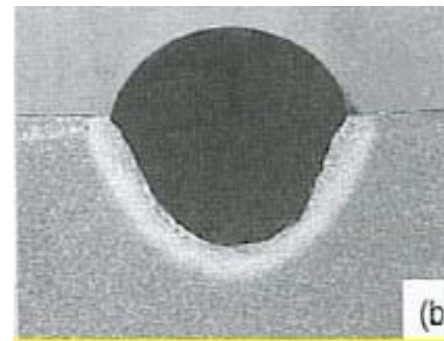
$$A_{\text{جوش}} = A_{\text{پرکننده}} + A_{\text{پایه}}$$

# راندمان ذوب



راندمان ذوب کمتر

در حرارت ورودی و سرعت جوشکاری کمتر



راندمان ذوب بیشتر

در حرارت ورودی و سرعت جوشکاری بیشتر

## توزیع چگالی توان منبع حرارتی

THE **DISTRIBUTION** OF the heat applied on the surface of the workpiece has an important effect on the heat distribution pattern in the vicinity of the weld.

Power density distribution is influenced by:

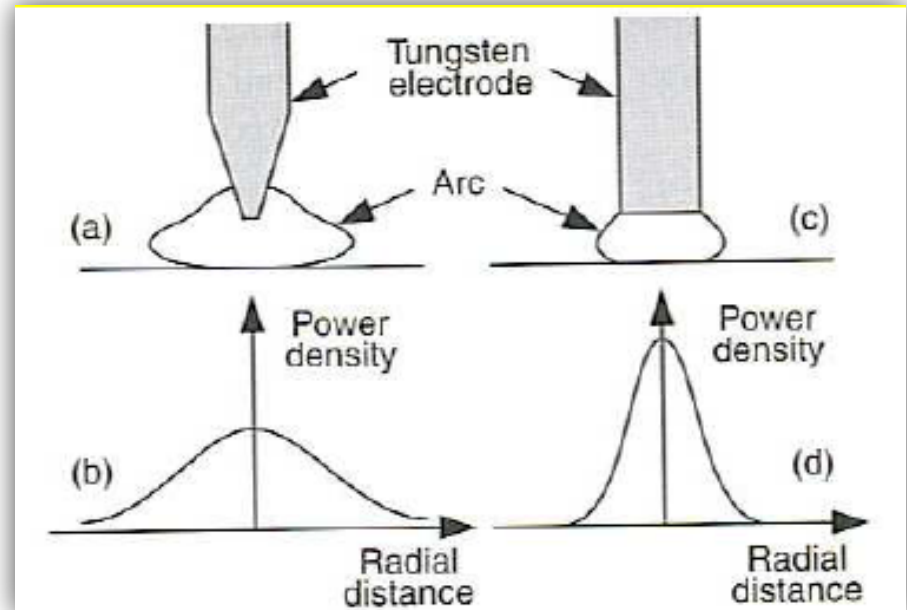
- 1) Electrode tip angle
- 2) Electrode tip geometry

### Sharp electrode

- Arc diameter 
- Power density distribution 

### Blunter electrode

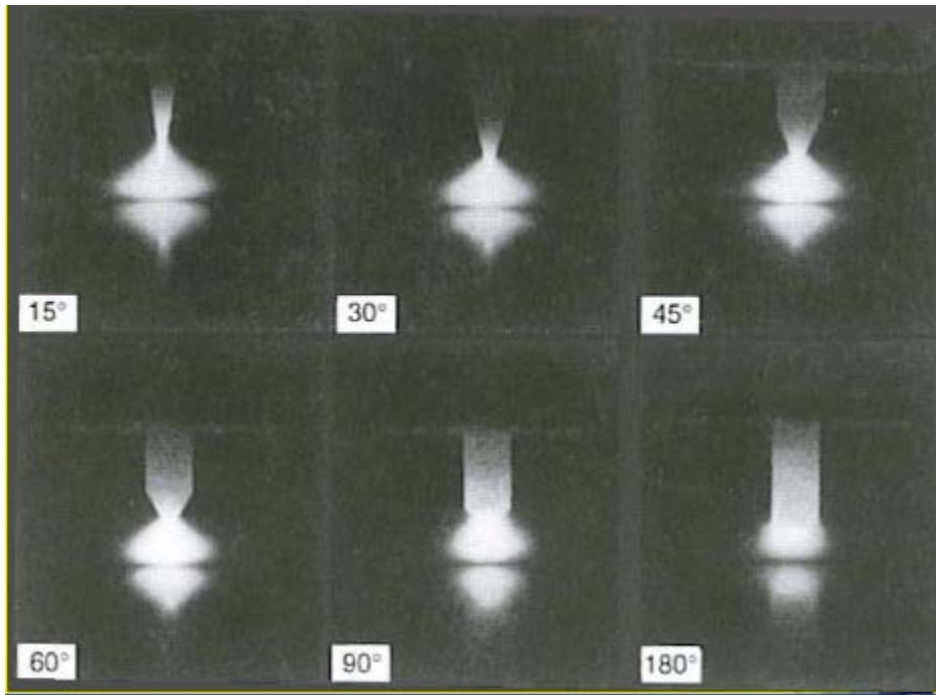
- Arc diameter 
- Power density distribution 



اثر شکل نوک الکترود بر شکل و توزیع چگالی توان  
قوس تنگستن - گاز.

## توزیع پگالی توان منبع حرارتی

With GTAW, the arc becomes more constricted and the weld depth-to-width ratio becomes greater as the effect of vertex angle of the conical tip of the tungsten electrode increases.

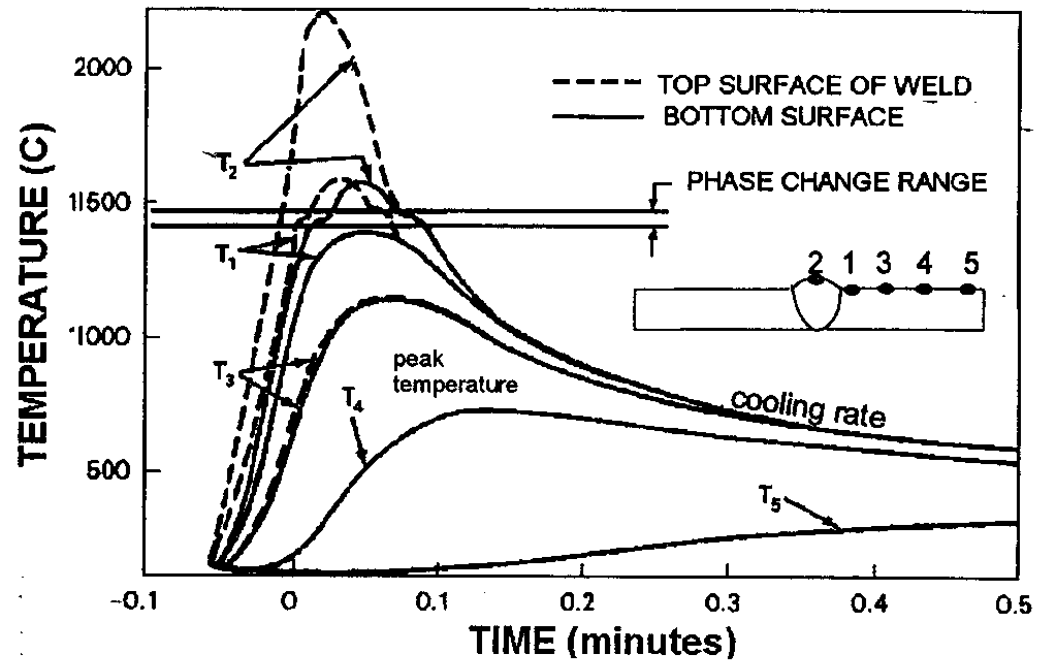


As the arc becomes more constricted, the heat source is more concentrated.

The electromagnetic force in the weld pool also increases as the arc becomes more constricted, and produces a change in weld pool motion

اثر زاویه نوک الکتروود بر شکل قوس تنگستن - گاز.

# Weld Thermal Cycle



- A typical weld thermal cycle is such that the temperature at a point in the workpiece increases rapidly as heat is transferred from the heat source.
- The **rate of increase** varies inversely with the distance from the weld centerline.
- When the temperature reaches a peak value, cooling commences at a rate that also varies inversely with the distance from the weld centerline. The cooling rate then decreases with time.

# آنالیز جریان حرارت

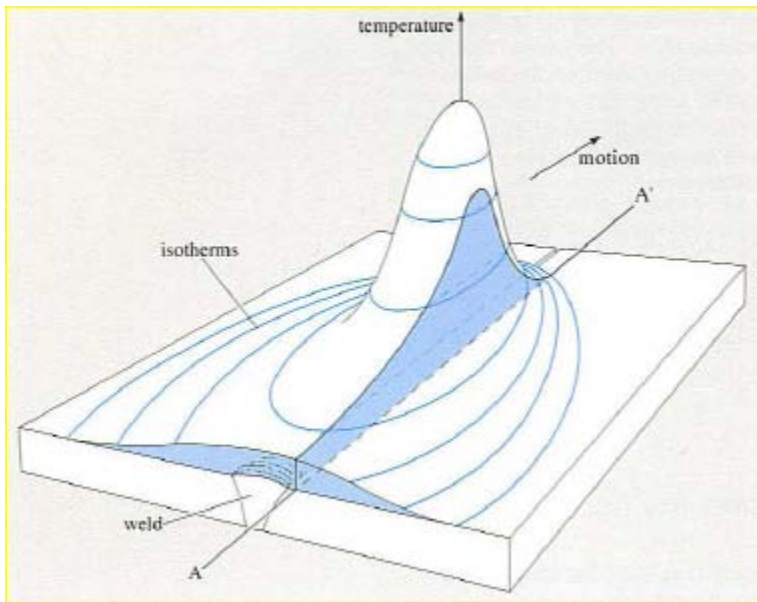
معادلات این قسمت شامل موارد زیر می باشد:

➤ نرخ سرد شدن

➤ پیک دمایی

➤ عرض منطقه متأثر از جوش

➤ نرخ انجماد



توزیع دما اطراف جوش

# Effect of Relative Plate Thickness

- The general (analytical) **heat-flow solutions** for fusion welding can be categorized by those appropriate for:
  - **a thick plate:** The thick plate equation is used when heat flow is three-dimensional-downward as well as lateral from the weld.
  - **a thin plate:** The thin plate equation would apply to any weld in which the heat flow is essentially lateral; that is, a base metal thin enough that the difference in temperature between the bottom and the top surfaces is small in comparison to the melting temperature.

- Sometimes, it is not obvious whether the plate is thick or thin because the terms have no absolute meaning.
- For this reason, it is helpful to define a dimensionless quantity called “**the relative plate thickness**”:

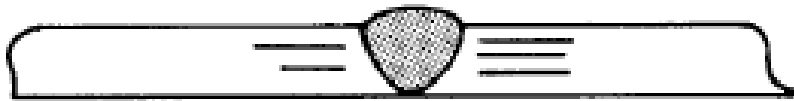
$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho C_p (T_c - T_0)}{H_{met}}}$$

- Where
  - $\rho$  is the density of the material (g/mm<sup>3</sup>),
  - $C_p$  is the specific heat of solid metal (J/g · °C),
  - $t$  is the thickness of the base metal (mm).
  - $H_{net}$  is the **net energy input** equal to  $\eta EI/v$  (J/s · mm)

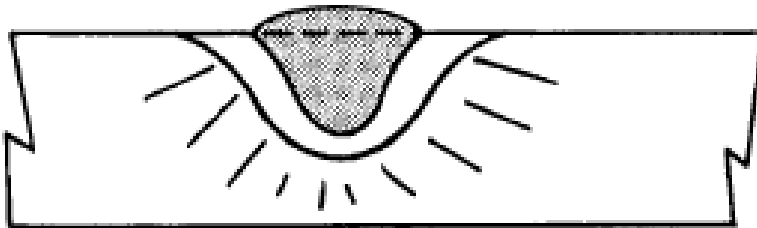




(A) Three Dimensional Heat Flow  
 $\tau \geq 0.9$



(B) Two Dimensional Heat Flow  
 $\tau \leq 0.6$

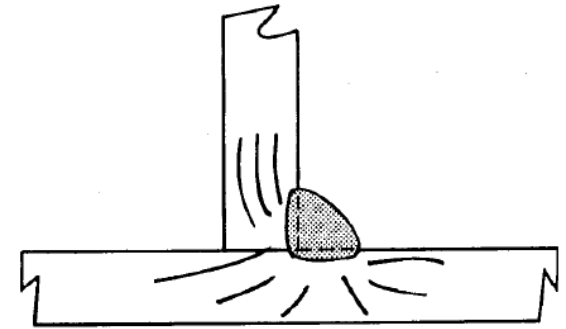


(C) Intermediate Condition — Neither Thick  
Nor Thin.  $0.6 < \tau < 0.9$

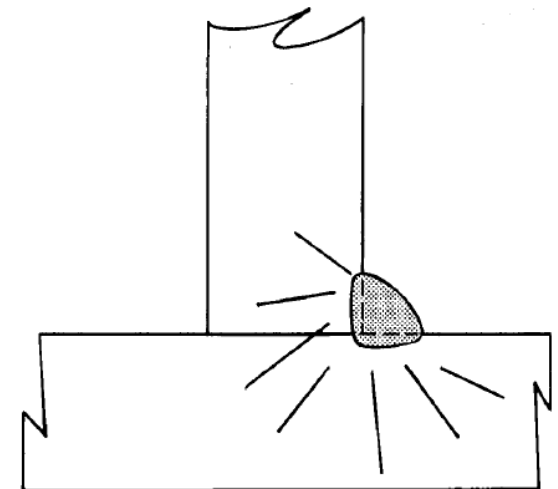
- The **thick plate** equation applies when  $T$  is greater than 0.9.
- The **thin plate** equation when  $T$  is less than 0.6.
- When  $T$  falls between 0.6 and 0.9, the upper bound of the cooling rate is given by the thick plate equation, and the lower bound by the thin plate equation.

The cooling of a weld depends on the **available paths for conducting heat** into the surrounding cold base metal.

- If a weld is deposited as a fillet weld in a 9 mm T-joint with a heat input of 804 j/mm, the web plate would absorb some of the heat, and the apparent thickness would be greater than indicated.
- To compensate for the extra heat sink, the heat input should be reduced by 1/3 to 536 j/mm.
- If the thick plate condition exists, the extra plate cannot provide additional apparent thickness.

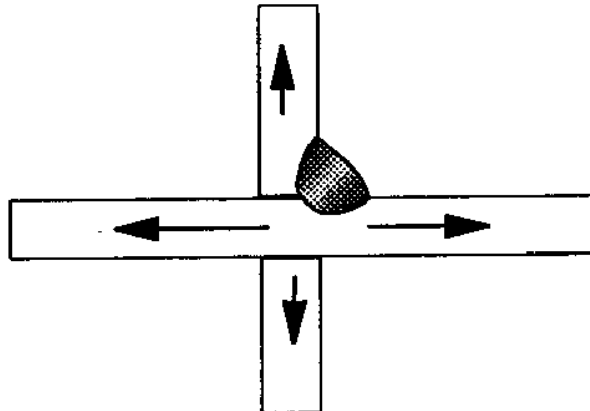
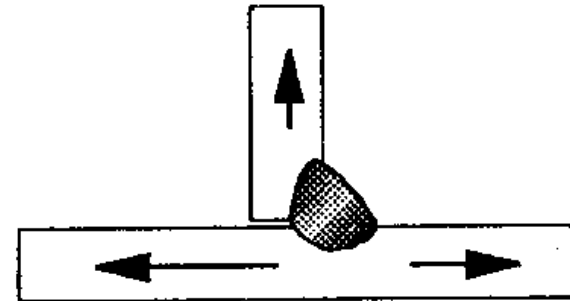
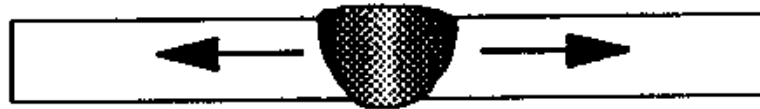


(A) Thin Plates — Extra Path Increases Apparent Base Metal Thickness



(B) Thick Plates — Extra Path Does Not Increase Apparent Base Metal Thickness

# Effect of Heat Flow Paths



Multi paths increase effective plate thickness

# Cooling Rate

- **THE FINAL METALLURGICAL** structure of the weld zone is primarily determined by the cooling rate from the maximum temperature achieved during the weld cycle (peak temperature).
- Because the **cooling rate changes with temperature**, when one speaks of a cooling rate, the **specific temperature**,  $T_c$ , at which it occurs must also be given.

# Cooling Rate

- To determine the cooling rate along the weld centerline (that is  $y = 0$ ) for a particular critical temperature, the cooling-rate equation can be reduced to:

- in a thick plate 
$$R = \frac{2\pi\lambda(T_c - T_0)^2}{H_{met}}$$

- in a thin plate 
$$R = 2\pi\lambda\rho C_p \left( \frac{t}{H_{met}} \right)^2 (T_c - T_0)^3$$

- $H_{net}$  = the net energy input equal to  $\eta EI/v$  (J/s · mm),
- $\rho$  = the density of the material (g/mm<sup>3</sup>),
- $C_p$  = the specific heat of solid metal (J/g · °C),
- $t$  = the thickness of the base metal (mm).

# Cooling Rate

- However, the cooling rate near the weld fusion boundary is only a few percent lower than on the center line. Accordingly, the **cooling rate equation applies to the entire weld** and the immediate heat affected zone.
- The major practical use of cooling rate equations is in the calculation of **preheat requirements**.

## PREHEAT TEMPERATURE AND CRITICAL COOLING RATE

- FROM THE COOLING rate equations, increasing the initial uniform temperature,  $T_0$ , of the base metal being welded has the effect of reducing the cooling rate.
- For each steel composition, there is a critical cooling rate; if the actual cooling rate in the weld metal exceeds this critical value, hard martensitic structures may develop in the heat-affected zone.
- The cooling rate equation can be used
  - (1) to determine the critical cooling rate (under welding conditions),
  - (2) to calculate preheat temperatures that avoid the formation of hard heat affected zones.

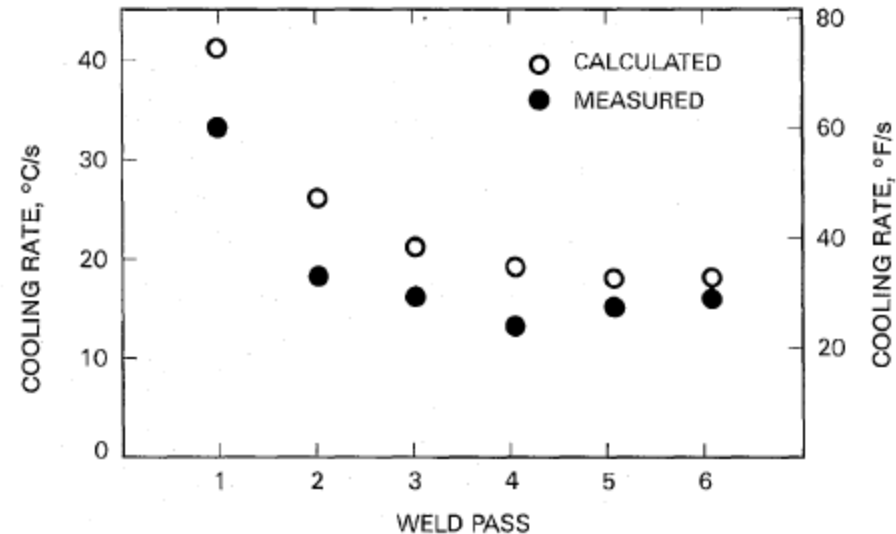
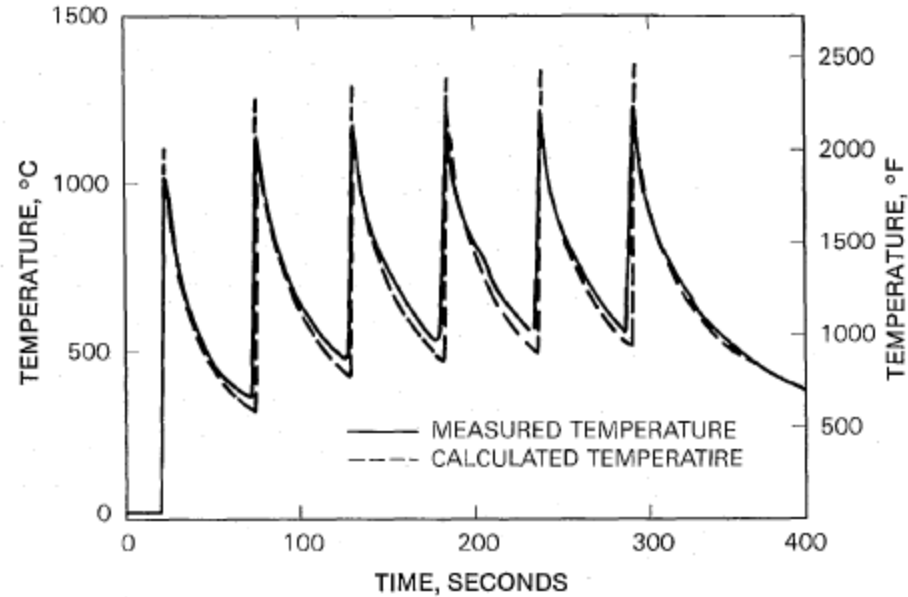
# Multiple Pass Weld Cycle

The effect of multiple passes on the calculated and measured weld thermal cycles

- The base metal of multi pass welds can be preheated by the initial weld passes.

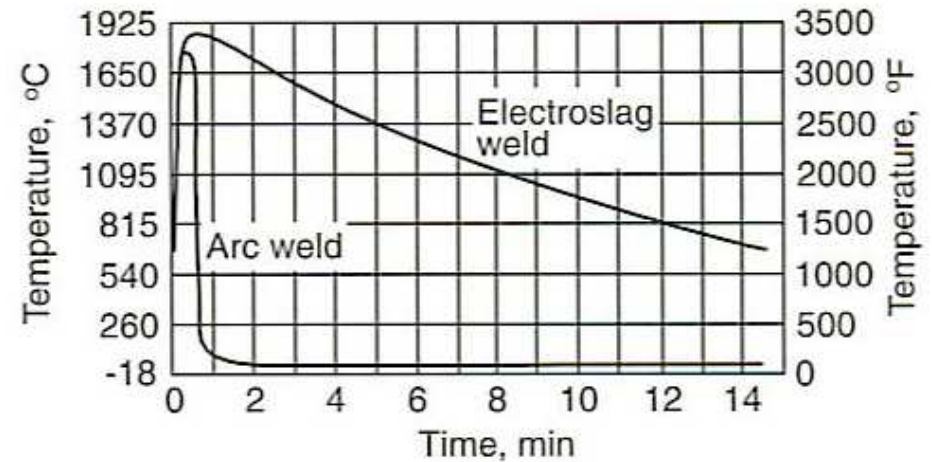
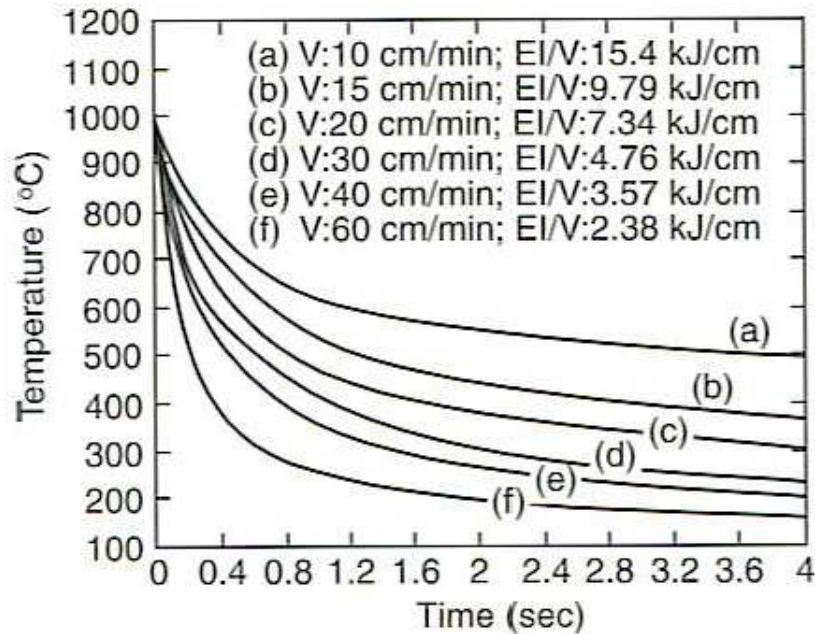
## Average Cooling Rates for Each Pass in a Multi pass Weld

- The effects are greatest on the second pass. As the preheat condition stabilizes after the second pass, the change in thermal cycle and the resultant change in cooling rate are less significant.





# Effect of heat input on cooling rate



The cooling rate in **ESW** (high  $Q/V$ ) is much smaller than that in **arc welding**.

Heat input per unit length  $EI/V$



Cooling rate



# Peak Temperature

- PREDICTING or INTERPRETING metallurgical transformations at a point in the solid metal near a weld requires some knowledge of the maximum or peak temperature reached at a specific location.
- The distribution of **peak temperatures** in the base metal adjacent to the weld is given by:

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13\rho C_p t Y}{H_{met}} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

where

- $T_p$  = the peak or maximum temperature, °C, at a distance,  $Y$  (mm), from the weld fusion boundary (The peak temperature equation does not apply at points within the weld metal, but only in the adjacent heat-affected zone.)
- $T_m$  = melting temperature, °C
- $T_0$  = initial temperature, °C


At the fusion boundary ( $y = 0$ ), the peak temperature ( $T_p$ ) is equal to the melting temperature ( $T_m$ ).

# Peak Temperature

- The peak temperature equation can be used for several purposes including:
  1. the determination of peak temperatures at specific locations in the heat-affected zone,
  2. estimating the width of the heat-affected zone,
  3. showing the effect of preheat on the width of the heat-affected zone.

# Peak Temperature

- For example, a single, complete joint penetration weld pass is made on steel using the following conditions:
- $E = 20\text{V}$ ,  $I = 200\text{ A}$ ,  $V = 5\text{ mm/s}$ ,  $T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_m = 1510\text{ }^\circ\text{C}$
- $\rho C_P$  (VOLUMETRIC SPECIFIC HEAT) =  $0.0044\text{ j/mm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$
- $t = 5\text{ mm}$
- $\eta = 0.9$
- *The peak temperature at 1.5 and 3.0 mm????????????????*

  $\left\{ \begin{array}{l} \text{at } Y = 1.5\text{ mm}, T_p = 1184\text{ }^\circ\text{C} \\ \text{at } Y = 3.0\text{ mm}, T_p = 976\text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right.$

# Width of Heat-Affected Zone

Peak temperature equation  width of the heat-affected zone is proportional to the heat input.

NET HEAT INPUT 

HEAT-AFFECTED-ZONE WIDTH 

# Solidification Rate

- **Solidification rate** can have a significant effect on metallurgical structure, properties, response to heat treatment, and soundness.
- The solidification time,  $S_t$ , of weld metal, measured in seconds, is:

$$S_t = \frac{LH_{net}}{2\pi\lambda C_p (T_m - T_o)^2}$$

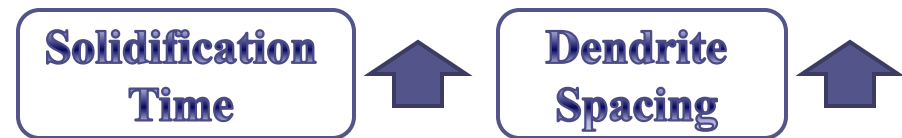
where

- $S_t$  = solidification time; the time lapse from beginning to end of solidification at a fixed point in the weld metal, s
- $L$  = heat of fusion, J/mm<sup>3</sup>

# Solidification Rate and Dendrite Spacing

**Solidification Time** → directly affects the structure of weld metal.

- Most alloys of commercial importance **freeze dendritically**, and an important structural feature of weld metal is the **dendrite spacing** (more exactly, dendrite arm spacing).



- Because weld metal solidification times are rapid, the spacing between dendrites is small, and a very fine microstructure results.
- Longer solidification times result in larger dendrite spacing and coarser microstructures.
- The mechanical properties of weld metals with fine microstructures are generally better than those with coarse microstructures.



The **final weld metal properties** are a result of

**The solidification time  
&  
The weld metal cooling rate.**

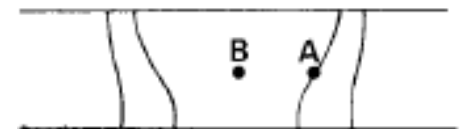
- The solidification time at the fusion boundary is greater than at the centerline.
- The microstructure is finer at the centerline than at the weld fusion line.
- If the heat input is increased, the solidification times at both the fusion boundary and the weld center line increase, and the dendrite spacing increases accordingly.



(A) Fusion Boundary



(B) Weld Centerline

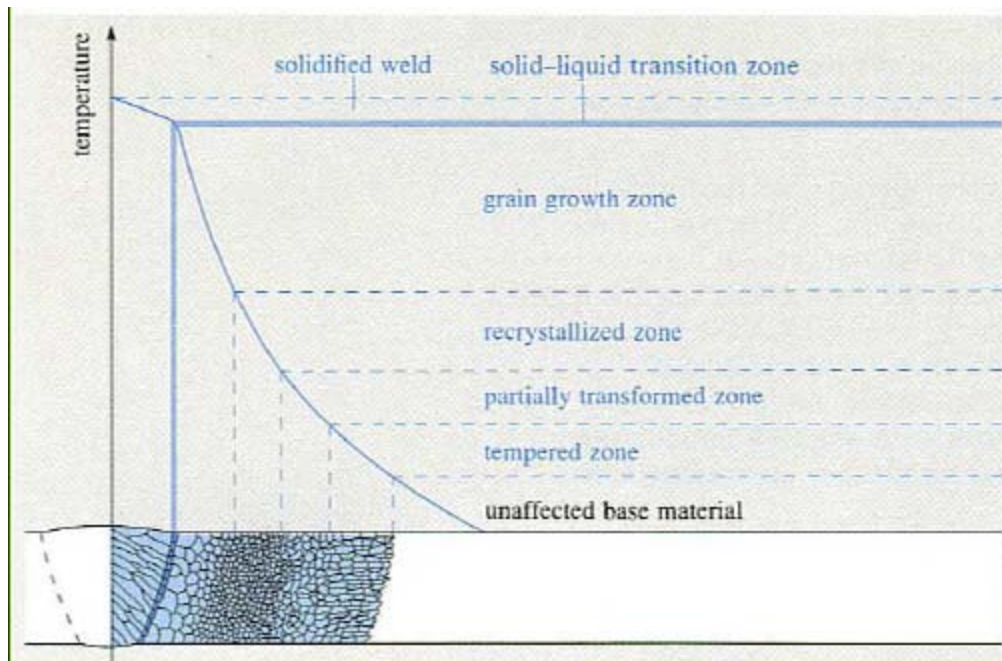


**Subgrain Structure of the Weld:**



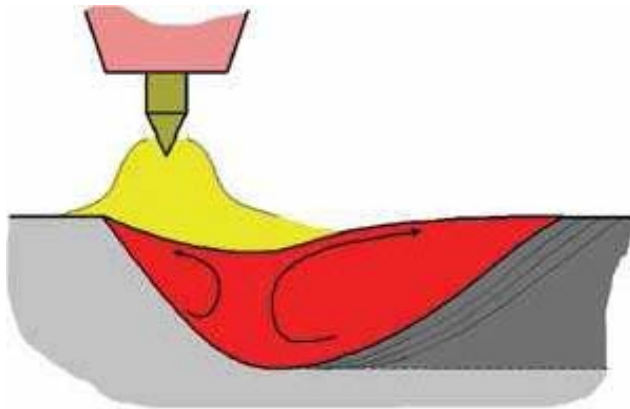
## Effect of temperature gradient on weld microstructure

The **temperature gradients** in the liquid weld material are substantially higher than in most casting processes. This leads to high **solidification rates** which produce a **finer dendritic structure** than that observed in most castings.

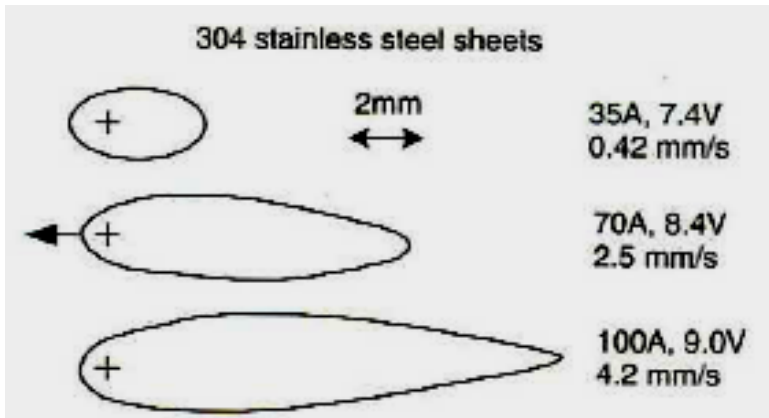


Microstructures occurring in a weld and its HAZ.

## Effect of heat input and welding speed on the weld pool



The shape and size of the weld pool is significantly affected by heat input  $Q$  and the welding speed  $V$ .



 **Heat input** *The weld pool becomes more elongated.*

 **Welding speed**

Note: the cross indicates the position of the electrode.