








# مٲالورژی جوش

**TABLE 5.1 List of the Various Fundamental and Specific Sources of Energy for Welding**

Energy Source	Example Processes
<b>Mechanical</b>	
Friction	FRW, USW
Plastic deformation	
Cold work	CW, FOW, ROW
Warm or hot work	HPW, FOW, ROW, EXW <sup>a</sup>
<b>Chemical</b>	
Oxyfuel combustion	OFW, PGW, <sup>b</sup> AHW <sup>c</sup>
Aluminothermic reactions	TW, FOW <sup>b</sup>
Solid-state chemical reactions	Reactive brazing, chemical deposition/ reaction vapor deposition, electrochemical deposition <sup>d</sup>
<b>Electrical</b>	
Electric arc	AHW, <sup>c</sup> CAW, SMAW, FCAW, SW, GTAW, PAW, GMAW, SAW, EGW, MIAB <sup>e</sup>
Internal resistance (Joule heating)	RSW, RSEW, PW or RPW, PEW, UW, <sup>e</sup> FW, <sup>e</sup> IW, ESW <sup>c</sup>
Radiant energy	EBW, LBW, IR welding, imaging arc or arc image welding
<b>Thermal (only)</b>	
Diffusion welding or brazing	DFW, <sup>f</sup> DFB

## برخی از مفاهیم در انرژی جوشکاری

**TABLE 5.2 Typical Values of Energy Density and the Type of Penetration for Various Sources Used in Welding**

Process	Heat Source Intensity ( $\text{Wm}^{-2}$ )	Condition	Fused Zone Profile
Flux-shielded arc welding	$5 \times 10^6$ to $5 \times 10^8$		
Gas-shielded arc welding	$5 \times 10^6$ to $5 \times 10^8$	Normal current	
		High current	
Plasma	$5 \times 10^6$ to $5 \times 10^{10}$	Low current	
		High current	
Electron beam and laser	$10^{10}$ to $10^{12}$	Defocused beam	
		Focused beam	

Source: From *Welding of Metallurgy* by J. F. Lancaster, 4th ed., Table 2.2, page 12, Allen & Unwin, London, UK, 1987, with permission from Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

محتوای انرژی (Energy level or capacity) ➡

توان انتقالی (Transferred power) ➡

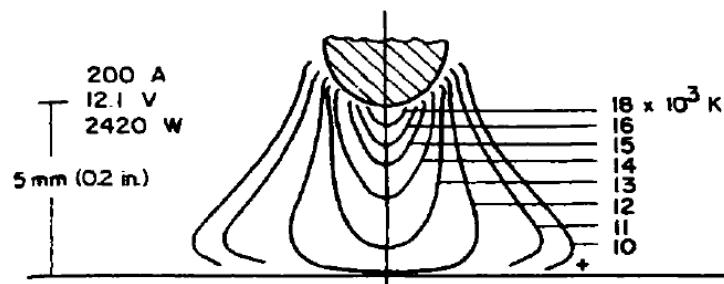
شدت یا چگالی منبع (Energy density) ➡

توزیع انرژی (Energy distribution) ➡

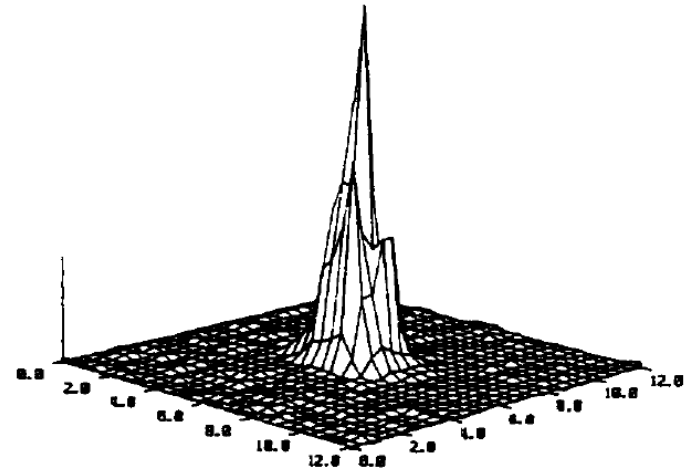
انرژی ورودی به جوش (Energy input to a weld) ➡

$$H = \frac{P}{v}$$

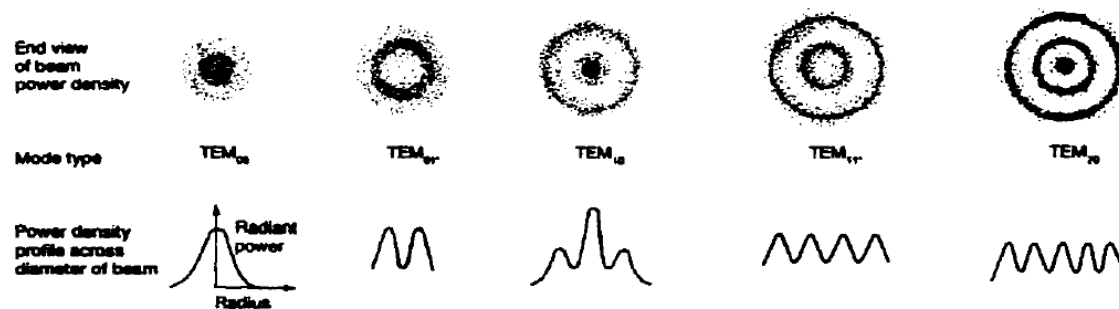
$$H = \frac{EI}{v}$$



(a)



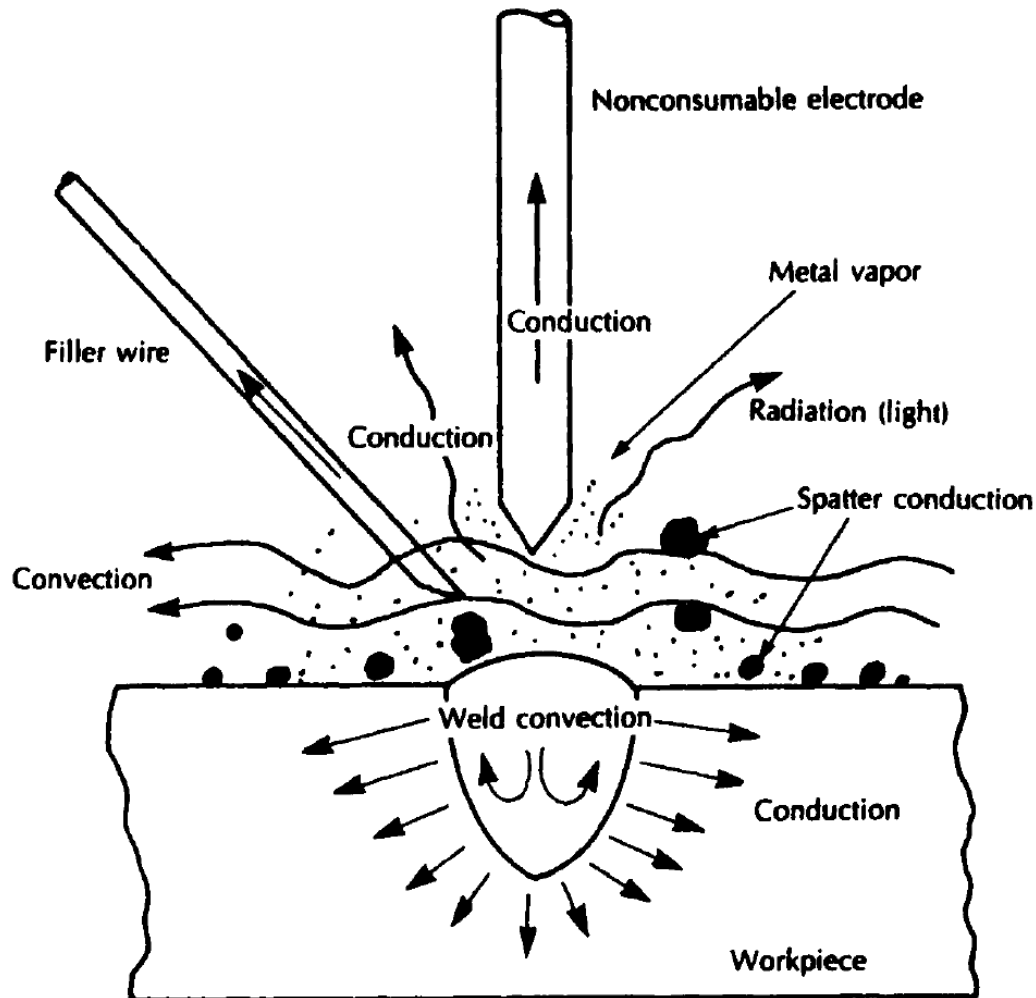
(b)



(c)

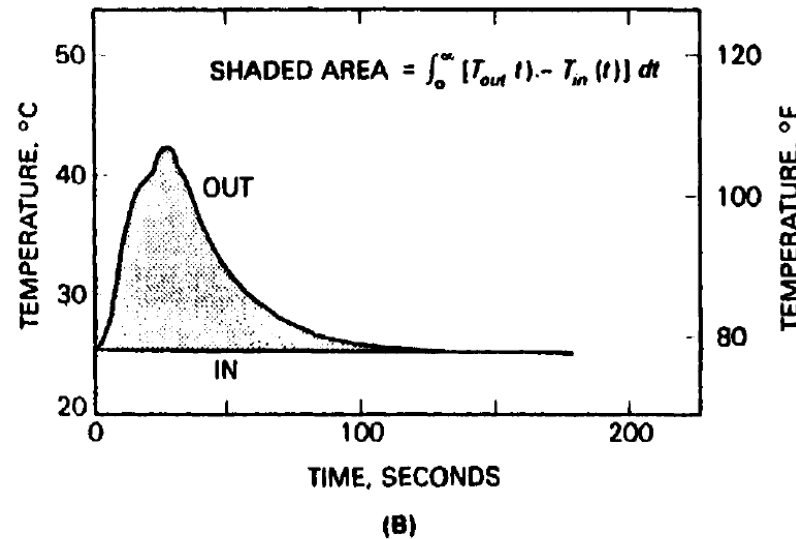
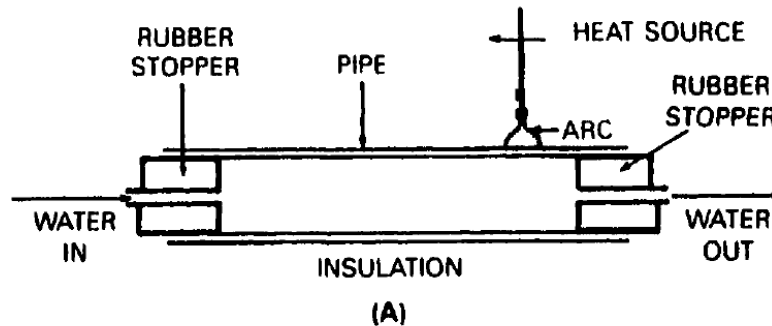
**Figure 5.1** Typical energy density distribution for (a) an argon-shielded tungsten arc (From *Welding Handbook*, Vol. 1: *Welding Technology*, 8th ed., edited by L. P. Connor, published in 1987 by and used with permission of the American Welding Society, Miami, FL), (b) an electron beam (From *Electron Beam Welding* by H. Schultz, published in 1993 by and used with permission of Abington Publishing, Cambridge, UK), and (c) various different-purpose laser beams (From *Laser Welding* by C. Dawes, published in 1992 by and used with permission of McGraw-Hill/Abington Publishing, Cambridge, UK).

## اتلاف انرژی (در حین انتقال انرژی به قطعه کار)



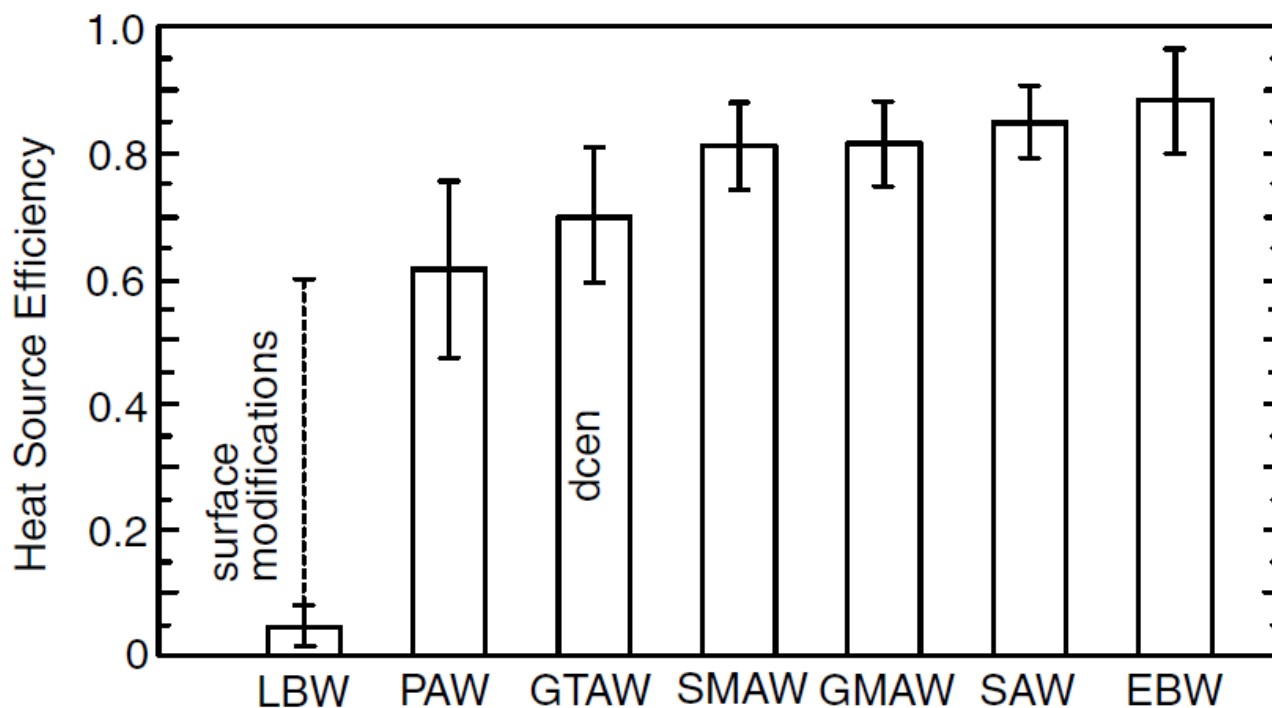
$$H_{net} = \eta \frac{EI}{v}$$

## اندازه گیری راندمان یا بازده منبع حرارتی



$$WC(T_{out} - T_{in})dt = \eta EIt_{weld}$$

## راندمان منبع حرارتی در فرآیندهای مختلف جوشکاری



**Figure 2.7** Heat source efficiencies in several welding processes.

## حرارت ورودی و سطح مقطع جوش

$$H_{\text{net}} = \frac{f_1 VI}{S_w} \text{ J/mm}$$

$$H_m = \frac{f_1 f_2 VI}{S_w}$$

$$\text{where } f_2 = \frac{\text{Heat required to melt the joint}}{\text{Net heat supplied.}}$$

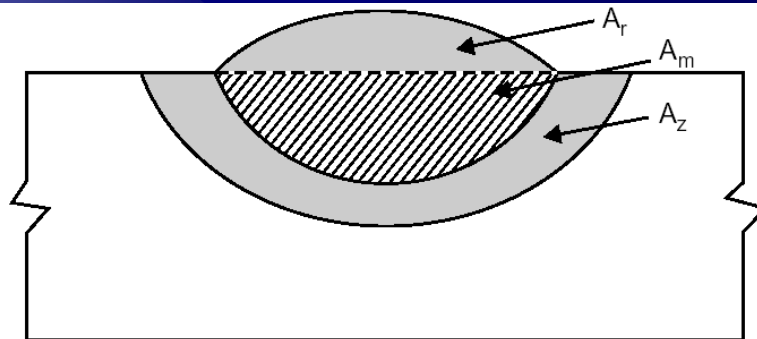


Fig. 3.16 Bead-on-plate cross section

$$A_w = \frac{f_1 f_2 EI}{QV}$$

→ سطح مقطع ذوب شده از فلز پایه ( $A_m$ )

→ سطح مقطع ذوب شده از فلز پرکننده ( $A_r$ )

→ سطح مقطع جوش ( $A_w$ )



## حرارت ورودی و سطح مقطع جوش

مسأله : محاسبه بازده ذوب در جوشکاری فولاد:

شدت جریان جوشکاری: ۲۰۰ A

Volume of base metal melted =  $20 \times 5 = 100 \text{ mm}^3/\text{s}$

Heat required for melting =  $100 \times 10 = 1000$

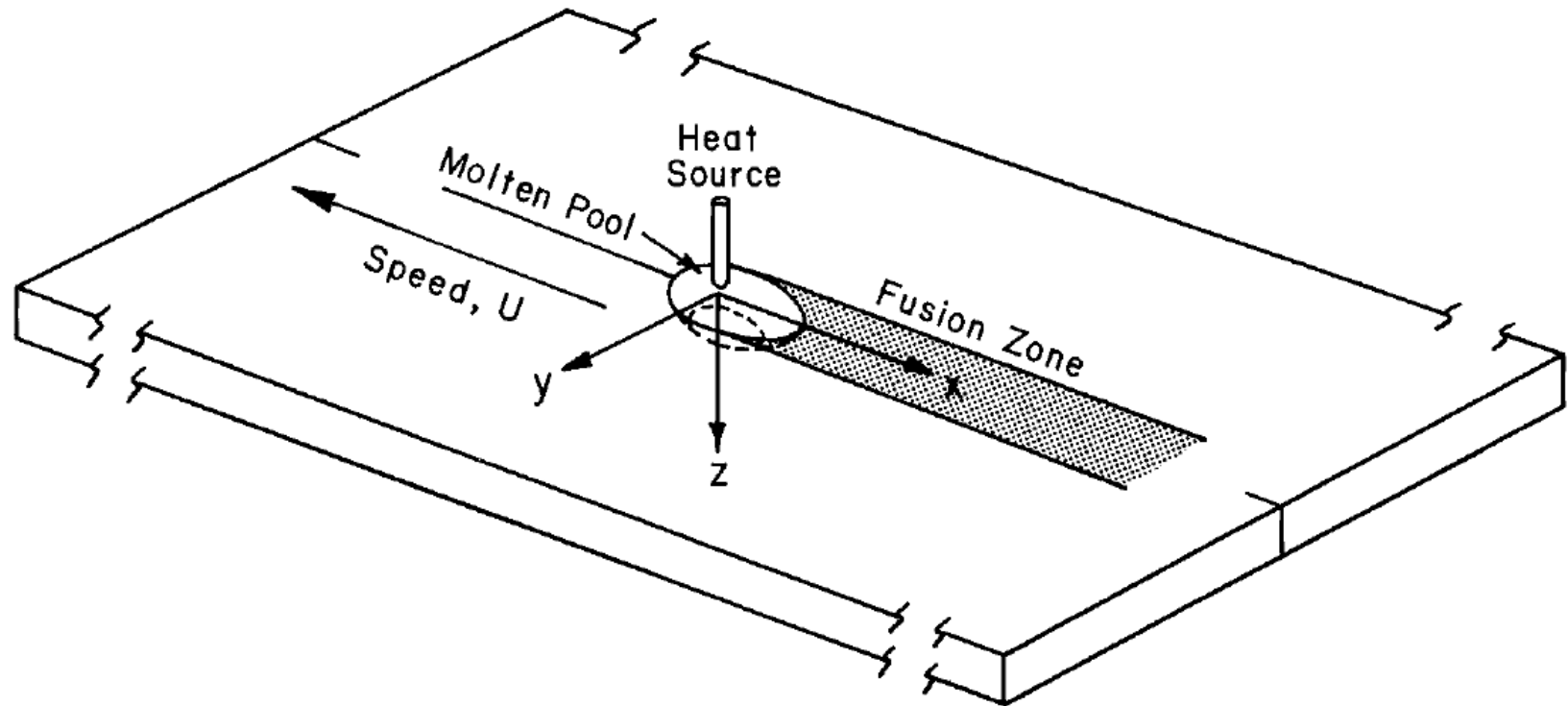
$$f_2 = \frac{1000}{f_1 VI} = \frac{1000}{0.85 \times 20 \times 200} = 0.2941 = 29.41\%$$

سطح مقطع جوش: ۲۰ mm<sup>۲</sup>

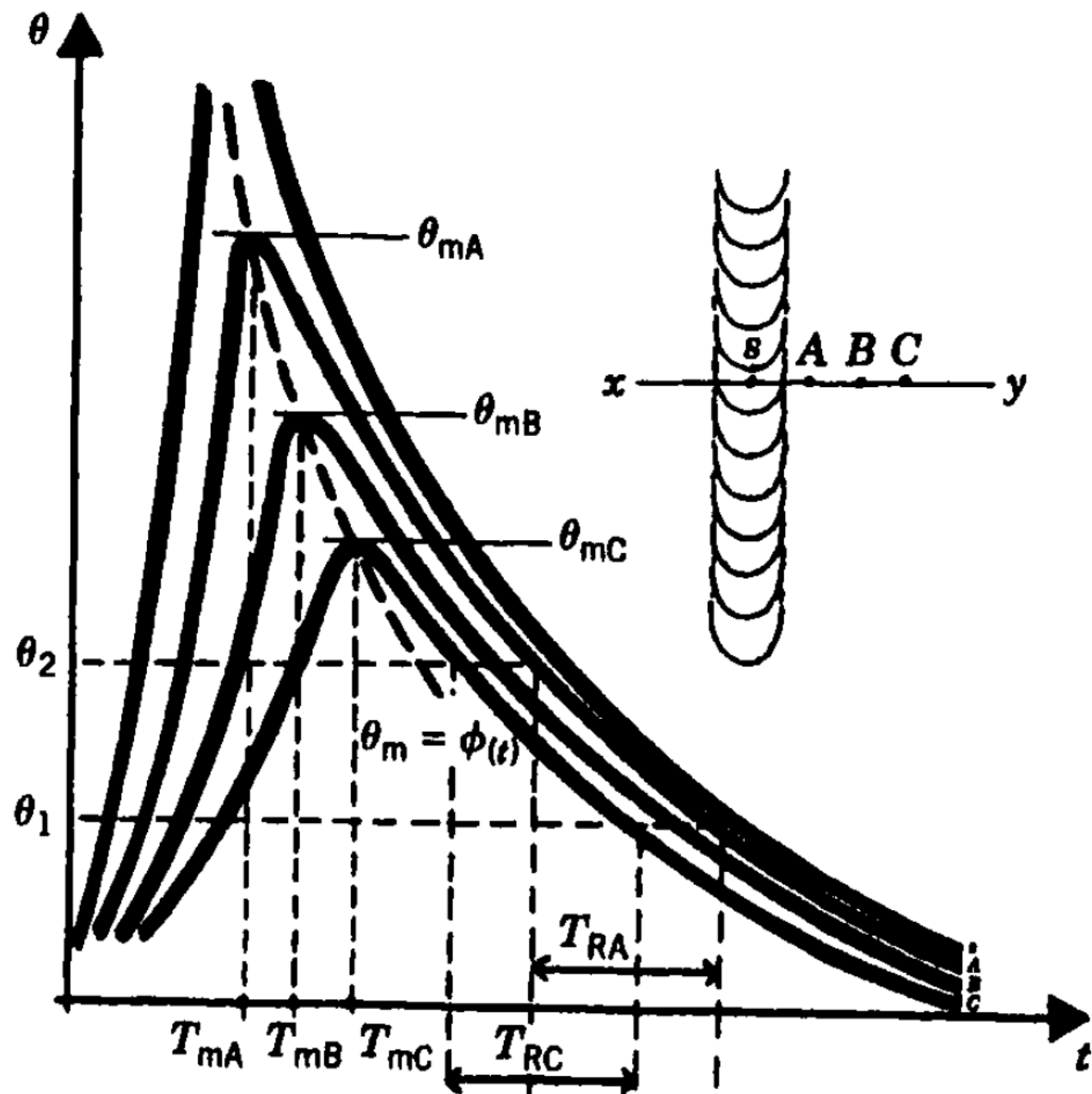
حرارت لازم برای ذوب فولاد: ۱۰ J/mm<sup>۳</sup>

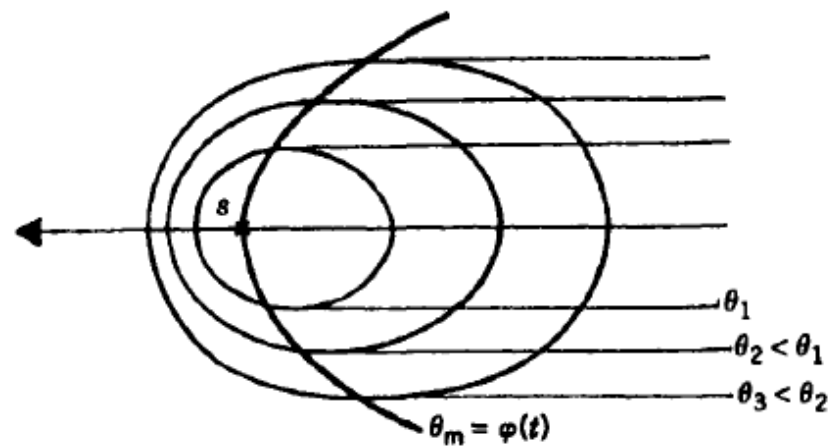
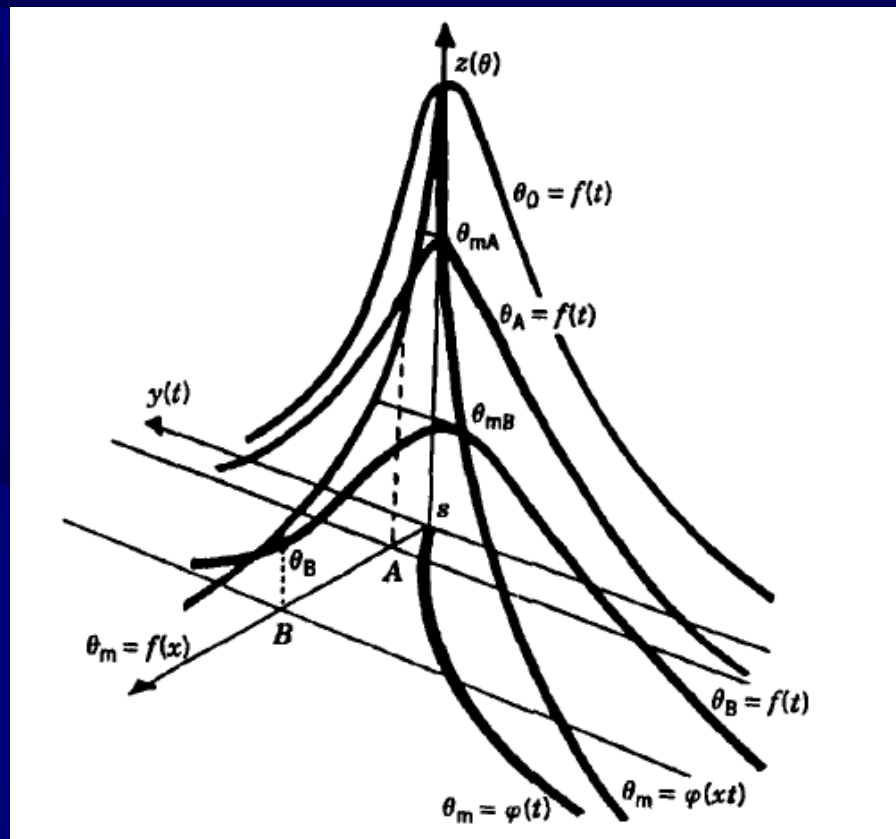
بازده انتقال حرارتی: ۸۵/۰

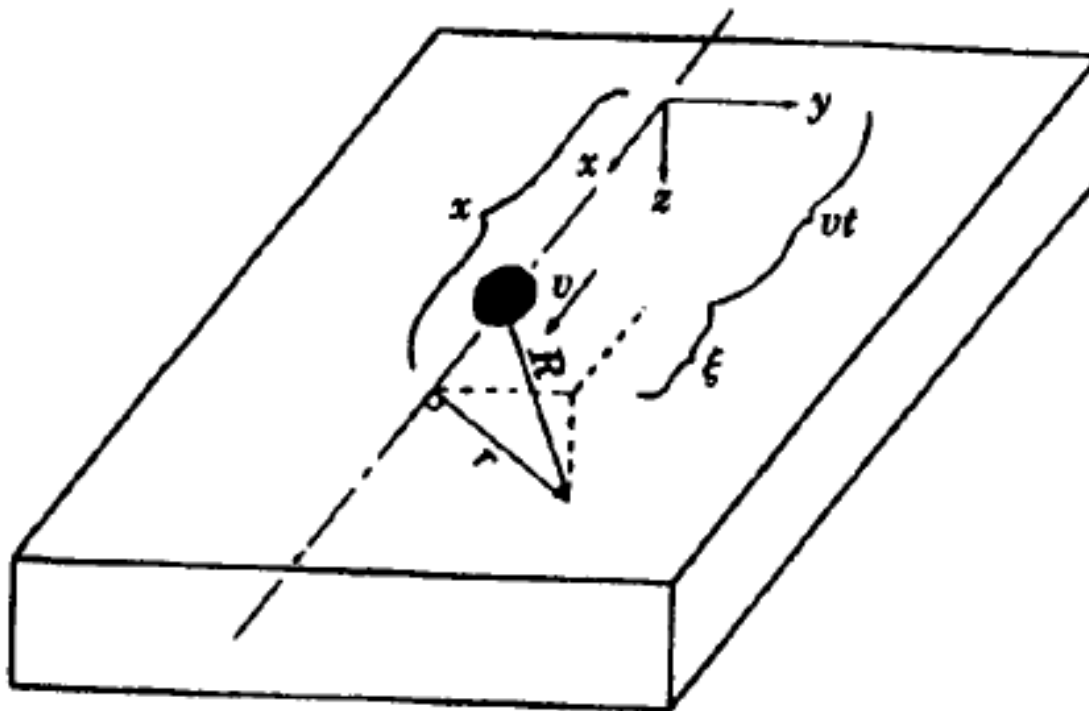
## آنالیز جریان حرارت در جوشکاری



**Figure 2.14** Coordinate system  $(x, y, z)$  moving with heat source. From Kou and Le (24).

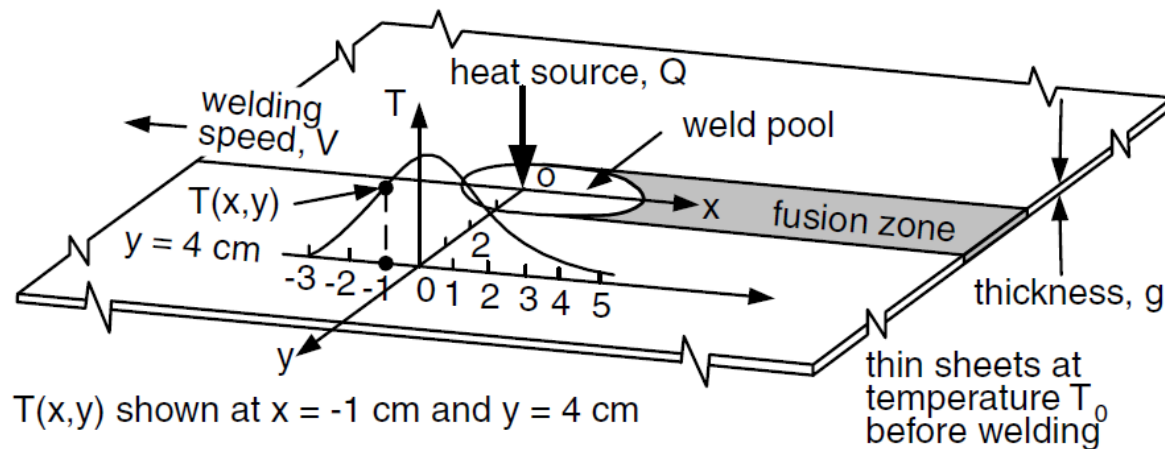






$$\xi \equiv x - vt$$

## معادلات دو بعدی Rosenthal



**Figure 2.15** Two-dimensional heat flow during welding of thin workpiece.

$$T - T_0 = \frac{q/v}{d(4\pi k\rho Ct)^{1/2}} e^{-r^2/4\alpha t}$$

$q$  = heat input from the welding source (in J/m)

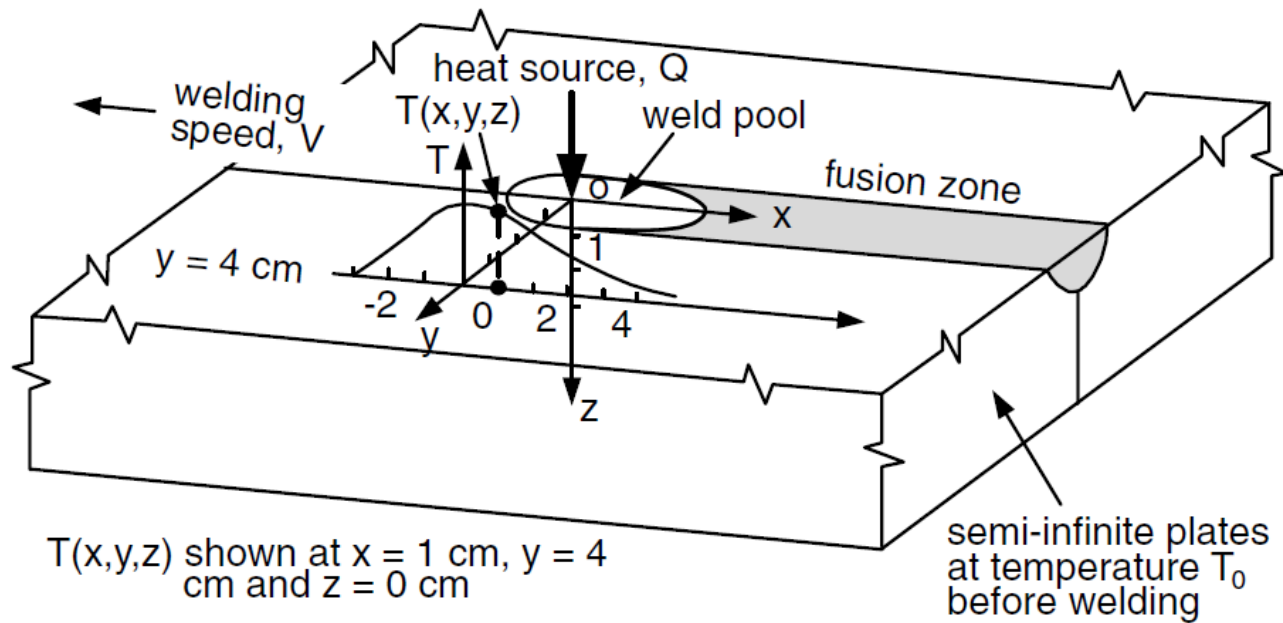
$k$  = thermal conductivity (in  $\text{J/m s}^{-1} \text{K}^{-1}$ )

$\alpha$  = thermal diffusivity =  $k/\rho C$ , (in  $\text{m}^2/\text{s}$ )

$K_0$  = a Bessel function of the first kind, zero order<sup>7</sup>

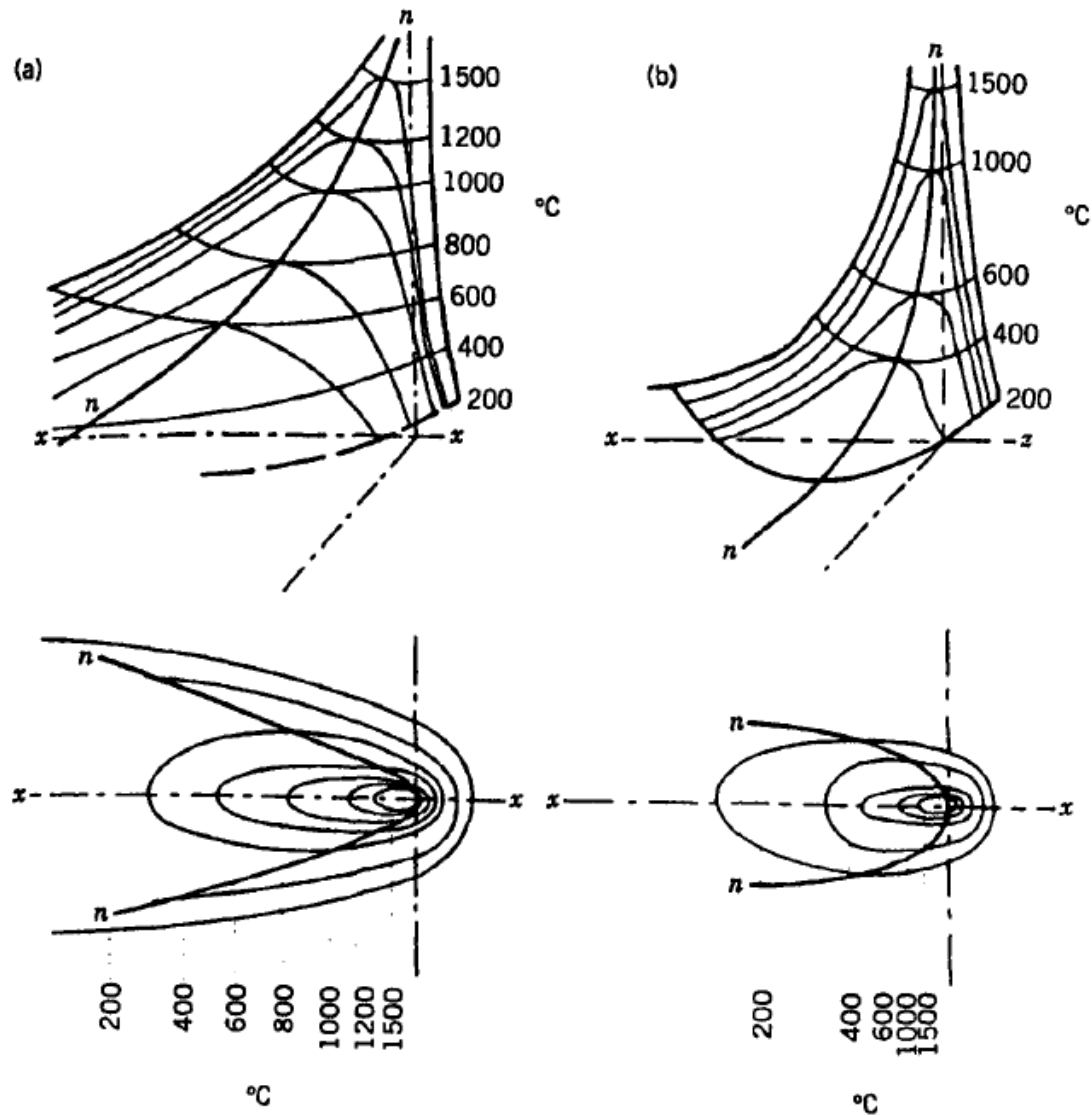
$R = (\xi^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ , the distance from the heat source to a particular fixed point (in m).

## معادلات سه بعدی Rosenthal



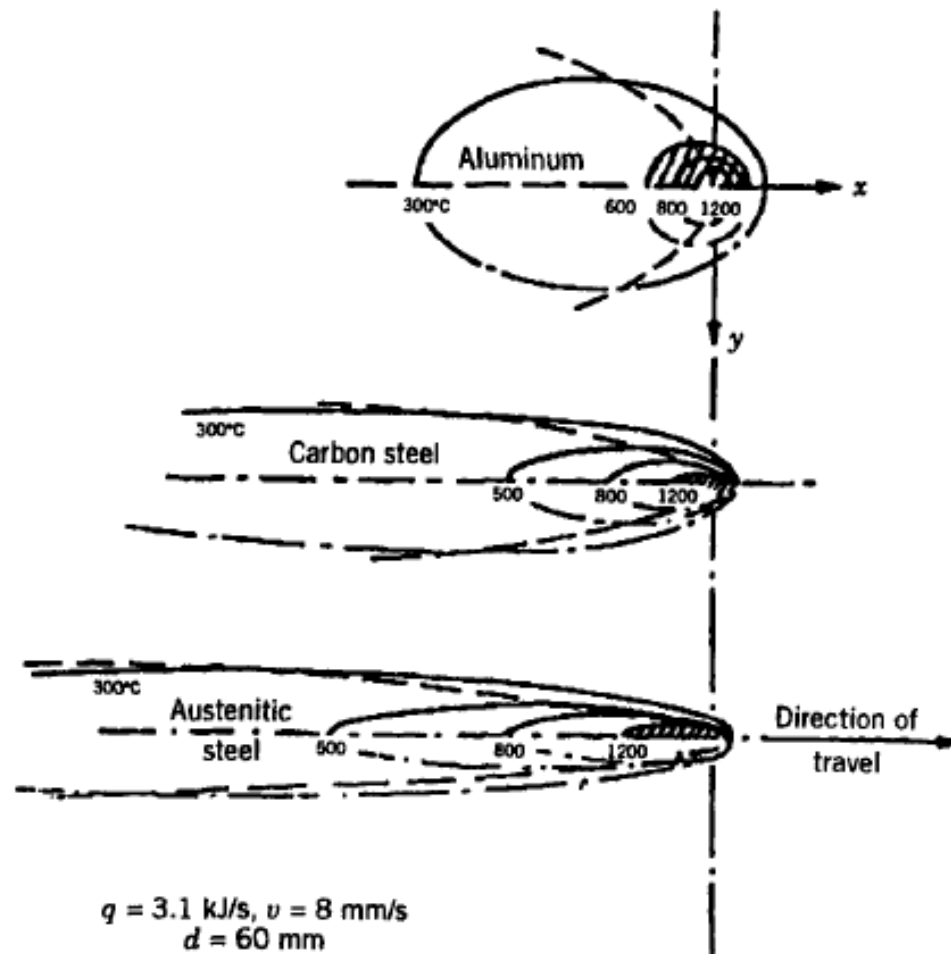
**Figure 2.17** Three-dimensional heat flow during welding of semi-infinite workpiece.

$$T - T_0 = \left( \frac{q/v}{2\pi kt} \right) e^{-r^2/4\alpha t}$$

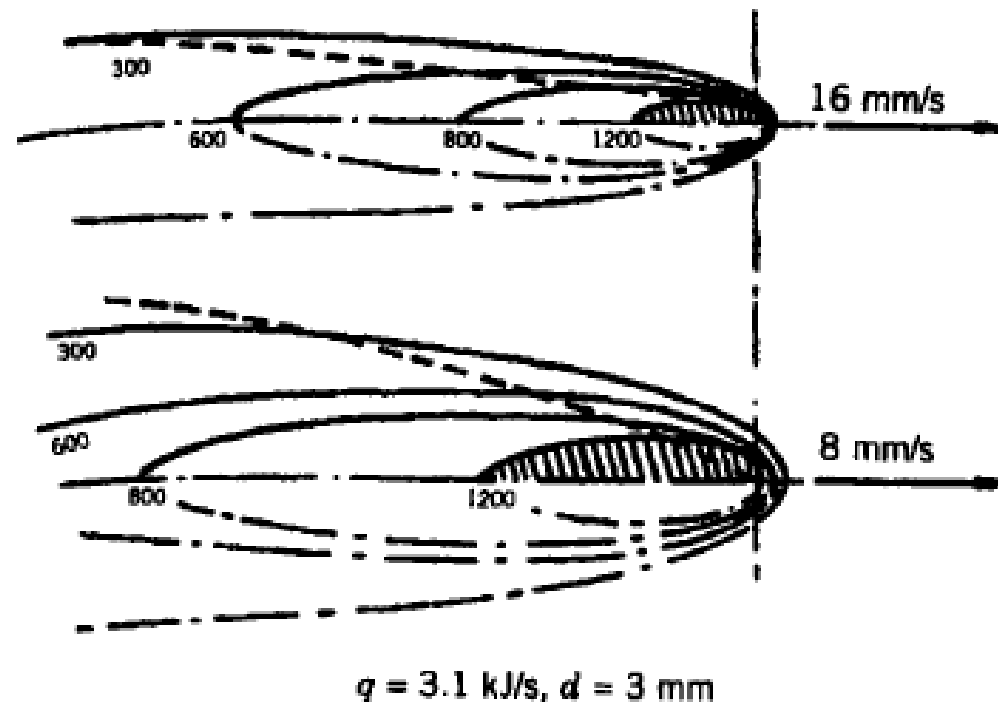


**Figure 6.13** The temperature distribution fields obtained from solution of Rosenthal's simplified 2-D and 3-D equations for (a) thin and (b) thick plates, respectively. (From *Joining of Advanced Materials* by R. W. Messler, Jr., published in 1993 by and used with permission of Butterworth-Heinemann, Woburn, MA.)

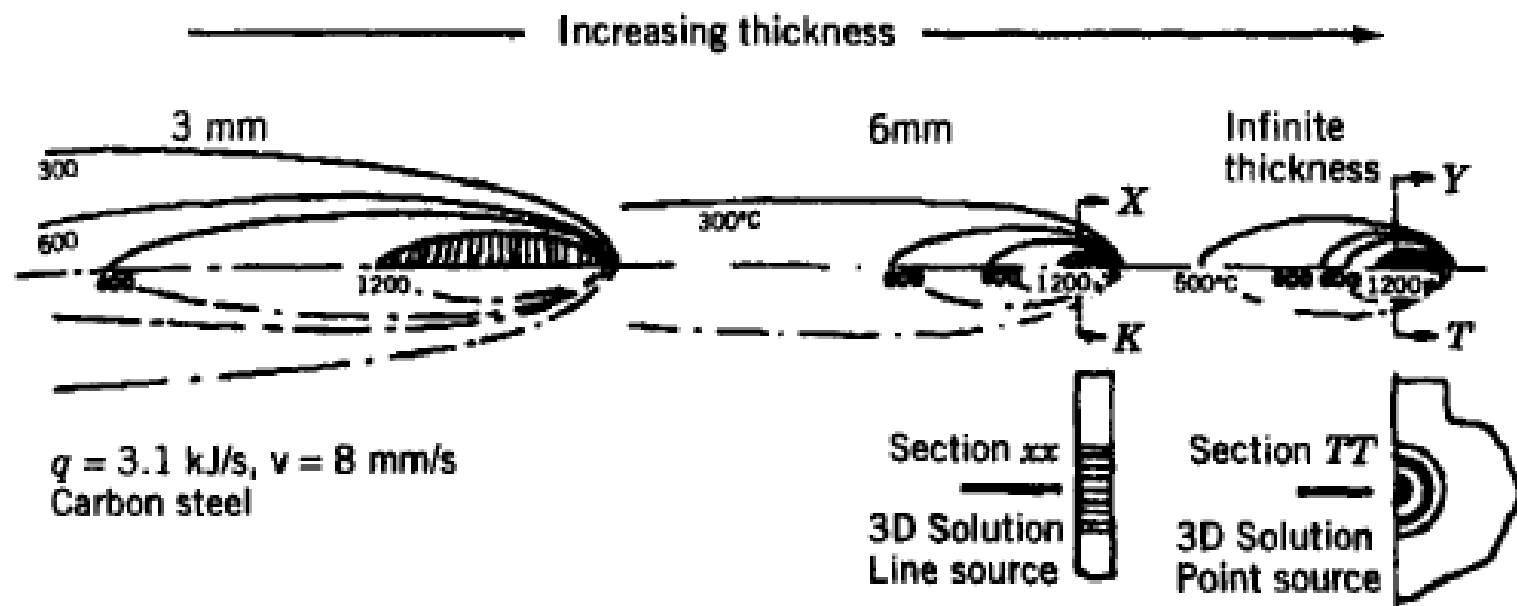




**Figure 6.16** Effect of the thermal conductivity of a base material on weld pool (fusion zone) and surrounding heat-affected zone size and shape. (From *Joining of Advanced Materials* by R. W. Messler, Jr., published in 1993 by Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, and after T. G. Gray et al., *Rational Welding Design*, originally published in 1975 by and used with permission of Butterworth-Heinemann, London.)



**Figure 6.17** Effect of the speed of welding on the weld pool (fusion zone) and surrounding heat-affected zone size and shape. (From *Joining of Advanced Materials* by R. W. Messler, Jr., published in 1993 by Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, and after T. G. Gray et al., *Rational Welding Design*, originally published in 1975 by and used with permission of Butterworth-Heinemann, London.)



**Figure 6.18** Effect of the thickness of a weldment on the weld pool (fusion zone) and surrounding heat-affected zone. (From *Joining of Advanced Materials* by R. W. Messler, Jr., published in 1993 by Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, and after T. G. Gray et al., *Rational Welding Design*, originally published in 1975 by and used with permission of Butterworth-Heinemann, London.)

## معادلات Adams

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13VYg\rho C}{Q} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{5.44\pi k\alpha}{QV} \left[ 2 + \left( \frac{VY}{2\alpha} \right)^2 \right] + \frac{1}{T_m - T_0}$$

# معادله انتقال حرارت و سیکل حرارتی جوش

هدف:

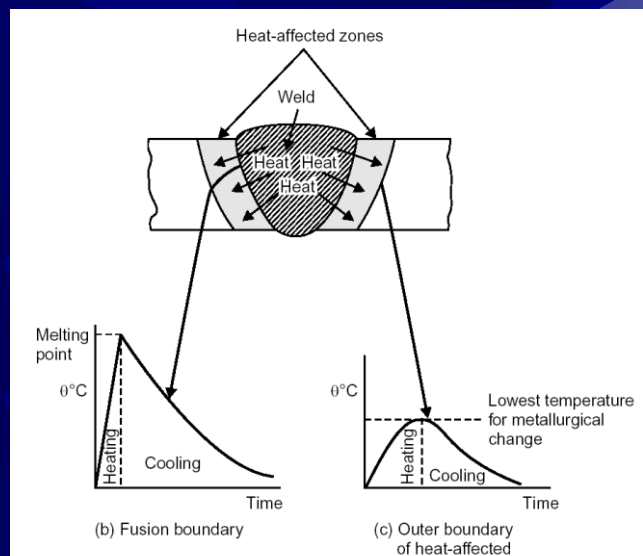
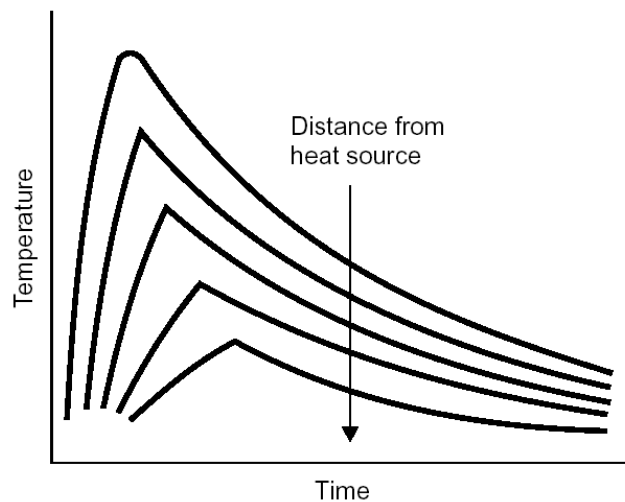
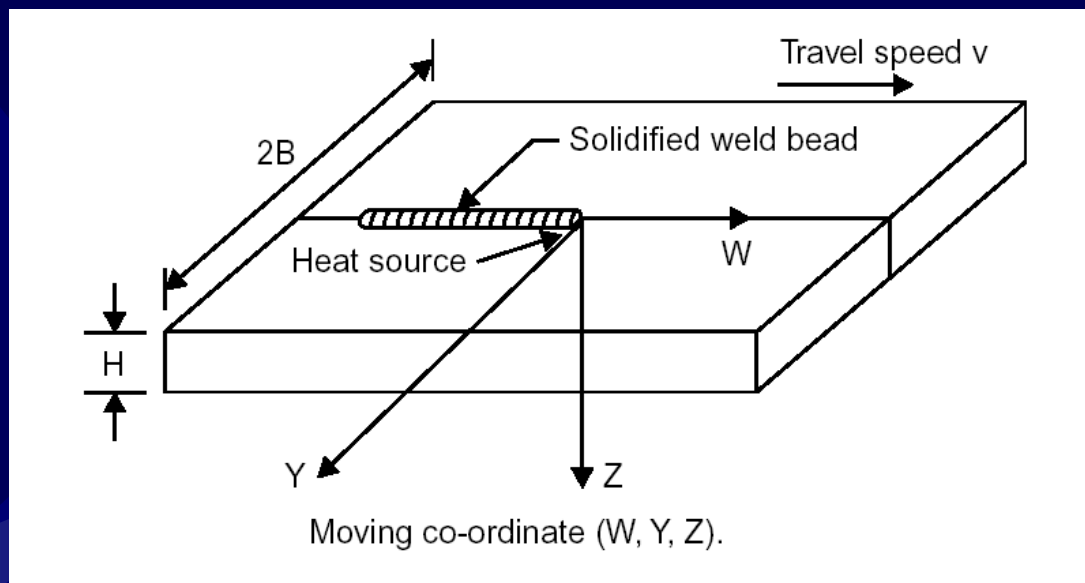
👉 تعیین دمای بیشینه ( $T_p$ ) در هر نقطه از ماده در حین جوشکاری

تخمین پهنای جوش

تخمین پهنای HAZ

تأثیر پیش گرمایش بر روی پهنای جوش

👉 تعیین نرخ سرمایش



$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13 \rho C t Y}{H_{\text{net}}} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

مسأله : محاسبه دمای بیشینه (پیک) در جوش تک پاسی با نفوذ کامل در فواصل ۵/۱ و ۳ mm

از مرز ذوبی:

$$E = 20 \text{ V}, I = 200 \text{ A}, v = 5 \text{ mm/s}, T_0 = 25^\circ\text{C}, T_m = 1510^\circ\text{C}$$
$$\rho_C = 0.0044 \text{ J/mm}^3 \cdot ^\circ\text{C}, t = 5 \text{ mm}, f_1 = 0.9 \quad H_{net} = 720 \text{ J/mm}.$$

(i) At  $Y = 1.5 \text{ mm}$ .

$$\frac{1}{T_p - 25} = \frac{4.13 (0.0044) 5(1.5)}{720} + \frac{1}{1510 - 25}$$

$$T_p = 1184^\circ\text{C}. \quad \text{Note that at } Y = 0, \quad T_p = T_m.$$

(ii) At  $Y = 3.0 \text{ mm}$

$$\frac{1}{T_p - 25} = \frac{4.13 (.0044) 5(3)}{720} + \frac{1}{1510 - 25}$$

$$T_p = 976^\circ\text{C}.$$

## مسأله : محاسبه پهنای ناحیه HAZ:

دمای مرز خارجی HAZ؟

مرز حاکاکی (اچ) مشخص در دمای ۷۳۰ سانتیگراد در بیشتر فولادهای کربنی و کم آلیاژ

$$\frac{1}{730 - 25} = \frac{4.13 (0.0044) 5 Y_Z}{720} + \frac{1}{1510 - 25}$$
$$Y_Z = 5.9 \text{ mm}$$

تأثیر تمپر فولاد پایه قبل از جوشکاری در دمای ۴۳۰ سانتیگراد بر پهنای HAZ:

$$\frac{1}{(430 - 25)} = \frac{4.13 (0.0044) (5) Y_Z}{720} + \frac{1}{1510 - 25} = 14.2 \text{ mm}$$



نتیجه : تأثیر ترکیب شیمیایی و سابقه عملیات حرارتی و مکانیکی بر وسعت ناحیه HAZ

انجام پیش گرمایش در دمای ۲۰۰ در قطعه قبل (تمپر شده)

$$\frac{1}{430 - 200} = \frac{4.13 (0.0044) (5) Y_Z}{720} + \frac{1}{1510 - 200}$$
$$Y_Z = 28.4 \text{ mm.}$$

نتیجه : افزایش وسعت ناحیه HAZ با پیشگرم کردن

تأثیر افزایش حرارت ورودی به میزان ۵۰٪ بر پهنای HAZ:

$$\frac{1}{430 - 25} = \frac{4.13 (0.0044) (5) Y_Z}{1080} + \frac{1}{1510 - 25}$$
$$Y_Z = 21.3 \text{ mm. Ans.}$$

## نرخ سرمایش

$$R = \frac{2\pi K(T_C - T_0)^2}{H_{\text{net}}}$$

صفحات ضخیم 

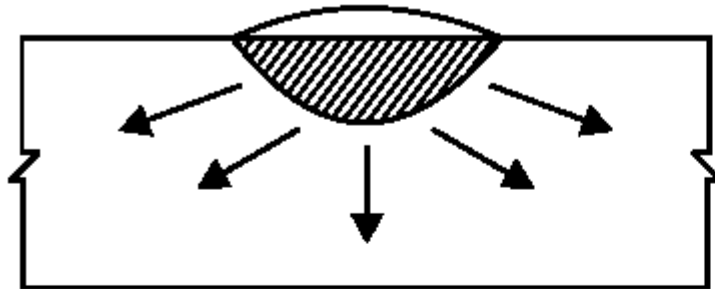
$$R = 2\pi K \rho C \left( \frac{t}{H_{\text{net}}} \right)^2 (T_C - T_0)^3$$

صفحات نازک 

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho c (T_C - T_o)}{H_{\text{net}}}}$$

پارامتر بدون بعد "ضخامت نسبی ورق" 

## نرخ سرمایش



Three dimensional heat flow  $\tau > 0.9$



Intermediate condition  $0.6 < \tau < 0.9$



Two dimensional heat flow  $\tau < 0.6$

# انجماد جوش

👉 وابستگی خواص منطقه ذوب و انجمادی به

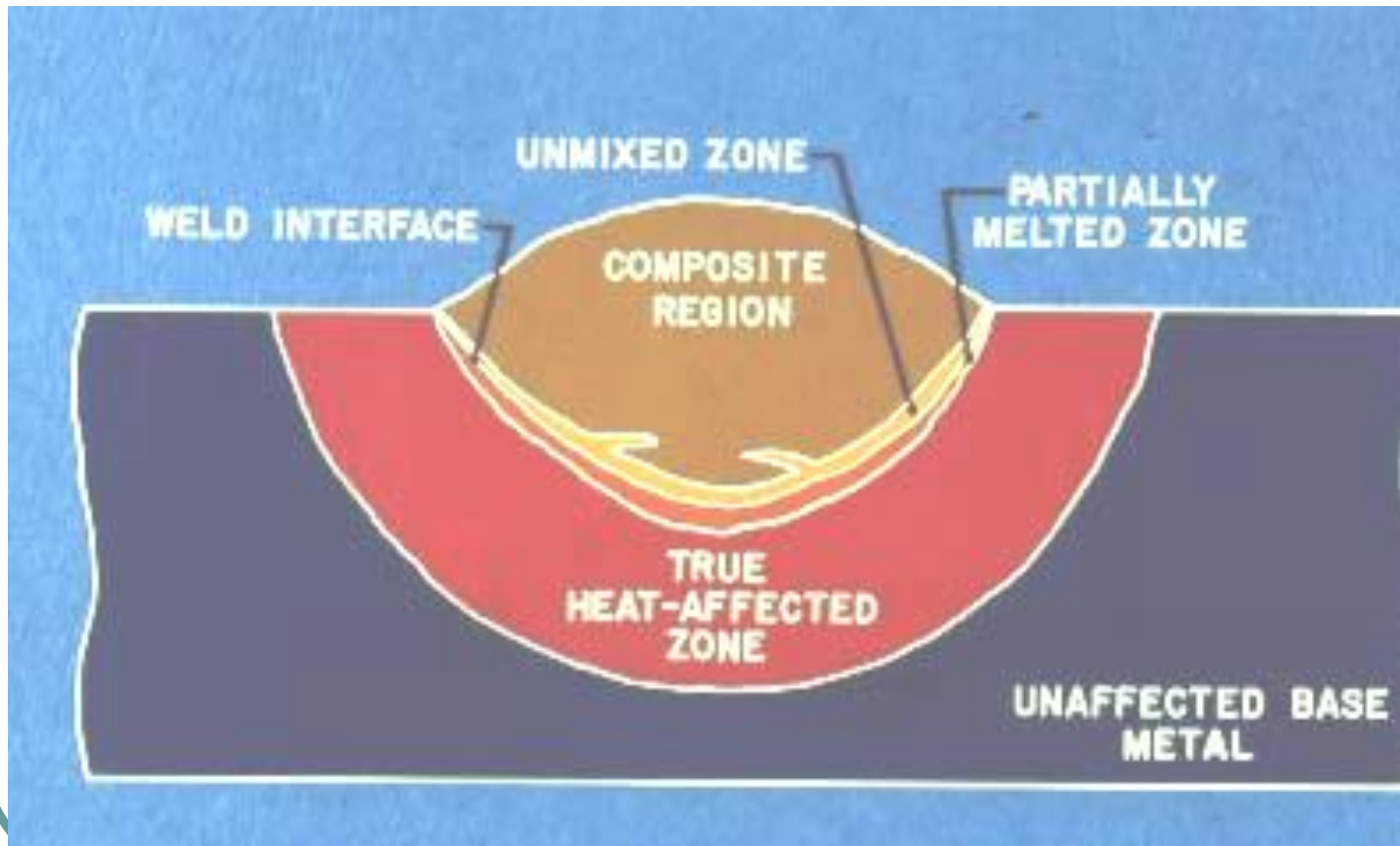
اتفاقات قبل از انجماد (مانند واکنش حوضچه مذاب با گازها)

اتفاقات بعد از انجماد (استحاله های حالت جامد)

👉 تشکیل ریزساختاری متناسب با شرایط انجماد در نتیجه

جوانه زنی (همگن یا غیرهمگن؟)

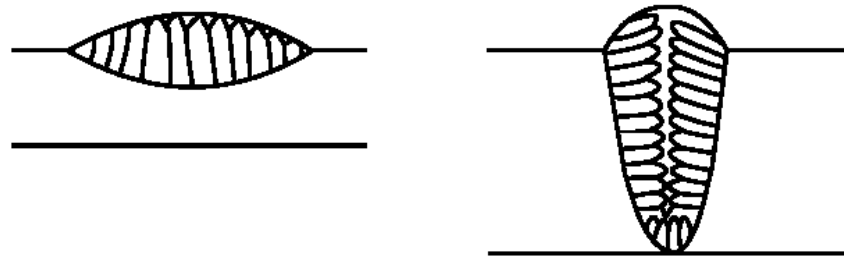
رشد



## رشد دانه ها در جهت شیب حرارتی

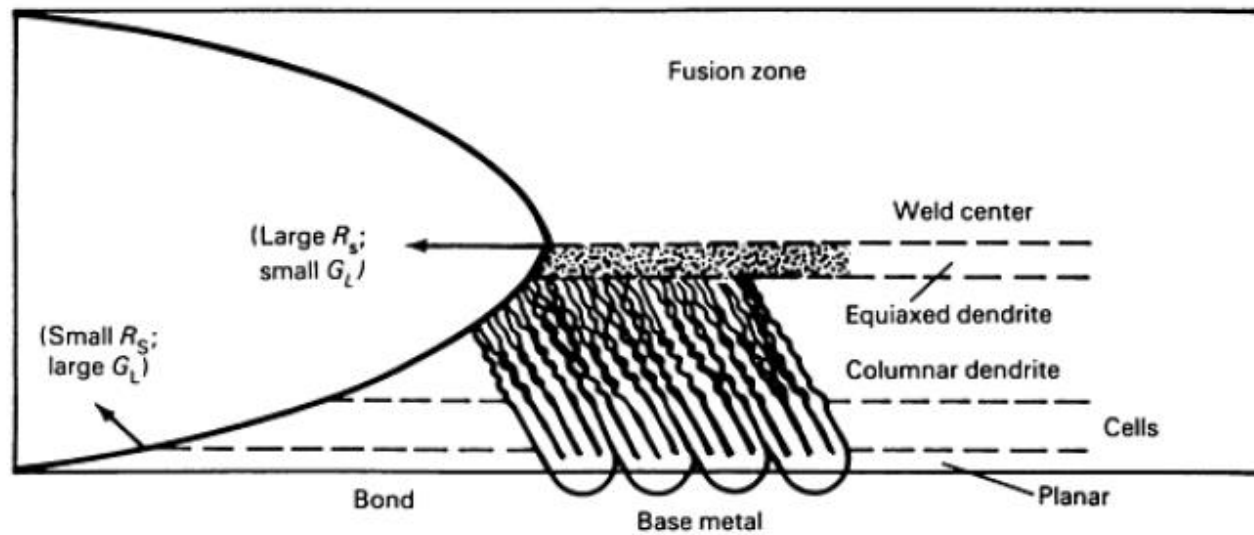
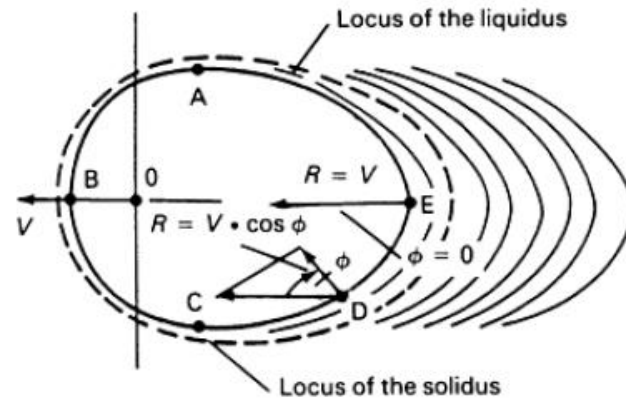
### □ انتقال حرارت به سمت فلز پایه سرد

تشکیل ساختار ستونی (دانه های طویل در راستای انتقال حرارت)

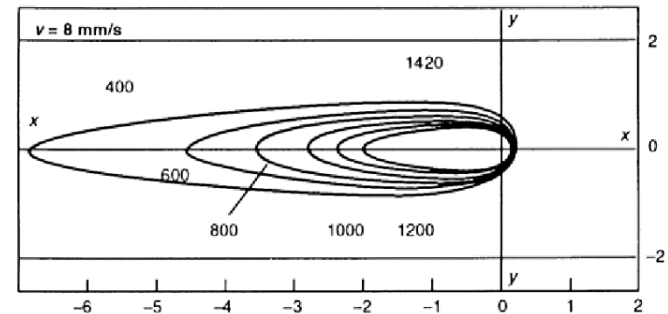
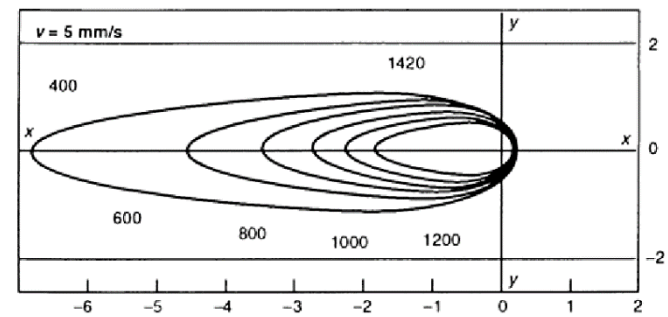
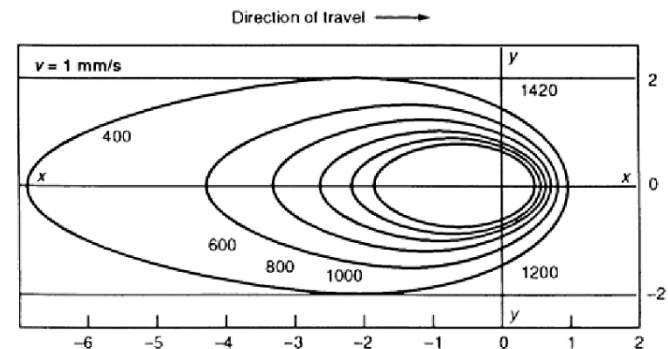
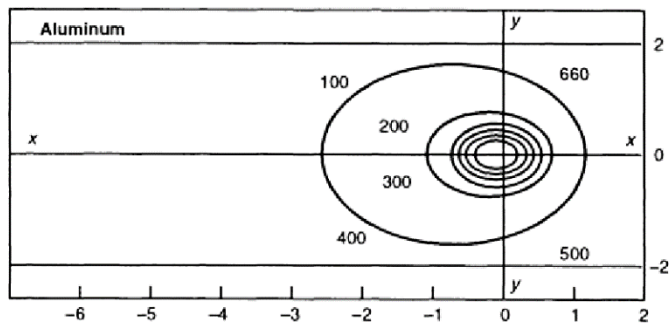
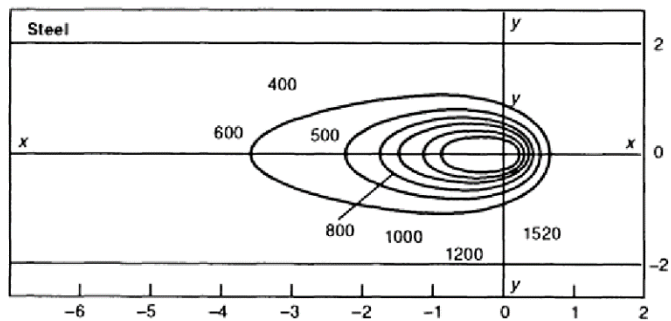
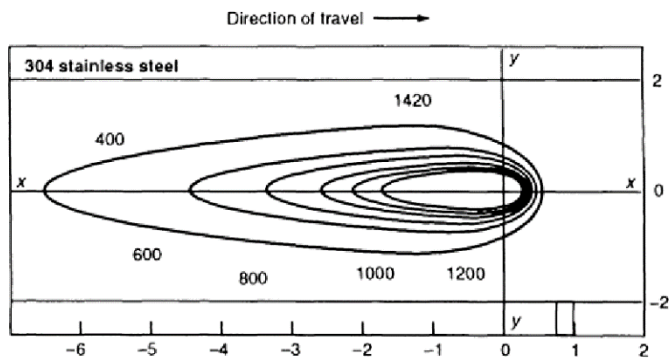


**Fig. 5.7** Columnar structure of welds Left: Shallow weld;  
Right: Deep pear-shaped weld.

# ریزساختار ناحیه جوش

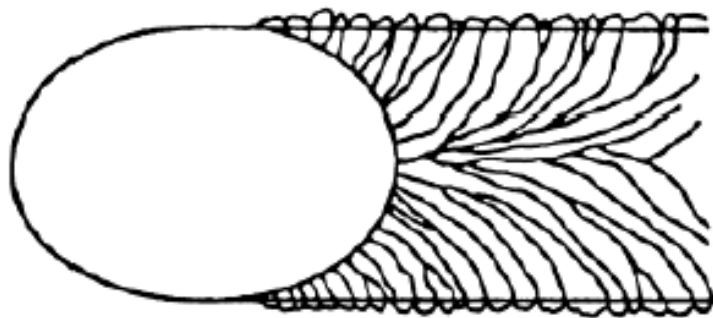


# شکل حوضچه مذاب

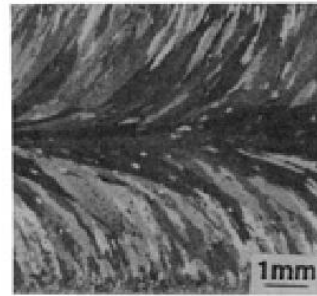




## شکل حوضچه مذاب

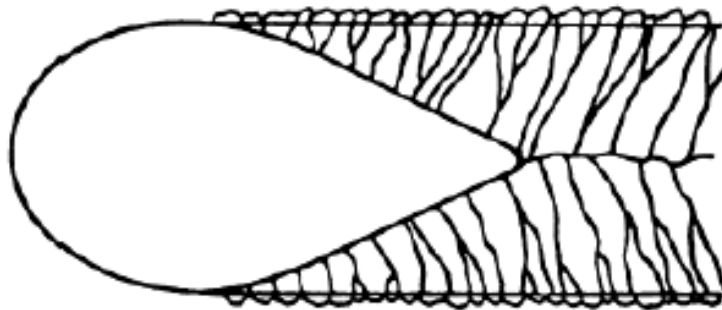


(a)

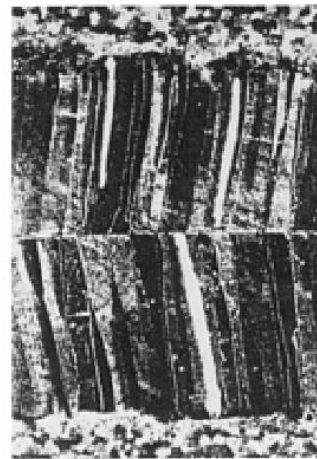


(a)

**Low welding speed**



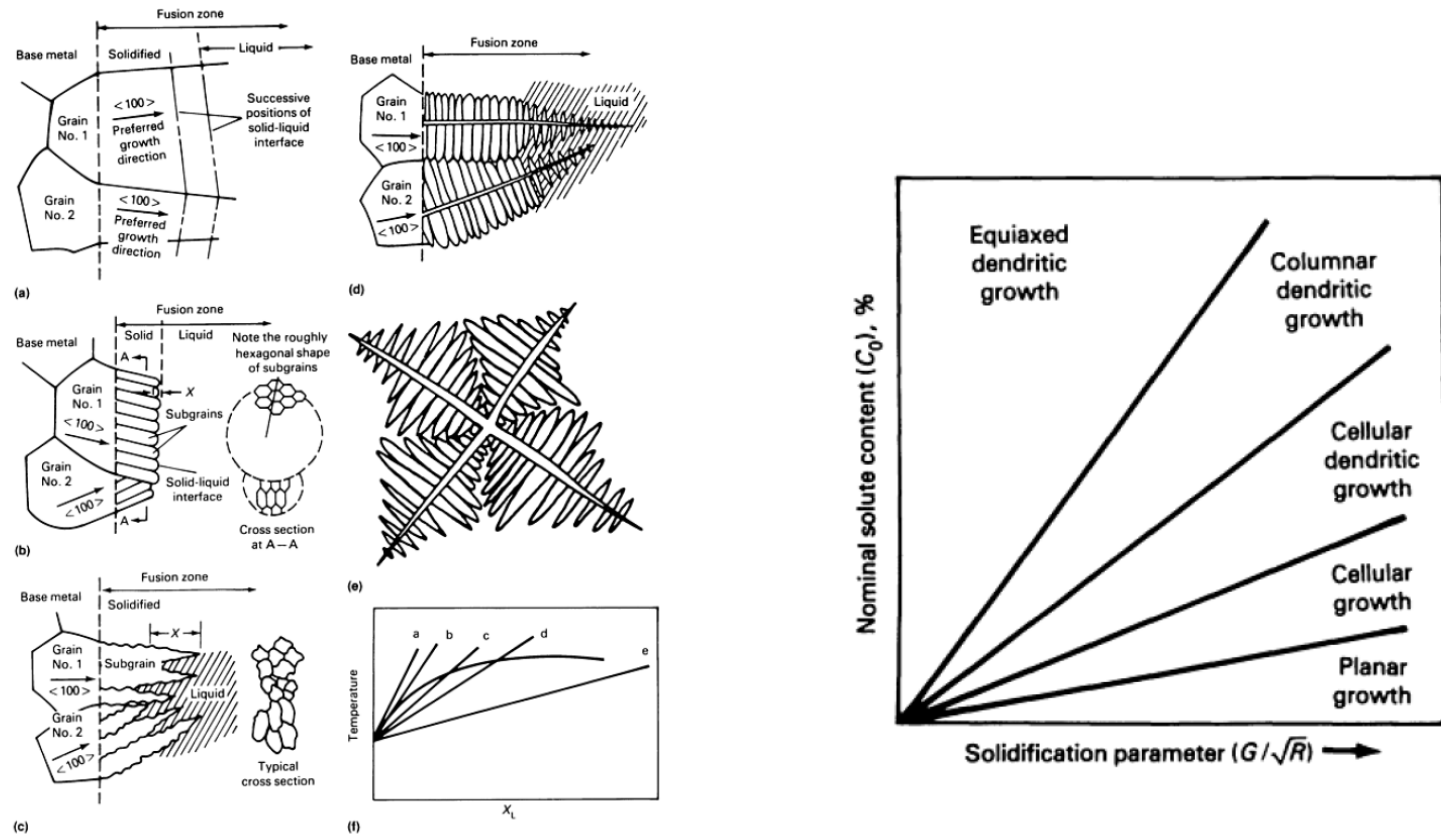
(b)



(b)

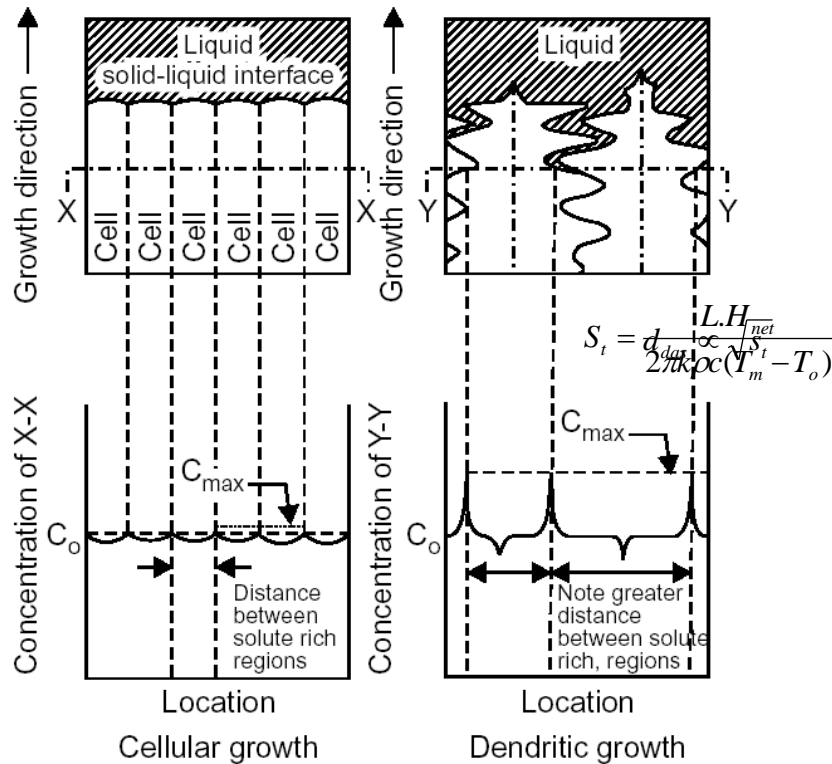
**High welding speed**

# ریز ساختار ناحیه جوش



**FIG. 7** SCHEMATICS SHOWING MICROSTRUCTURE OF SOLID-LIQUID INTERFACE FOR DIFFERENT MODES OF SOLIDIFICATION AND THE TEMPERATURE GRADIENTS THAT GENERATE EACH OF DIFFERENT MODES. (A) PLANAR GROWTH. (B) CELLULAR GROWTH. (C) CELLULAR DENDRITIC GROWTH. (D) COLUMNAR DENDRITIC GROWTH. (E) EQUIAXED DENDRITIC GROWTH. (F) FIVE TEMPERATURE GRADIENTS VERSUS CONSTITUTIONAL SUPERCOOLING. SOURCE: REF 6

# وابستگی حرارت ورودی و ریزساختار انجمادی



$$S_t = \frac{L.H_{net}}{2\pi k\rho c(T_m - T_o)}$$

$$d_{das} \propto \sqrt{S_t}$$

Schematic of solute distribution for cellular and dendritic growth patterns.

### تأثیر گازها در جوشکاری

۱- تخلخل

۲- آخالها

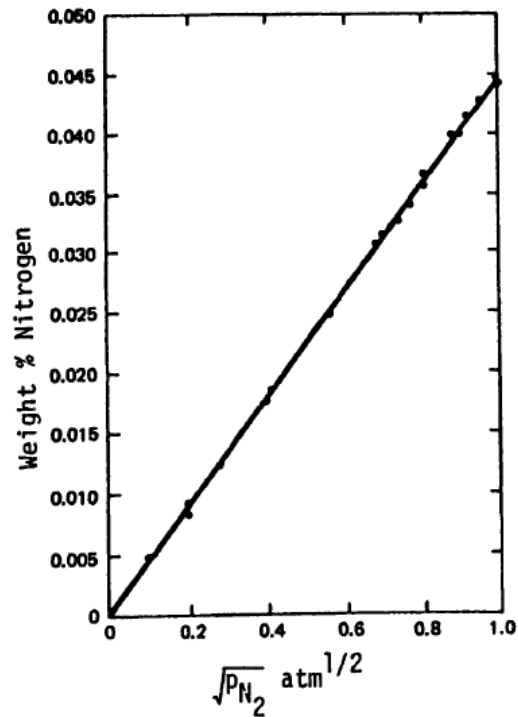
۳- ترک خوردگی فلز جوش

### منابع گازها

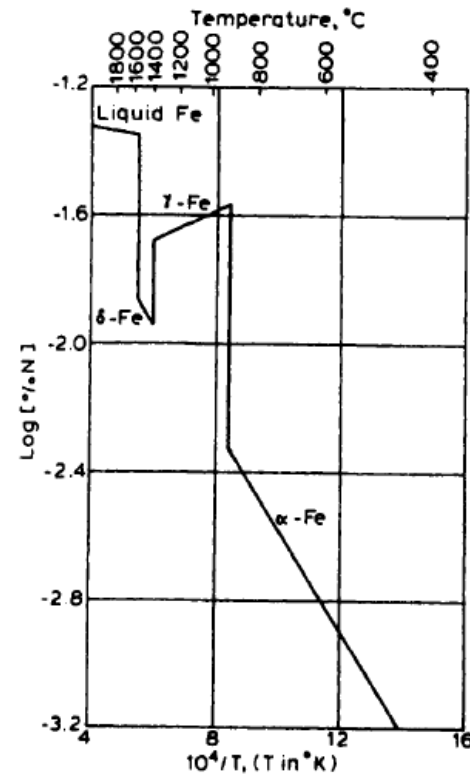
۱- اتمسفر

۲- الکتروود

۳- فلز پایه

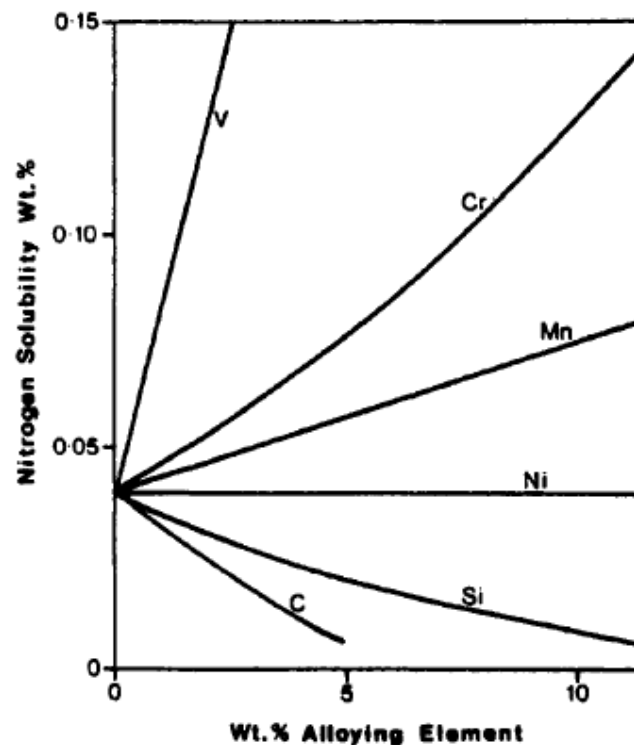


**Figure 11.1** The solubility of nitrogen in molten iron as a function of the partial pressure of nitrogen at 1600°C. (Originally from "Solubility of nitrogen in liquid iron alloys, I: thermodynamics" by R. Pehlke and J. F. Elliott, *Transactions of Metallurgical Society AIME*, 218, 1088–1101, 1960, with permission of the AIME, Warrendale, PA.)

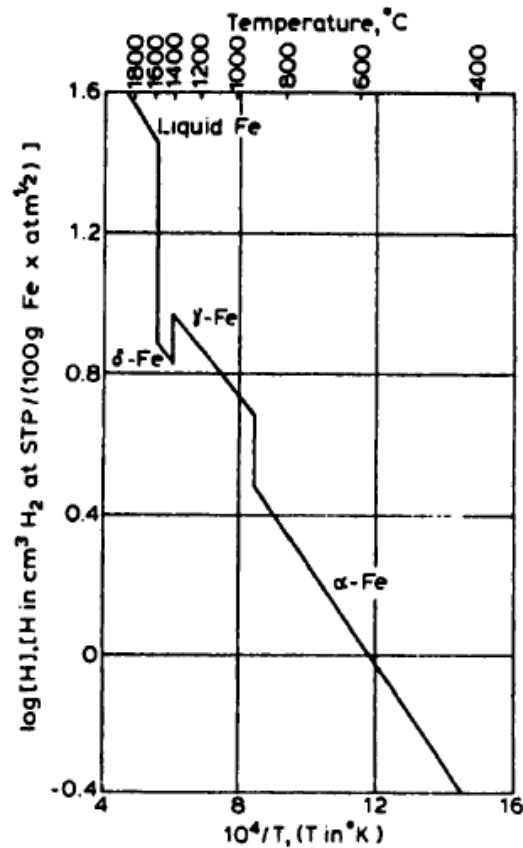


**Figure 11.2** The solubility of nitrogen in iron as a function of temperature. (Originally from *The Making, Shaping and Treatment of Steel*, U.S. Steel Corporation, Pittsburgh, PA, 1971, with permission of the Association of Iron & Steel Engineers Foundation, Suite 2350, 3 Gate Way Center, Pittsburgh, PA 15222.)

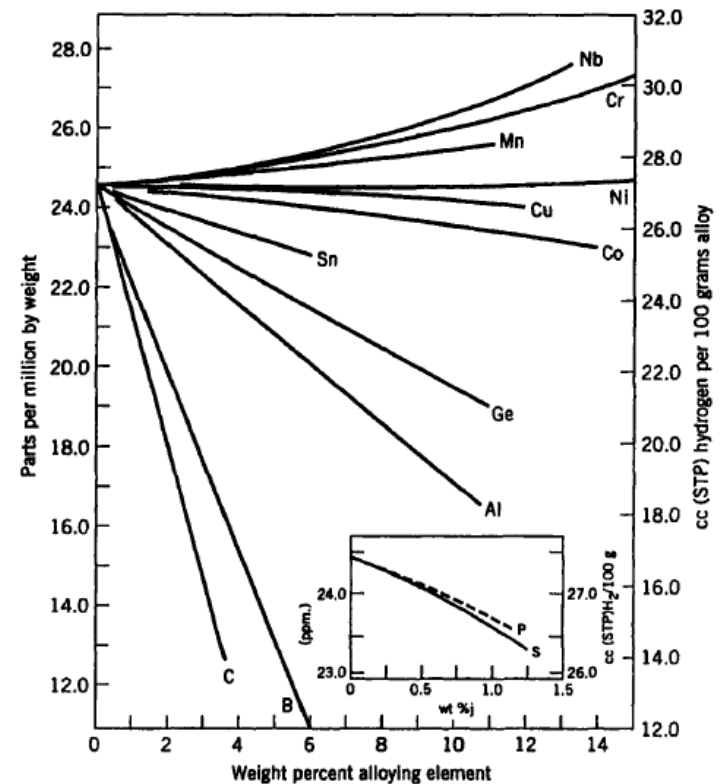
## تأثير میزان عناصر آلیاژی بر میزان حلالیت نیتروژن



**Figure 11.5** The effect of various alloying elements on the solubility of nitrogen in molten iron at 1600°C. (Originally from *Physical Metallurgy of Iron and Steel* by B. Kumar, 1968, Asia Publications, out of *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, 2d ed., by K. Easterling, published in 1992 by Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, and used with permission of the Easterling family.)

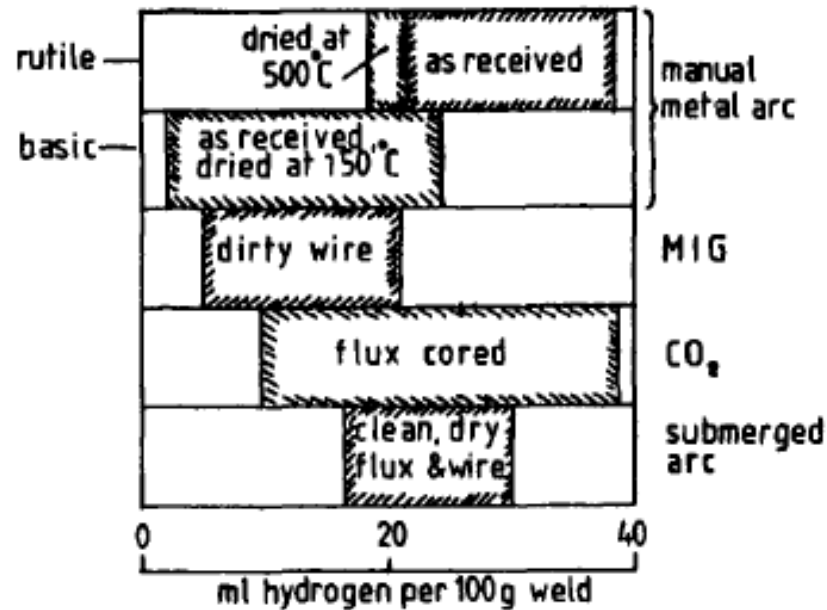


**Figure 11.3** The solubility of hydrogen in iron as a function of temperature. (Originally from *The Making, Shaping and Treatment of Steel*, U.S Steel Corporation, Pittsburgh, PA, 1971, with permission of the Association of Iron & Steel Engineers Foundation, Suite 2350, 3 Gate Way Center, Pittsburgh, PA 15222.)



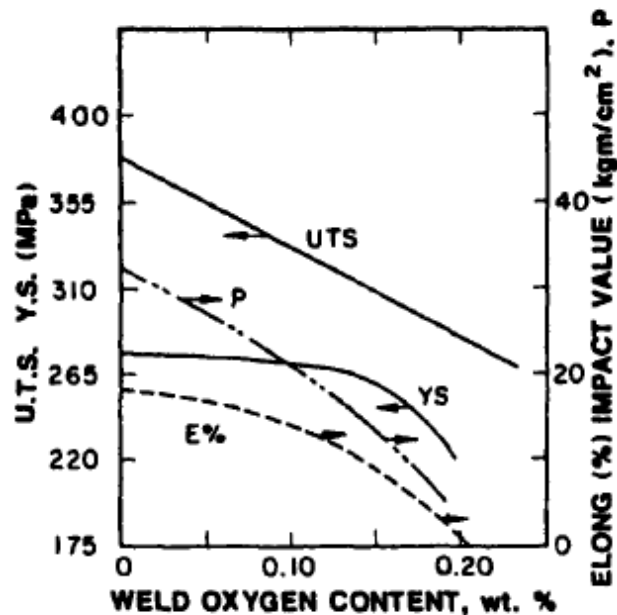
**Figure 11.6** The solubility of hydrogen in various binary alloys of iron at 1592°C. (Originally from *The Making, Shaping and Treatment of Steel*, 1971, U.S. Steel Corporation, with permission of the Association of Iron & Steel Engineers Foundation, Suite 2350, 3 Gate Way Center, Pittsburgh, PA 15222.)

## تأثیر فرآیندهای مختلف بر میزان جذب هیدروژن



**Figure 11.9** Amount of hydrogen found in welds in steel as a function of processes and process variables. (From *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, 2d ed., by K. Easterling, published in 1992 by Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, and used with permission of the Easterling family.)





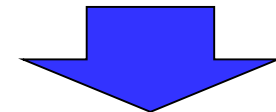
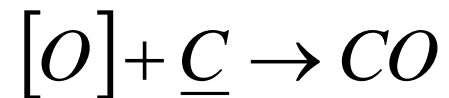
**Figure 11.12** The effect of oxygen content on the mechanical properties of mild steel welds. (Originally from *The Metallurgy of Welding* by D. Seferian, 1962, Chapman & Hall, London, out of *Welding Metallurgy* by S. Kou, Figure 3.10, p. 70, published in 1987 by and used with permission of John Wiley & Sons, Inc., New York.)

## تأثیر اکسیژن

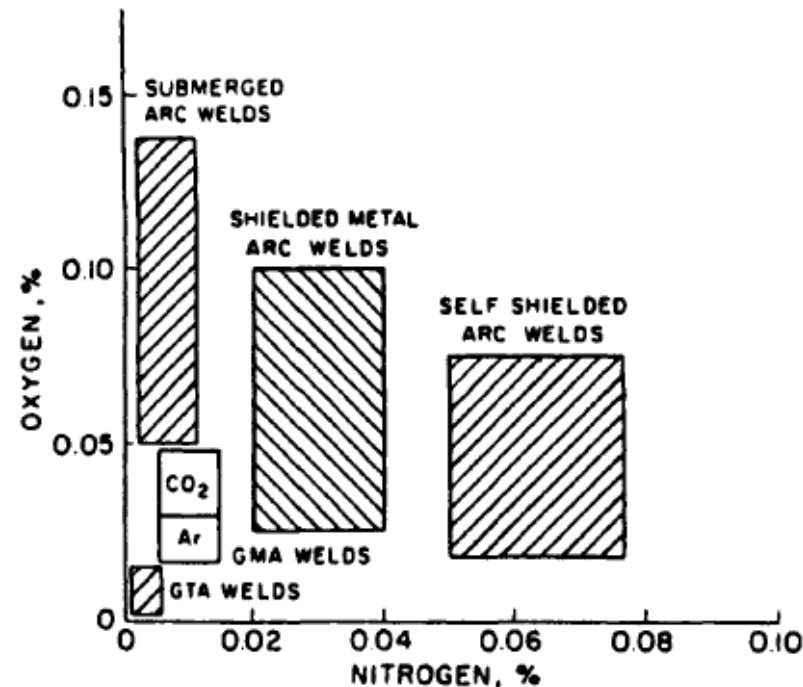
۱- تشکیل اکسید آهن، اکسید

منگنز و سیلیسیم

۲- تخلخل

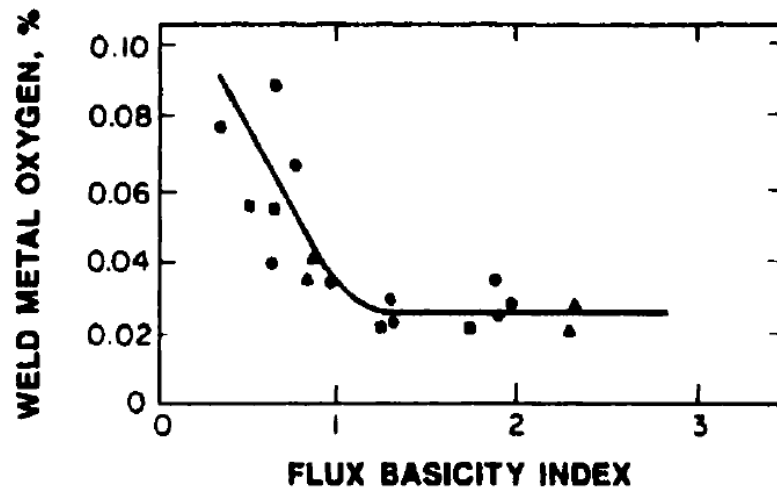


اکسیژن زداها (Mn و Si، Al) ← آخالهای اکسیدی



**Figure 11.8** Oxygen and nitrogen levels expected in steel after welding using any of several different arc processes. (Originally from paper by R. H. Rein in *Proceedings of a Workshop on Welding Research Opportunities*, edited by B. A. McDonald, 1974, Office of Naval Research, AD-AO28395, Washington, DC, p. 92, reproduced from "Sources of weld metal oxygen contamination during submerged arc welding" by T. W. Eager, *Welding Journal*, 57(3), 76s-80s, 1978, published by and used with permission of the American Welding Society, Miami, FL.)

## واکنش فلز مذاب - سرباره



□ بازسیتة

اسیدی:  $BI < 1$

خنثی:  $1 < BI < 1.2$

قلیایی:  $1.2 < BI < 2$

$$BI = \frac{\sum (\% \text{ basic oxides})}{\sum (\% \text{ nonbasic oxides})}$$

$$BI = \frac{CaF_2 + CaO + MgO + BaO + SrO + Na_2O + K_2O + Li_2O + 0.5(MnO + FeO)}{SiO_2 + 0.5(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}$$

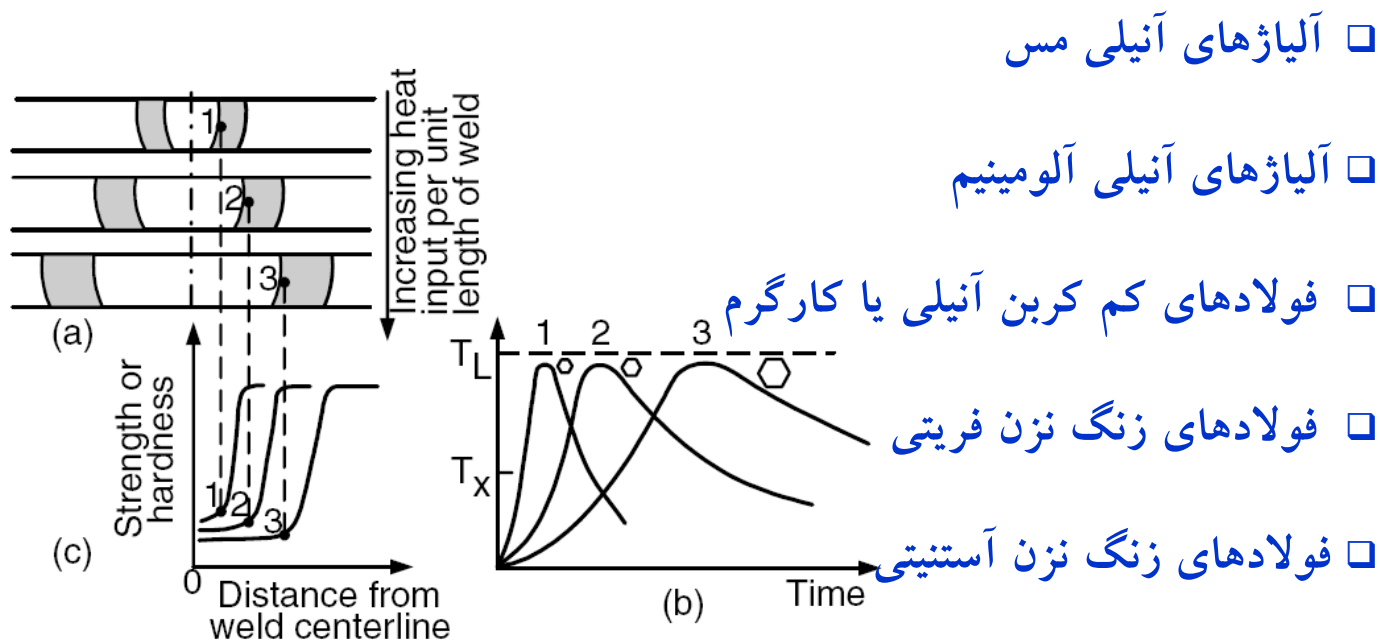
□ توقف قطره مذاب بر نوک الکترود

□ عبور قطرات مذاب از ستون قوس

□ تماس مذاب با سرباره

## ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)

- آلیاژهای محلول جامد
- آلیاژهای کارسخت
- آلیاژهای رسوب سخت
- آلیاژهایی با قابلیت استحاله حالت جامد مارتنزیتی



**Figure 14.11** Effect of heat input per unit length of weld on: (a) width of HAZ (shaded), (b) thermal cycles near fusion boundary, and (c) strength or hardness profiles.

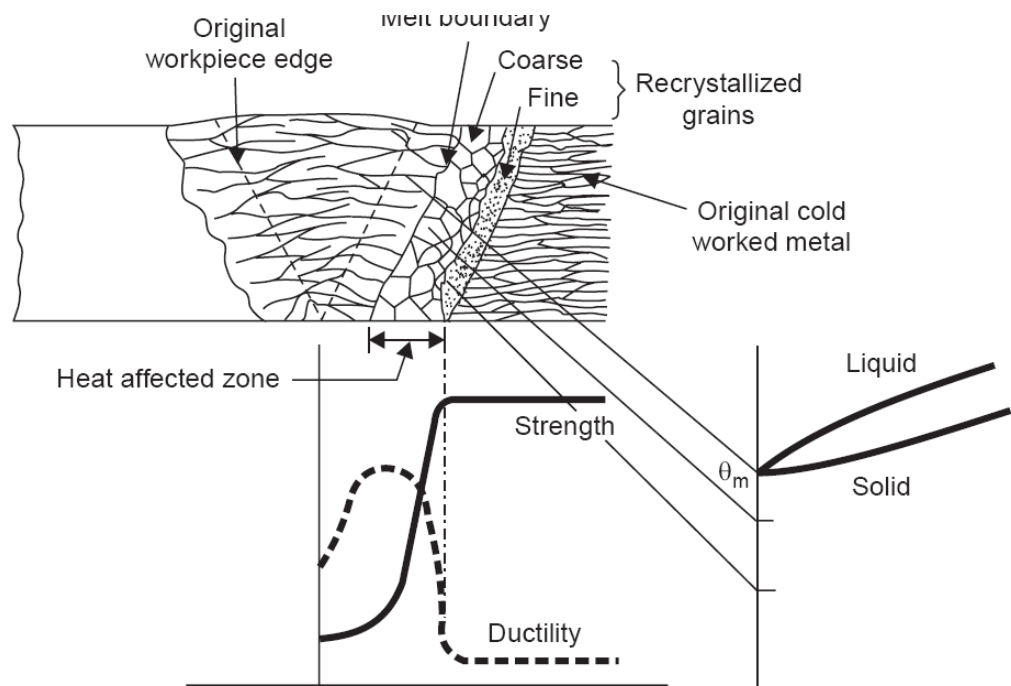


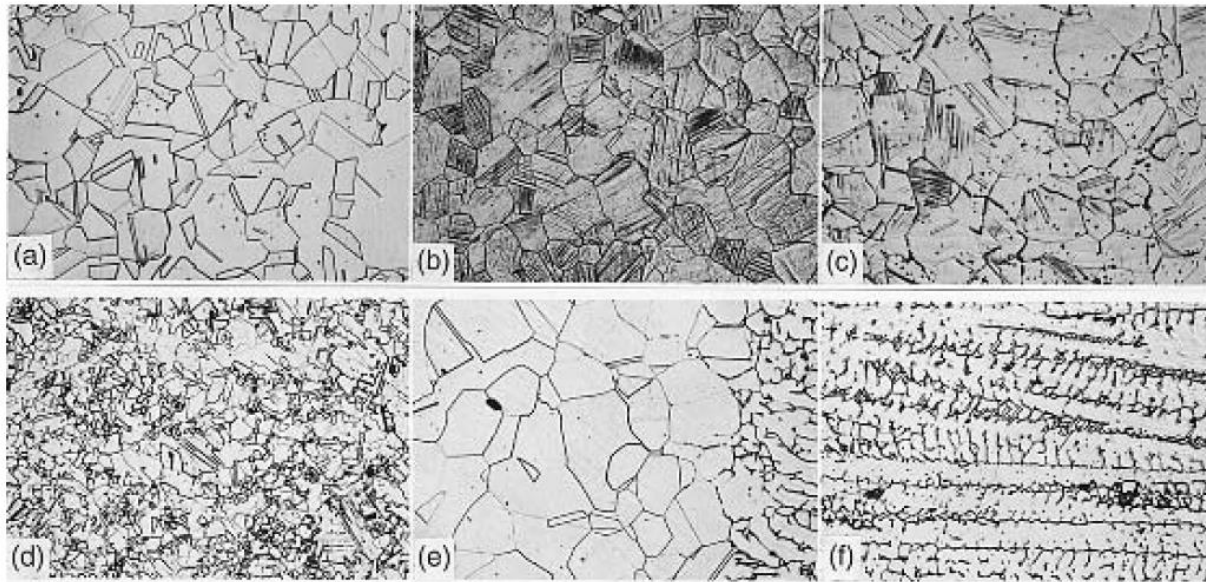
Fig. 5.9 Characteristics of welded joints in pure metals.

بازیابی ☐

تبلور مجدد ☐

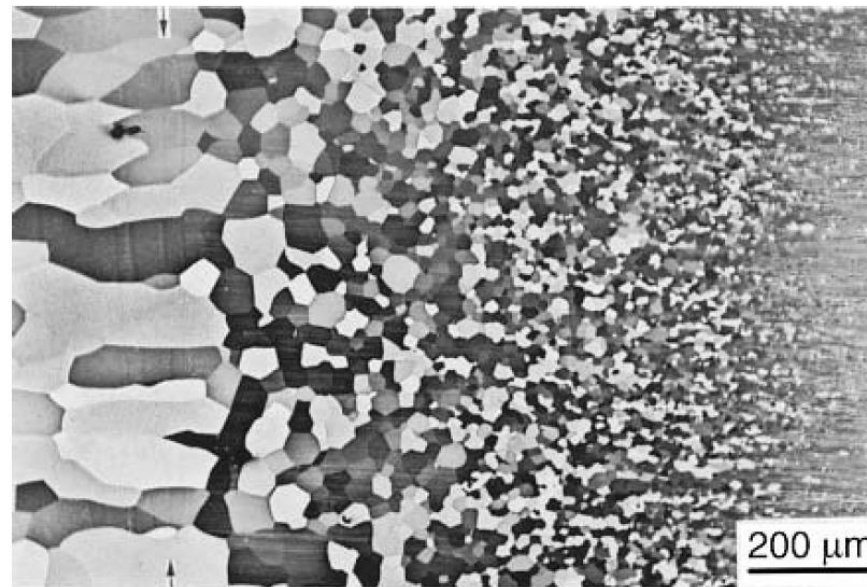
رشد دانه ☐

× آلیاژهایی با قابلیت استحاله مارتنزیتی یا رسوبگذاری



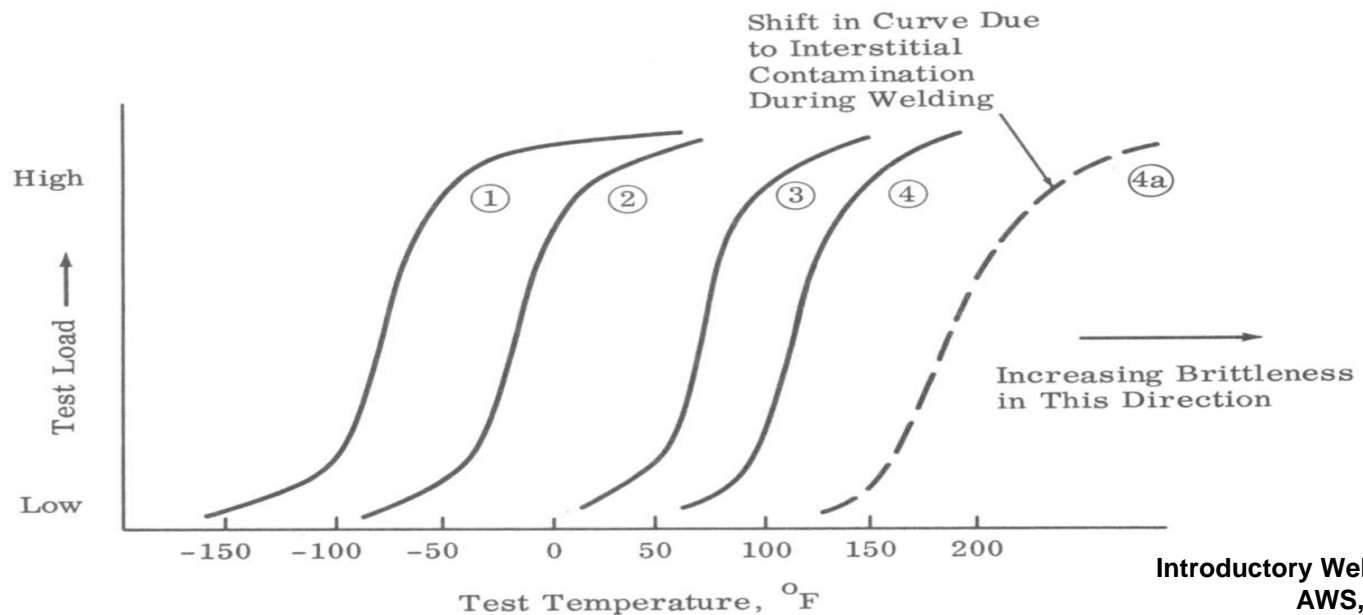
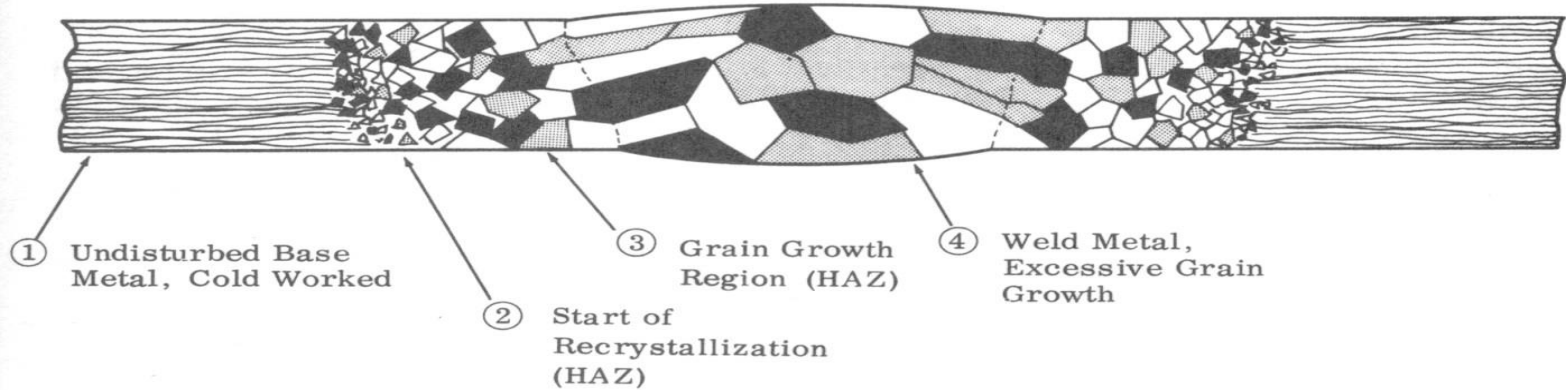
**Figure 14.6** Microstructure across the weld of a work-hardened 304 stainless steel: (a) before work hardening; (b) base metal; (c) carbide precipitation at grain boundaries; (d) recrystallization; (e) grain growth next to fusion boundary; (f) fusion zone. Magnification 137 $\times$ . Reprinted from *Metals Handbook* (8).

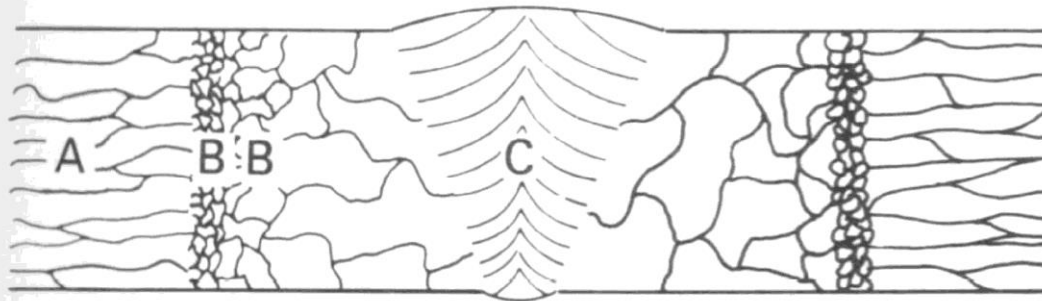




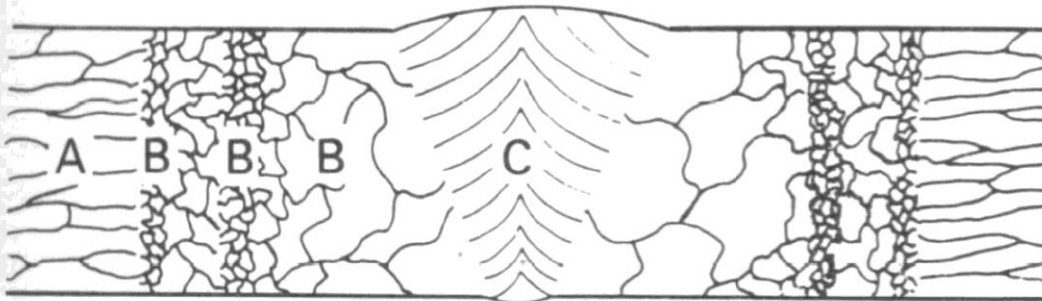
**Figure 14.7** Grain growth in electron beam weld of molybdenum, arrows indicating fusion boundary. Reprinted from Wadsworth et al. (9). Copyright 1983 with permission from Elsevier Science.

# Cold Worked Alloy Without Allotropic Transformation

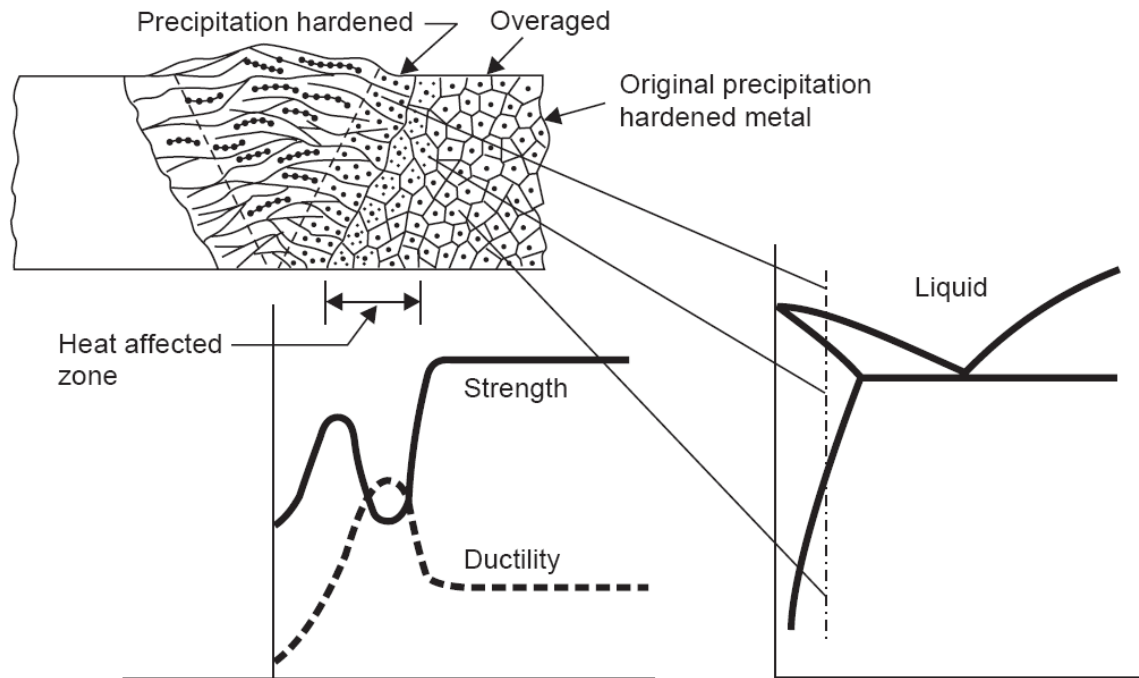




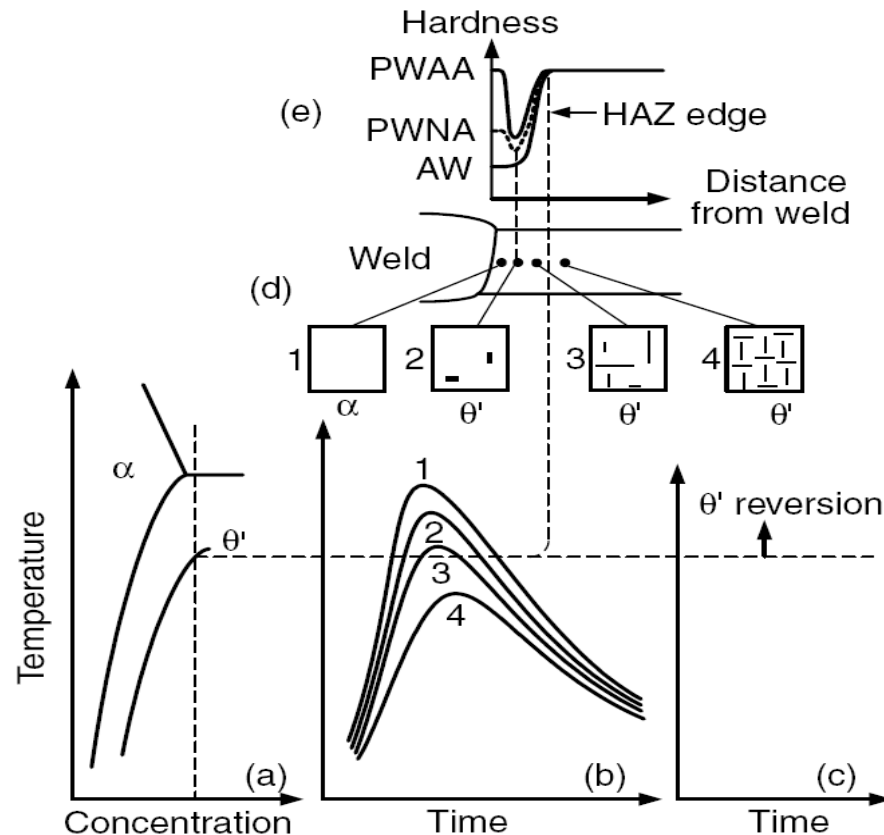
**(A) No phase change when heated**



**(B) Allotropic transformation when heated**

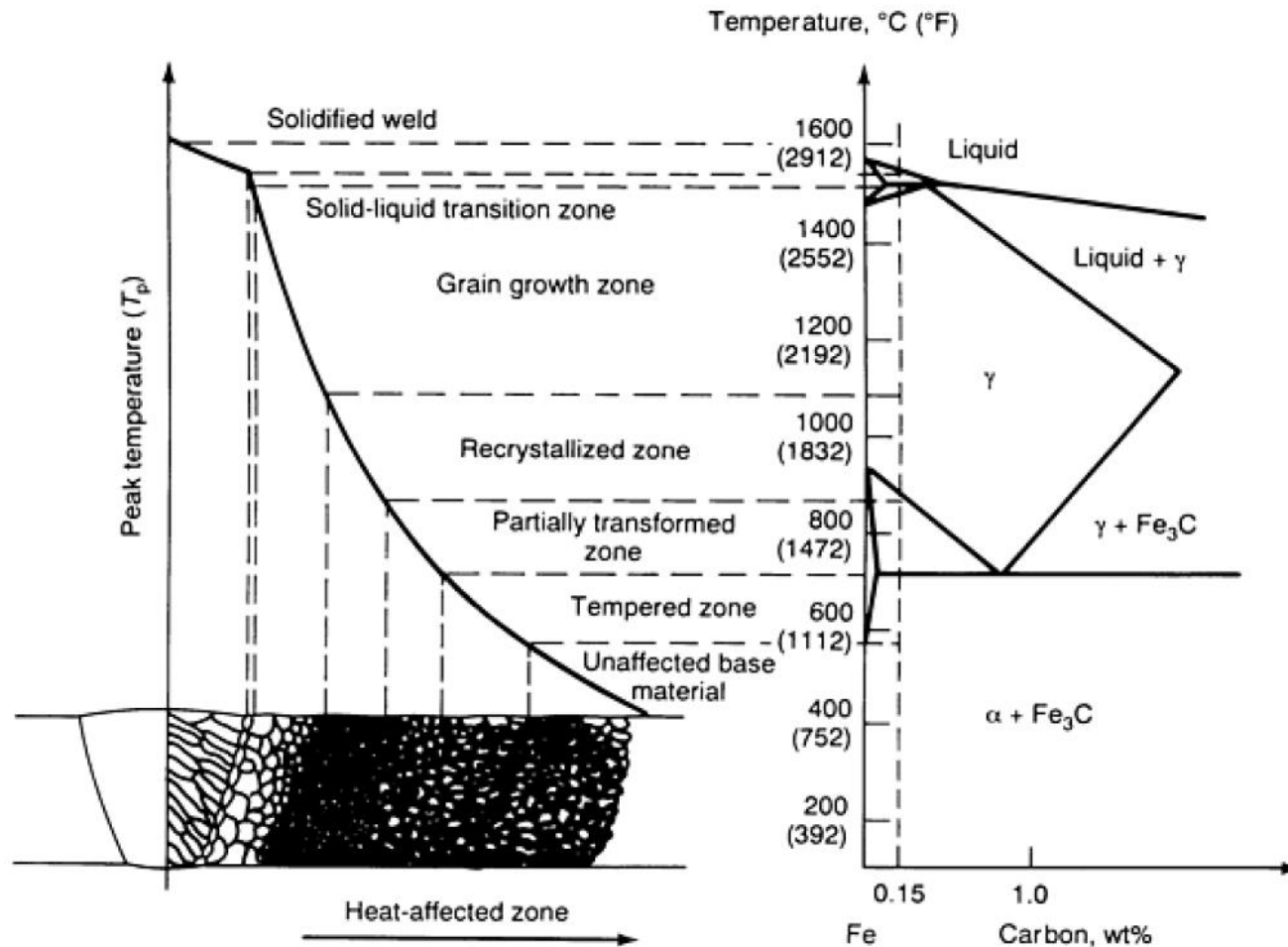


**Fig. 5.10** Characteristics of welded joints in precipitation hardened alloy

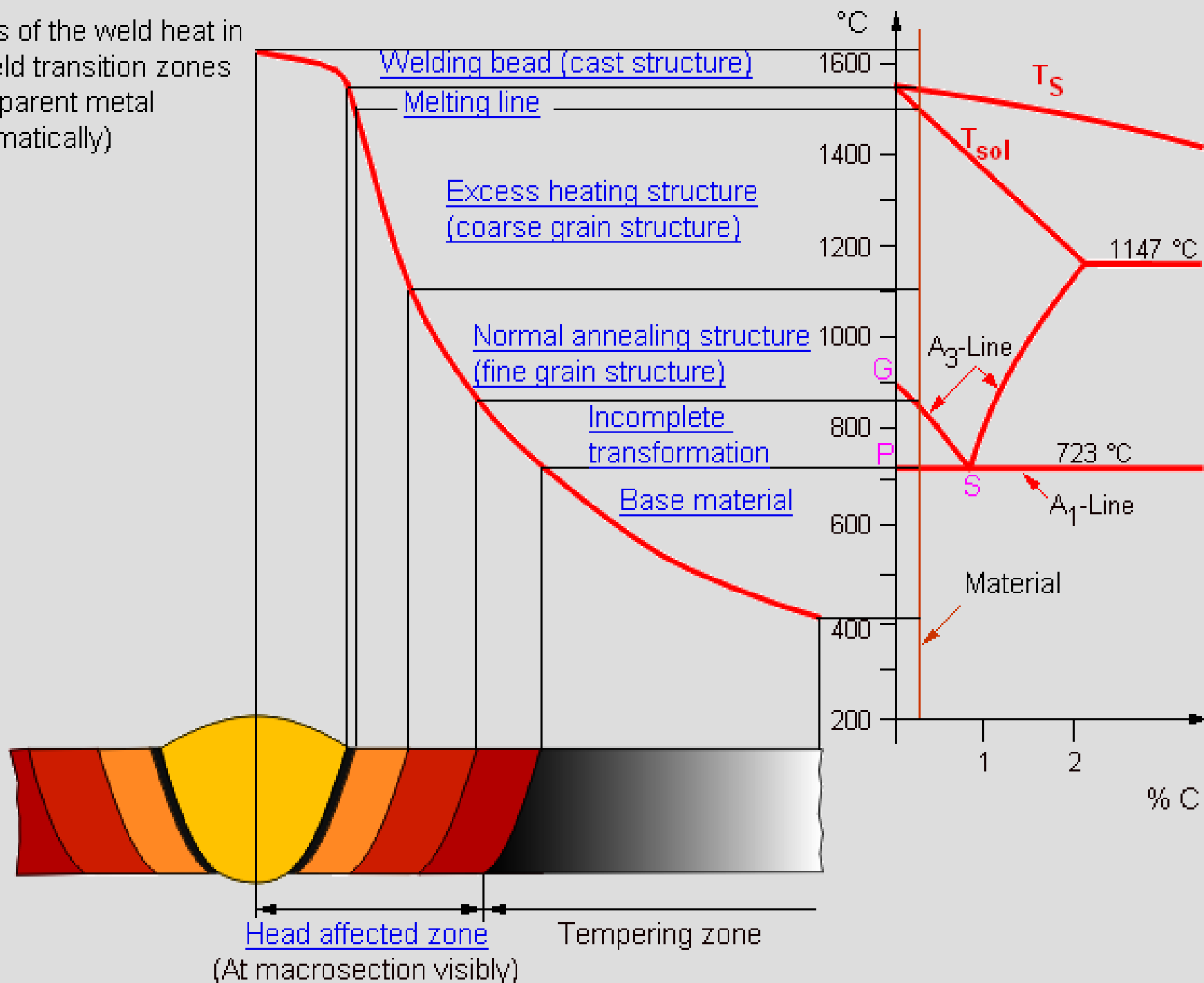


**Figure 15.8** Al-Cu alloy heat treated to contain  $\theta'$  before welding: (a) phase diagram; (b) thermal cycles; (c) reversion of  $\theta'$ ; (d) microstructure; (e) hardness distribution.  $\theta$  in base metal not shown.

## فولادها (استحاله مارتنزیتی)



Effects of the weld heat in the weld transition zones of the parent metal (schematically)





# Weldability

## Definition

The capability of a material to be welded under the imposed fabrication conditions into a specific, suitably designed structure and to perform satisfactorily in the intended service.



- Weldability depends on various factors such as, nature of metals, weld designs, welding techniques, skills, etc.
- It has been stated that **all metals are weldable** but some are more difficult than another.
- **Steel** is readily weldable (in many ways) than **aluminium and copper**.
- **Copper** is not easily welded due to its high thermal conductivity which makes it difficult to raise the parent metal to its melting point. → require preheating ~300-400°C.
- Some **aluminium based die casting alloys** give weld pool too large to control, and aluminium welds normally have oxide inclusions and porosity.





# Weldability

## Steels

- **Weldability** of steels is inversely proportional to its **hardenability**, due to **martensite formation** during heat treatment

Carbon content



Hardenability



Weldability



- There is **a trade-off** between materials strength and weldability.
- **Austenitic stainless steels** tend to be the most weldable but suffer from distortion due to high thermal expansion. → Cracking and reduced corrosion resistance.
- **Ferritic and martensitic stainless steels** are not easily welded, often to be preheated and use special electrodes.
- **Ferritic steels** is susceptible to hot cracking if the ferrite amount is not controlled.



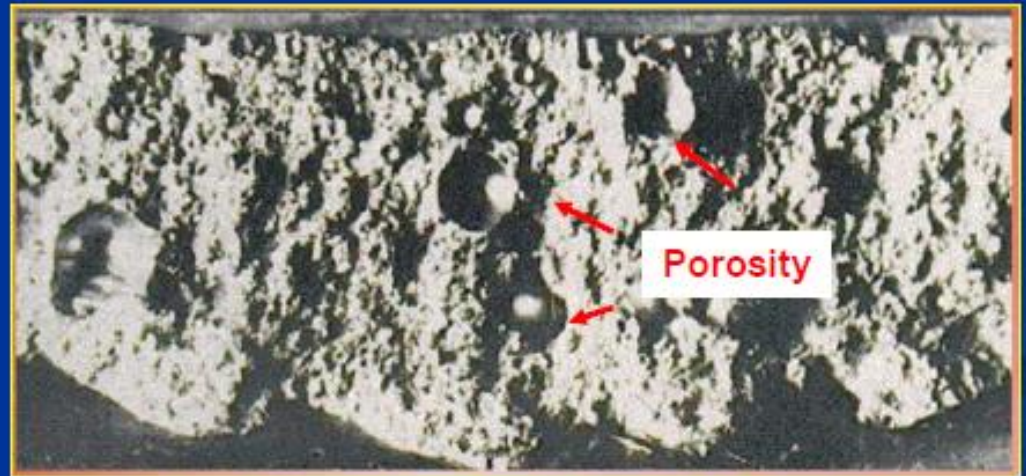
# Weldability

## Aluminium and its alloys

- **Weldability** of aluminium depends on chemical composition of the alloy.
- **Aluminium alloys** are susceptible to hot cracking, oxide inclusions, dross, porosity (hydrogen).
- Most of wrought series, **1xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx, and medium strength 7xxx** can be fusion welded by TIG, MIG while **2xxx and high strength 7xxx** are not readily welded due to liquation and solidification cracking.



**Cracks in aluminium welds**



**Porosity observed in aluminium welded specimen after fractured.**



# Weldability

## Copper and copper alloys

- **Weldability** of copper depends on chemical composition of the alloy.

### Copper

- High thermal conductivity → required preheating to counteract heat sink effect.
- Can be TIG or MIG welded.

### Brasses

- Volatilization (toxic) of zinc is the main problem, reducing weldability.
- Low zinc content brass can be TIG or MIG welded.

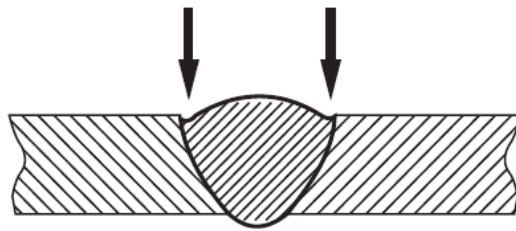
### Bronzes

- Most are weldable, except gun metal or phosphor bronzes.
- Require careful cleaning and deoxidization to avoid porosity.

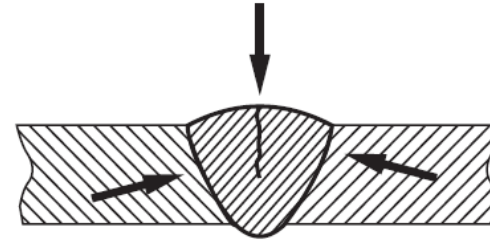
- **Silicon** improves weldability due to its deoxidizing and fluxing actions.
- **Oxygen** causes porosity and reduce strength of welds.
- **Tin** increases hot-cracked susceptibility during welding.
- **Precipitation hardened alloys** should be welded in the annealed condition, and then precipitation hardening treatment.



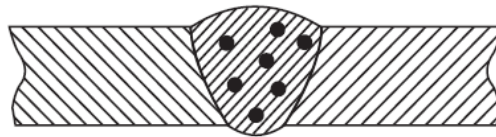




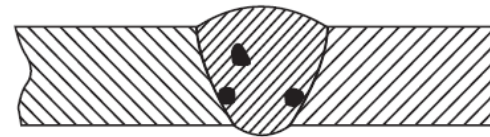
(a) Undercut



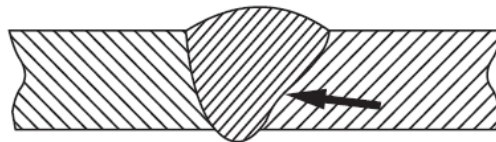
(b) Cracks



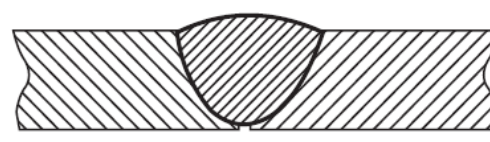
(c) Porosity



(d) Slag inclusions



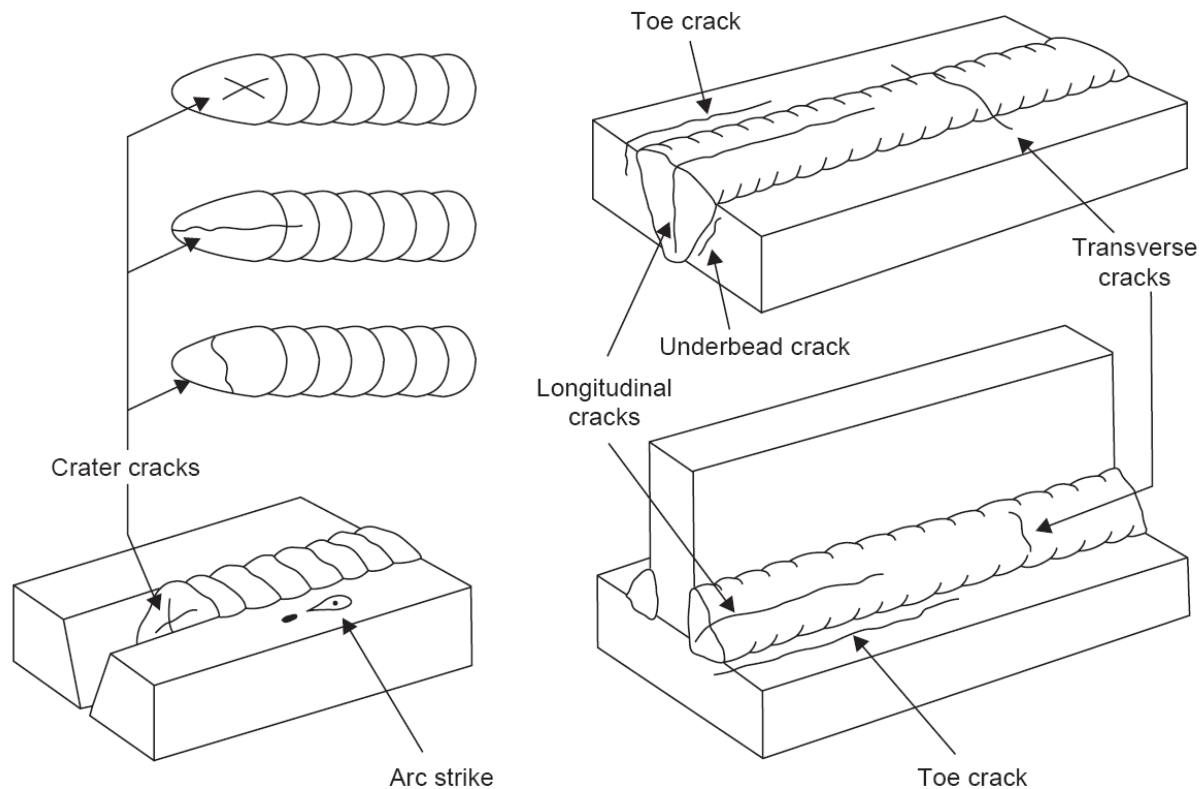
(e) Lack of fusion



(f) Lack of penetration

Typical weld defects

# عیوب جوشکاری (انواع ترکها)



Types of cracks in welded joints

## ترک گرم (ترک انجمادی)

جدایش مذاب با نقطه ذوب پایین در فضای بین دندریتها



تنشهای انقباضی



ترک گرم ناشی از اختلاف ترکیب شیمیایی قسمت‌های مختلف جوش

□ کنترل ترکیب شیمیایی:

عناصری که دامنه انجماد را زیاد می کنند (As, Cu, P, S) ← احتمال بالای ترک گرم

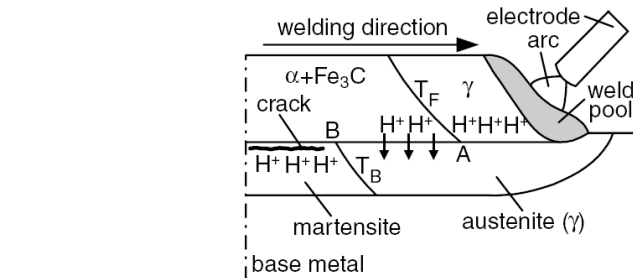
$$\text{Mn/S} > 30$$

## □ عوامل ترک سرد هیدروژنی (تأخیری)

حضور هیدروژن

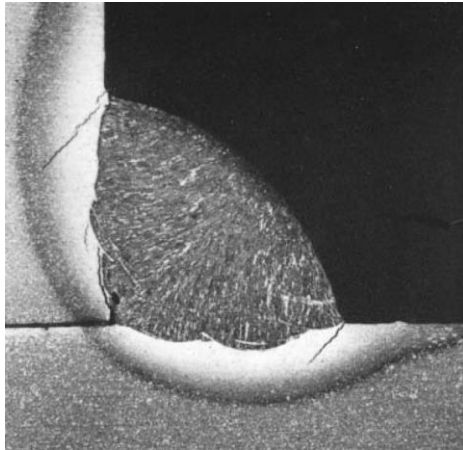
تنشهای پسماند بالا

ساختار مستعد (مارتنزیت): سختی  $< 350 \text{ Hv}$

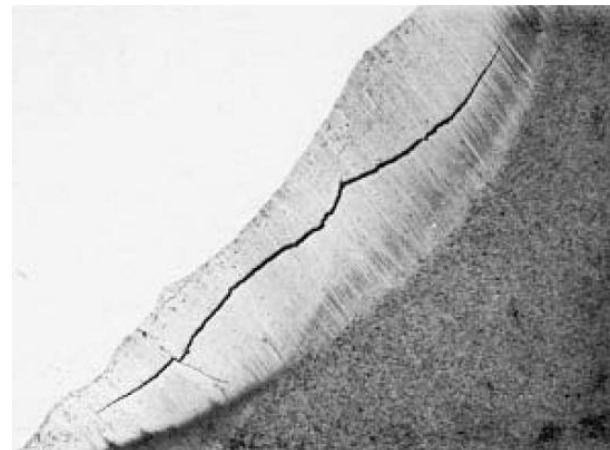


**Figure 17.16** Diffusion of hydrogen from weld metal to HAZ during welding. Modified from Granjon (20).

$$\text{Carbon equivalence} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Si}{24} + \frac{\%Ni}{40} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Mo}{4}$$



Underbead crack in a low-alloy steel HAZ



Hydrogen cracking in a fillet weld of 1040 steel

## □ Preheating:

- Reduces the cooling rate (reduces the martensite)
- Reduces distortion and shrinkage stress
- Reduces the danger of weld cracking
- Allows hydrogen to escape

## □ Low-hydrogen welding procedure

## □ Post weld heat treatment 1 hour per inch of plate thickness at 1200F)

Martensite is tempered (transforms to ferrite and carbides)

- Reduces hardness, and strength
- Increases ductility, and toughness

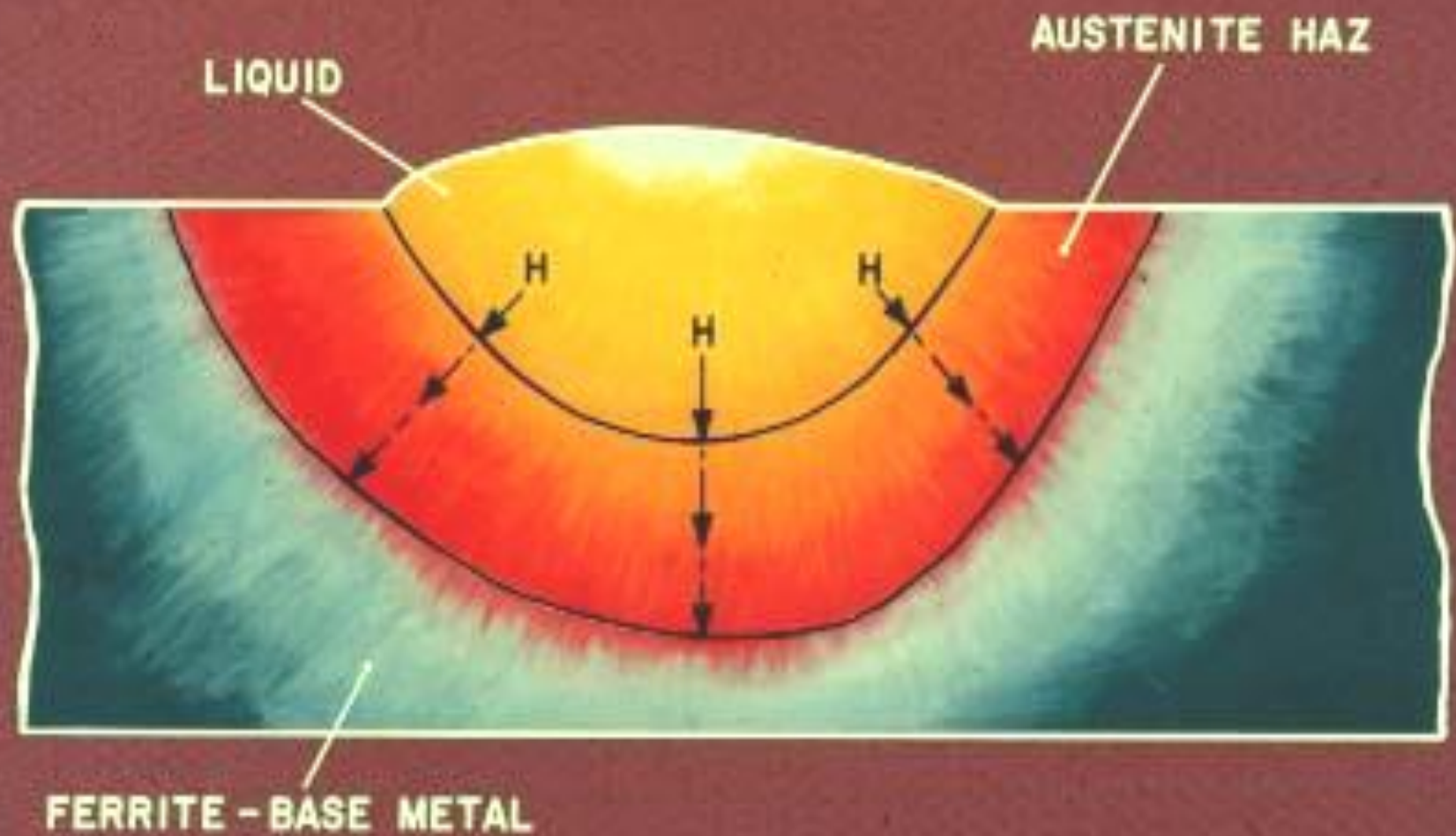
Residual stress is also reduced



## Carbon equivalent (CE):

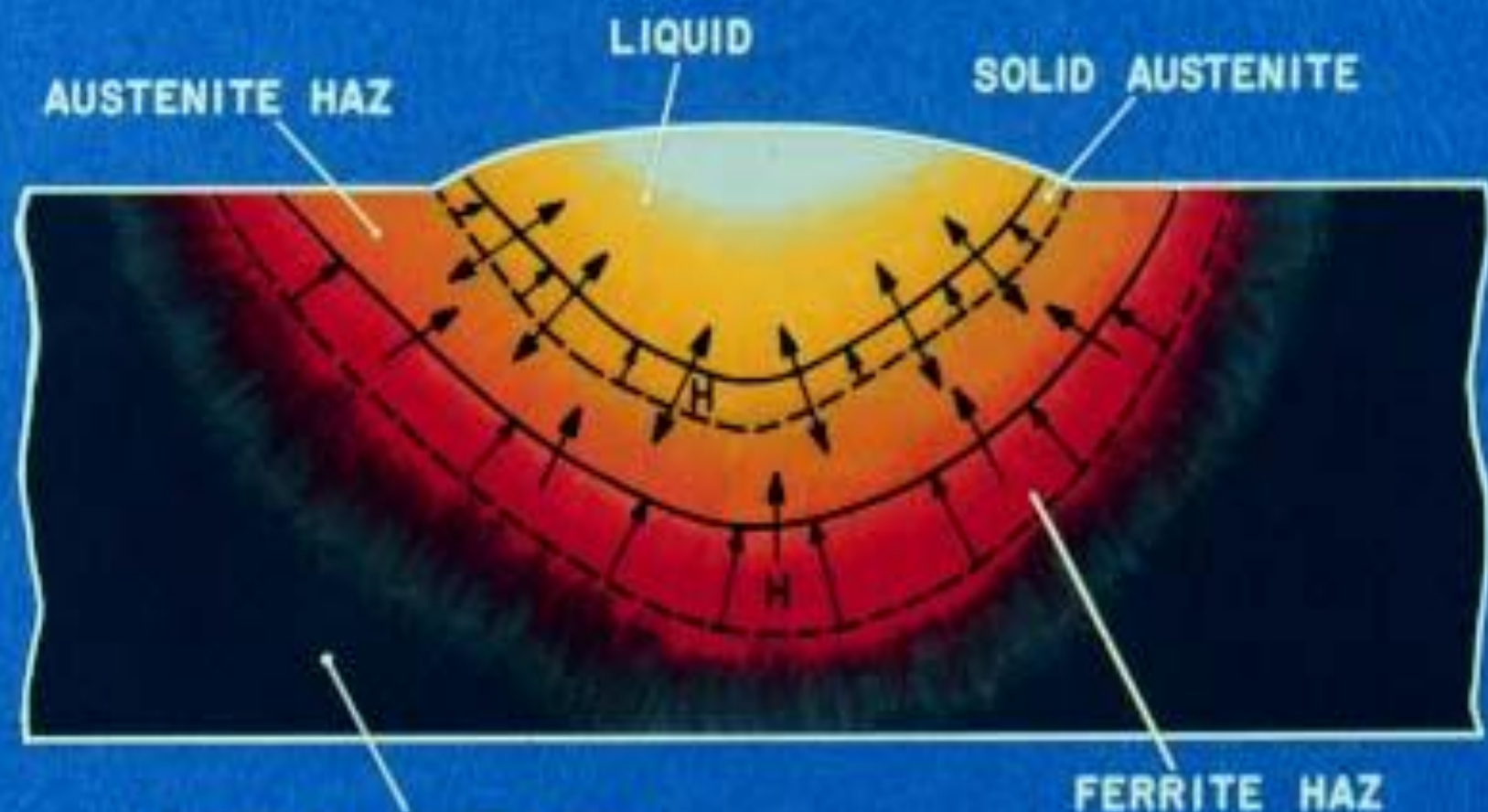
measures ability to form martensite, which is necessary for hydrogen cracking

- $CE < 0.35$  no preheat or postweld heat treatment
- $0.35 < CE < 0.55$  preheat
- $0.55 < CE$  preheat and postweld heat treatment



AT TEMPERATURE

(AFTER HOWDEN)

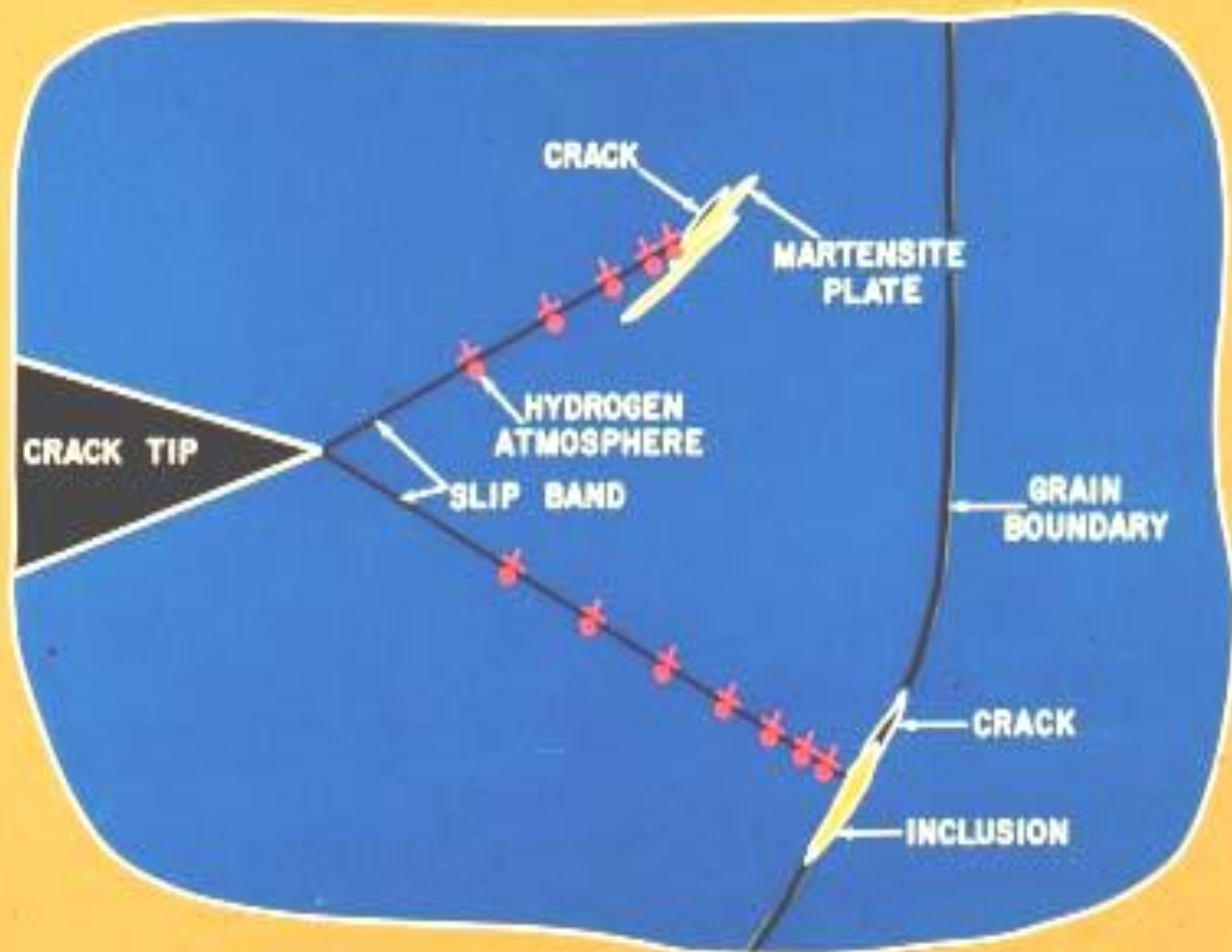


FERRITE - BASE METAL

FERRITE HAZ

DURING COOLING

(AFTER HOWDEN)





FUSION LINE



$\uparrow = 20 \text{ SEC}$



$\uparrow = 30 \text{ HR}$



$\uparrow = 10 \text{ HR}$



$\uparrow = 100 \text{ HR}$

— 5 cm<sup>3</sup>/100g

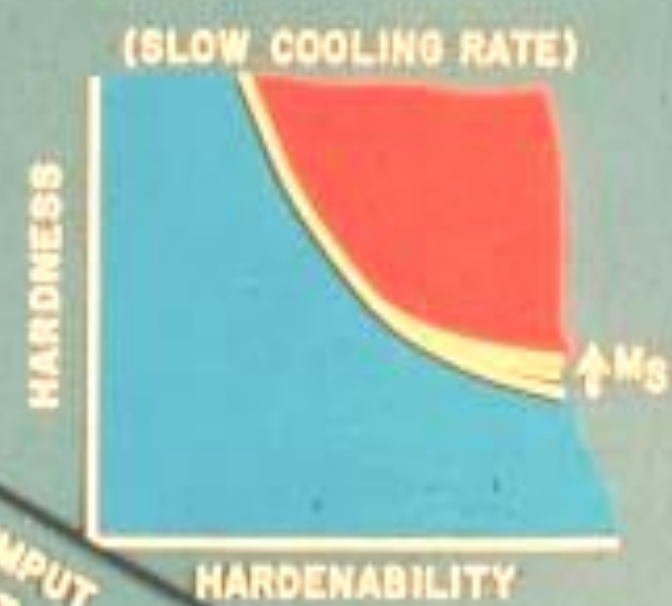
— 1 cm<sup>3</sup>/100g

— .5 cm<sup>3</sup>/100g

— .1 cm<sup>3</sup>/100g

— .05 cm<sup>3</sup>/100g

(AFTER POKHODNYA)



INCREASED HEAT INPUT  
INCREASED PREHEAT  
INCREASED STRESS RELIEVING  
DECREASED HYDROGEN

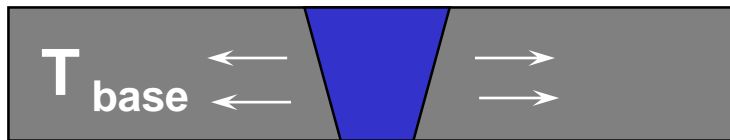
- SAFE REGION
- CRACK SENSITIVE REGION

# Why Preheat?

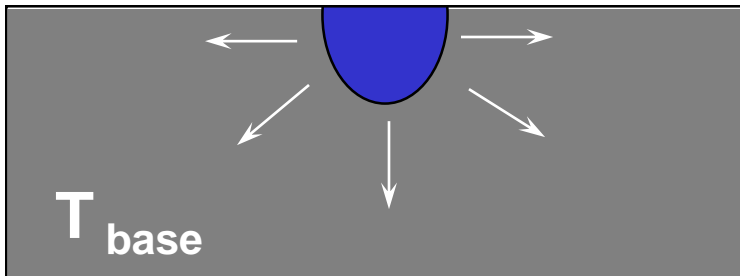
- Preheat reduces the temperature differential between the weld region and the base metal
  - Reduces the cooling rate, which reduces the chance of forming martensite in steels
  - Reduces distortion and shrinkage stress
  - Reduces the danger of weld cracking
  - Allows hydrogen to escape

# Using Preheat to Avoid Hydrogen Cracking

- If the base material is preheated, heat flows more slowly out of the weld region
  - Slower cooling rates avoid martensite formation
- Preheat allows hydrogen to diffuse from the metal



$$\text{Cooling rate} \propto (T - T_{\text{base}})^3$$



$$\text{Cooling rate} \propto (T - T_{\text{base}})^2$$



# Interaction of Preheat and Composition

$$CE = \%C + \%Mn/6 + \%(Cr+Mo+V)/5 + \%(Si+Ni+Cu)/15$$

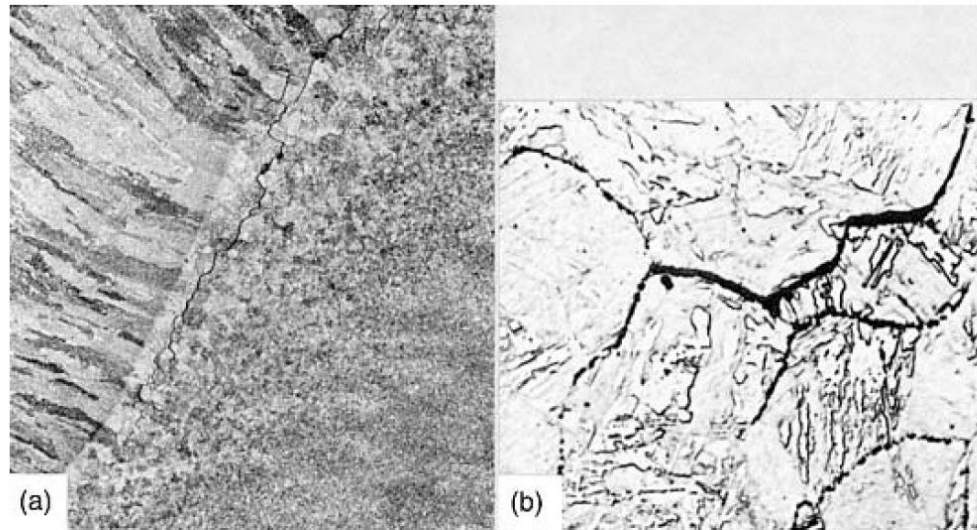
- Carbon equivalent (CE) measures ability to form martensite, which is necessary for hydrogen cracking
  - $CE < 0.35$  no preheat or postweld heat treatment
  - $0.35 < CE < 0.55$  preheat
  - $0.55 < CE$  preheat and postweld heat treatment
- Preheat temp. as CE and plate thickness

- Mo-V and Mo-B steels susceptible
- Due to high temperature embrittlement of the heat-affected zone and the presence of residual stress
- Coarse-grained region near fusion line most susceptible

### Prevention by

- Low heat input welding
- Design to avoid high restraint
- Restrict vanadium additions to 0.1% in steels
- Dress the weld toe region to remove possible areas of stress concentration

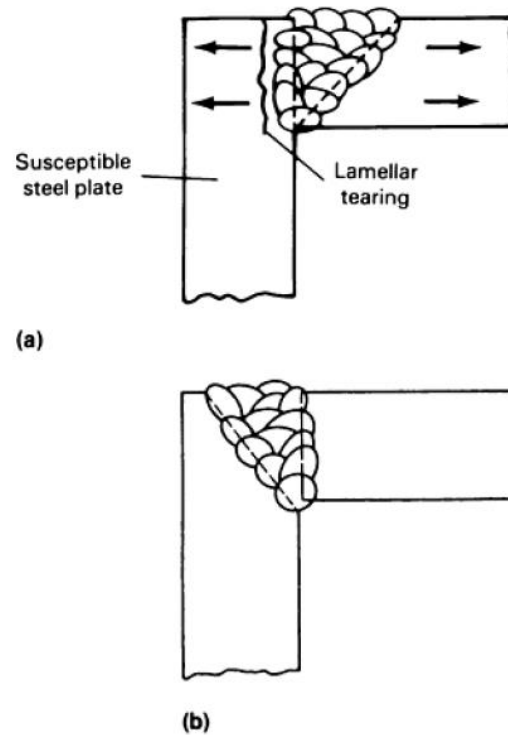
## عیب بازگرمی Reheat Cracking



**Figure 17.25** Reheat cracking in a CrMoV steel: (a) macrostructure (magnification  $\times 35$ ); (b) microstructure (magnification  $\times 1000$ ). The cracks are along the prior austenite grain boundaries of the bainitic structure. From Bailey (27).

$$CS = \%Cr + 3.3 \times (\%Mo) + 8.1 \times (\%V) - 2$$

# عیب پارگی لایه ای Lamellar Tearing



LAMELLAR TEARING SURFACES AT THE EXPOSED PLATE EDGE. (B) REDESIGNED

## پیچیدگی در جوشکاری (distortion)

● ماهیت پیچیدگی:

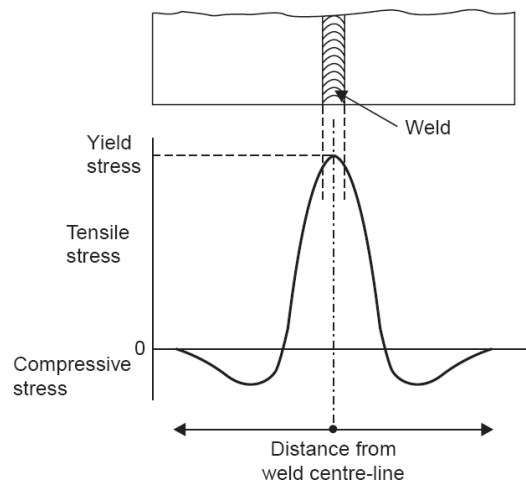
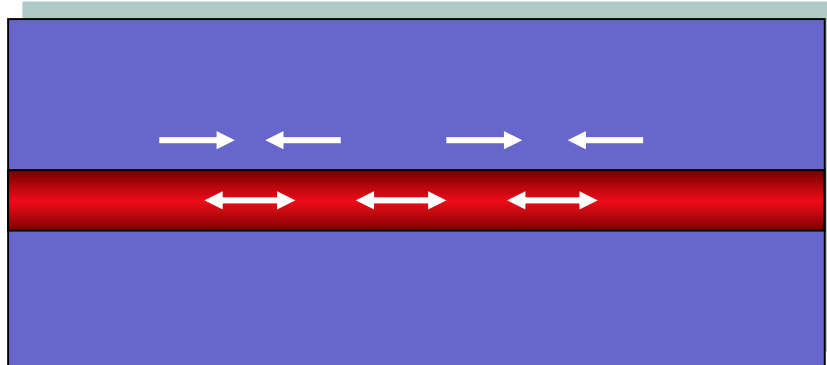


Fig. 5.22 Distribution of residual stresses in a butt-welded joint

$$l = l_o(1 + \alpha\Delta t)$$

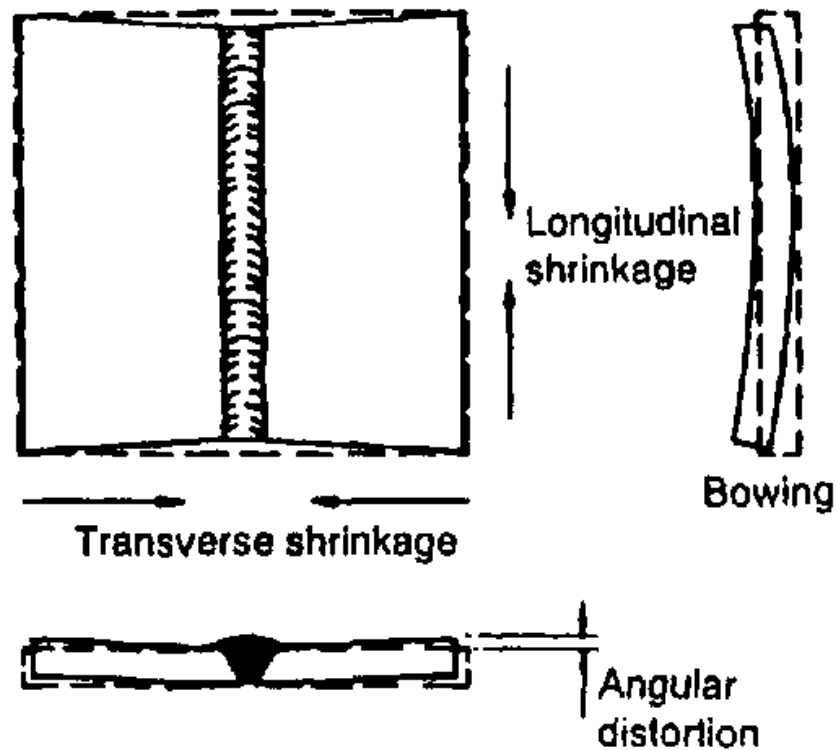
$$\varepsilon = \Delta l / l$$

$$\sigma = \varepsilon E$$



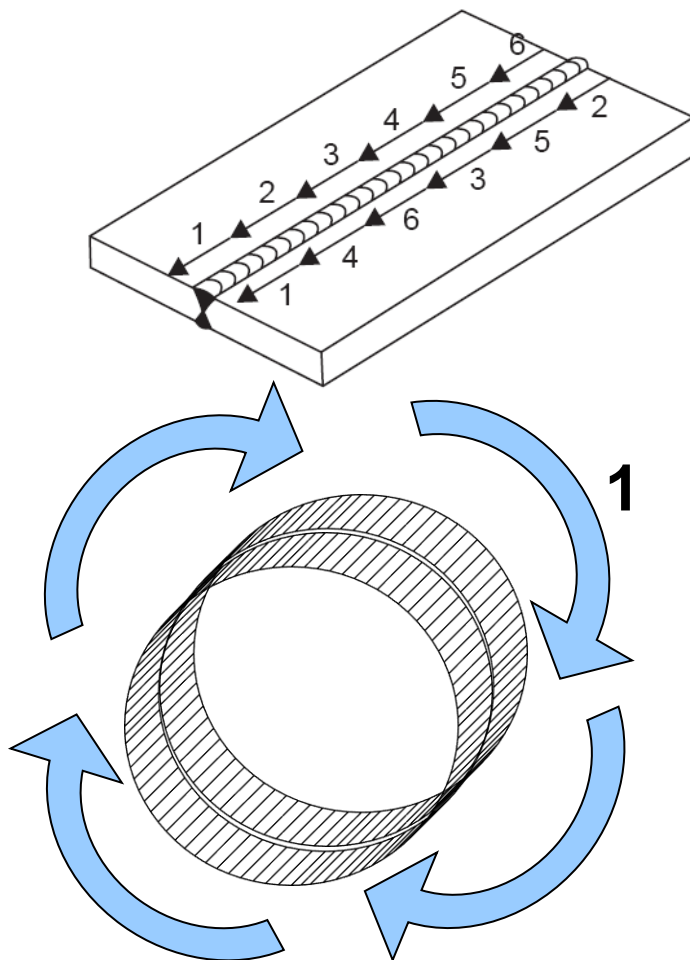
$$S = X.E.\alpha.\Delta t$$

## انواع پیچیدگی



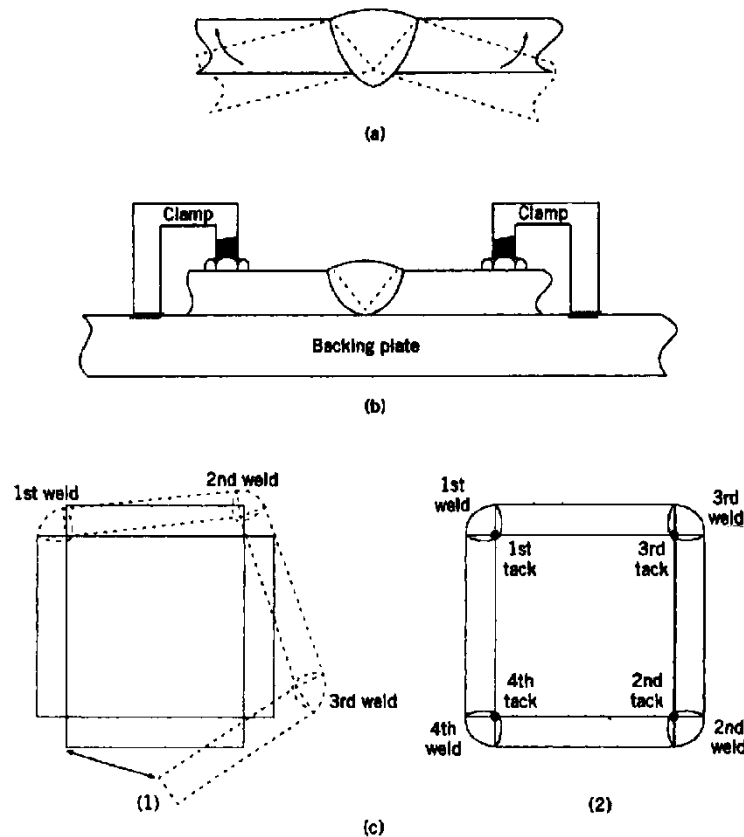
- انقباض طولی
- انقباض عرضی
- پیچیدگی زاویه ای
- طبه و موج افتادن

## عوامل موثر بر پیچیدگی



- جنس قطعه
- تمرکز حرارتی
- تنشهای پسماند اولیه
- طرح اتصال
- تعداد پاسها
- پیشگرم کردن
- مونتاژ اجزا
- ترتیب و توالی جوش

# راه‌های ممانعت از پیچیدگی قبل از جوشکاری



• پیش‌سوار کردن

• مهار کردن

استفاده از قید و بند

استفاده از خال جوش

Figure 7.14 Techniques for preventing or minimizing distortion, including (a) presetting, (b) rigid fixturing, and (c) sequencing welds (or weld sequencing.)



## راه‌های بازسازی پیچیدگی بعد از جوشکاری

- ماشینکاری
- پرس یا چکش کاری
- حرارت دهی موضعی

## مشخصات روش جوشکاری Welding Procedure Specification

WPS یا مشخصات روش جوشکاری عبارت است از یک دستور العمل به منظور فراهم کردن روش جوشکاری مطابق با ملزومات یک آیین نامه

.

## ثبت ارزیابی روش جوشکاری Procedure Qualification Record

PQR یا ثبت روش ارزیابی روش جوشکاری عبارت است از ثبت متغیرها و همچنین نتایج آزمایش های انجام گرفته روی نمونه (Test Coupon) که طبق WPS جوشکاری شده است.

## ارزیابی جوشکار

برای ارزیابی جوشکار ، یک جوش که دستور العمل آن مورد تایید است توسط جوشکار در وضعیت مورد نظر انجام می گیرد . بر حسب نتایج حاصل از آزمایشات ، صلاحیت جوشکار مورد ارزیابی قرار می گیرد.

برای بررسی قطعه جوشکاری شده ابتدا قطعه بصورت چشمی مورد ارزیابی قرار می گیرد، در صورت تأیید با روش رادیوگرافی بررسی می شود و یا تحت آزمایش های مکانیکی قرار می گیرد .

## آزمایش‌های ارزیابی جوشکار

ماکرواچ فرایندی است که در آن ساختار جوش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نفوذ جوش و میزان حل شدن فلز جوش و فلز پایه در هم، همچنین حضور آخال‌ها، فلاکس سرباره، تخلخل و ترک در ناحیه جوش و HAZ قابل مشاهده است.

معمولا محلول اچ بر اساس نوع آلیاژ مورد بررسی و نوع عیوب مورد بررسی انتخاب می‌شود.



## آزمایش‌های مکانیکی

-آزمایش خمش

-آزمایش کشش

تست خمش



تست کشش



## محدودیت های مربوط به وضعیت و قطر قطعه ارزیابی جوشکار

وضعیت و نوع جوش ارزیابی شده		تست ارزیابی
گوشه ای (Fillet) ورق و لواه	شیاری (Groove) ورق و لواه با قطر خارجی بیش از ۲۴ اینچ	جوش وضعیت
F F,H F,H,V F,H,O All	F F,H F,V,H F,O All	ورق - شیاری 1G 2G 3G 4G 4G,3G
F F,H F,H,V F,H,O All	- - - - -	ورقه - گوشه ای 1F 2F 3F 4F 3F,4F
F: Flat	H: Horizontal	V: Vertical      O: Overhead

## بازرسی جوش

بمنظور اطمینان از کیفیت جوش و مطابقت آن با خواسته ها و نیازها کلیه مراحل مختلف عملیات جوشکاری باید کنترل و مورد بازرسی دقیق قرار گیرند .



مراحل انجام بازرسی

-قبل از جوشکاری

- در حین جوشکاری

-بعد از جوشکاری

بازرسی در مراحل فوق موجب کاهش هزینه های تعمیرات و دوباره کاری شده و حصول جوش بدون عیب و با کیفیت بالا را تضمین می نماید.

## بازرسی قبل از جوشکاری

مواردی که قبل از انجام عملیات جوشکاری باید کنترل و بازرسی گردد:

-ارزیابی جوشکاری و تأیید صلاحیت آن جهت جوشکاری مورد نظر

-نحوه مونتاژ قطعات و کنترل پارامترهای اتصال جوش ( Root Face , gap )  
میزان پخ زنی و غیره  
-بررسی تجهیزات مورد استفاده

-بررسی قطعات مورد جوشکاری از نظر عیوب و انحرافات مجاز ، جنس ،  
ضخامت و غیره



## بازرسی موقع جوشکاری

- بازرسی ترتیب و توالی پاسهای جوش و کنترل تمیز کاری بین پاسهای مختلف
- بررسی و کنترل پارامترهای جوشکاری (آمپر ، ولتاژ ، قطبیت و...) .
- بازرسی مواد مصرفی (از قبیل نوع الکترود و شرایط بکارگیری آن ، گاز خنثی ، فلاکس و...) ....
- کنترل درجه حرارت پیشگرم ، حفظ درجه حرارت بین پاسی در صورت لزوم
- بطور کلی کلیه مراحل جوشکاری مطابق WPS تأیید شده باید انجام گیرد و بازرس موظف است کلیه پارامترها را کنترل نماید.

## بازرسی بعد از جوشکاری

-بازرسی چشمی و کنترل عیوب مرئی و قابل رؤیت شامل بریدگی کناره جوش ، بازرسی ابعادی و مقدار جوش ، پرنشده‌گی یا نفوذ اضافی ، ترکهای سطحی در جوش و فلز پایه ، گره قطع ووصل قوس و ناهمواریهای سطح جوش، تقعر و تحدب سطح جوش و غیره

-کنترل تنش زدائی و عملیات پس گرم (در صورت لزوم)

-کنترل پیچیدگی و تغییر شکل‌های حاصل از جوشکاری

-بازرسی های غیر مخرب





A photograph of a rustic courtyard. On the left, a window with dark brown shutters is partially open, with a large potted fern sitting on the sill. To the right of the window, a small, ornate black lantern hangs on the wall. A stone staircase leads up from the bottom right towards the center of the image. The walls are made of rough, aged stone and plaster, with some areas showing peeling paint. Various green plants, including ferns and leafy shrubs, are potted throughout the scene. The overall atmosphere is old and charming.

با سپاس فراوان از توجه شما عزیزان