متالورژی جوشکاری ۳

مدرس: مهندس معین ایمانی

دانشگاه فنی انقلاب اسلامی تهران
انیستیتو مکانیک

توضیحات:

جزوه پیش رو، جزوه ای است که برای تدریس آنلاین درس متالورژی جوشکاری ۳، در دانشکده فنی انقلاب اسلامی تهران تدوین شده است. توضیحات این جزوه در کلاس های آنلاین و فایل هایی که برای دانشجویان ارسال می شود ارائه خواهد شد.
همچنین با توجه به پیشروی کلاس ممکن است تغییراتی در مطالب جزوه ایجاد شود که نسخه ی نهایی جزوه در انتهای ترم در اختیار دانشجویان عزیز قرار خواهد گرفت.

نحوه ارتباط با مدرس:

Email: moein.imani91@gmail.com
Telegram ID: M_Imani1991

متالورژی جوشکاری ۳

مدرس: مهندس معین ایمانی

دانشگاه فنی انقلاب اسلامی تهران
انیستیتو مکانیک

سرفصل ها:

۱- واکنش های شیمیایی فلز جوش
۲- حرکت در حوضچه ی مذاب جوش
۳- اثر نیروهای متفاوت در حوضچه ی مذاب جوش
۴- تنش های باقی مانده در جوش
۵- ساختار حوضچه ی مذاب و تاثیر نرخ سرد شدن بر روی آن
۶- شکل دانه بندی در حوضچه ی مذاب
۷- طریقه ی جوانه زنی هم بافته
۸- طریقه ی رشد رقابتی
۹- اثر پارامترهای جوش در ساختار آن
۱۰- طریقه ی انجماد فلز جوش و بررسی فضای شبکه

پیش نیازها:

- **علم مواد**
- **متالورژی فیزیکی** (حداقل فصول ۶-۲ کتاب آشنایی با متالورژی فیزیکی – سیدنی اونر – (مترجم عبدالوحید فتی)
- **متالورژی جوشکاری کاردانی**

References:

1- Welding Metallurgy – Second Edition - Sindo Kou
(متالورژی جوشکای – ترجمه ی دکتر مرتضی شمعانیان- دکتر علی اشرفی – دانشگاه صنعتی اصفهان)
2- Metallurgy of Welding - Sixth Edition - J. F. Lancaster
3- Structure of the welded joint - (IWE)
4- Welding stresses and distortion - (IWE)

هدف درس:

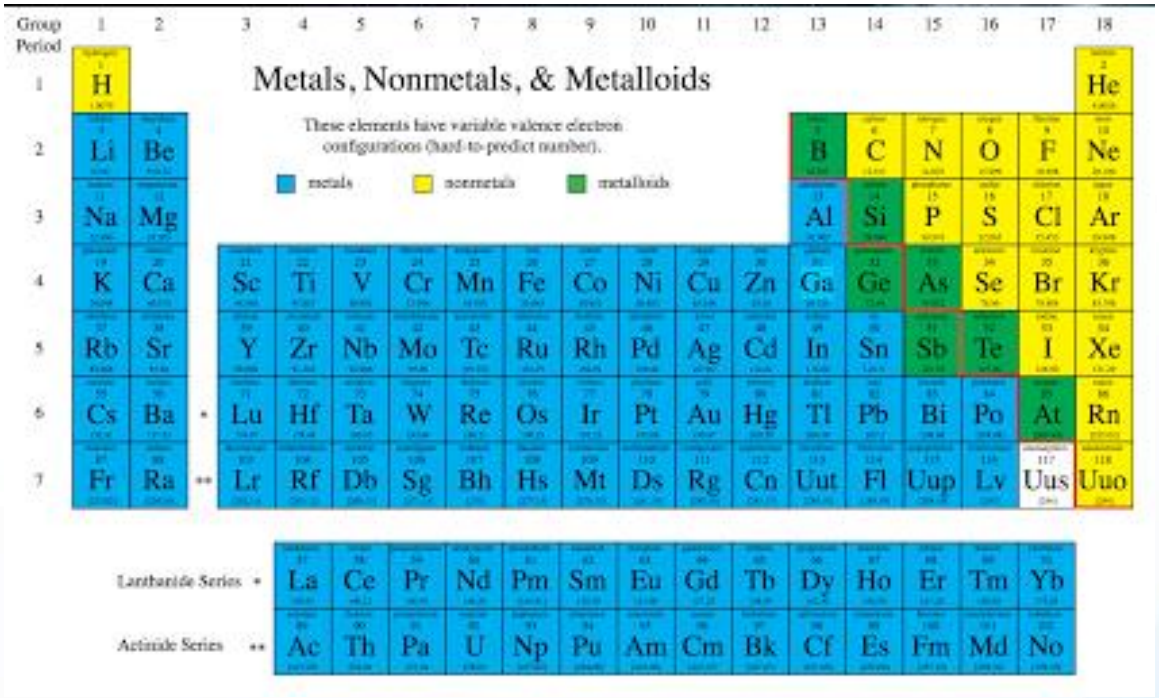
- شناسایی پدیده های متالورژیکی حین جوشکاری و اتصال
- توانایی تحلیل، پیش بینی پدیده های متالورژیکی در جوشکاری و برطرف کردن مشکلات
- توانایی کنترل خواص جوش
- چگونگی تحلیل ایده ها و تفکر انتقادی

نحوه ی ارزشیابی:

- **تکلیف در طول ترم (۲ نمره)**
- **کوئیز (۲ نمره)**
- **سمینار و گزارش پروژه – (۴ نمره)**
- **امتحان کتبی – (۱۲ نمره)**

مروری بر مهم ترین مفاهیم متالورژی فیزیکی

عنصر، اتم، مواد و پیوند ها

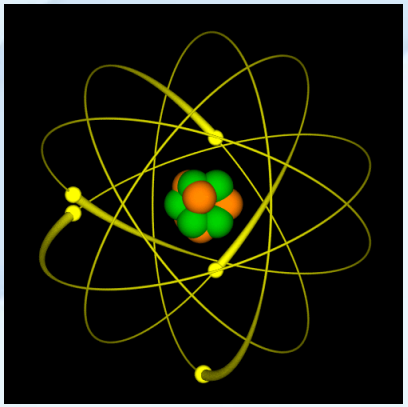


تعریف عنصر؟

ماده ای که فقط حاوی یک نوع مشخصی از اتم ها باشد.

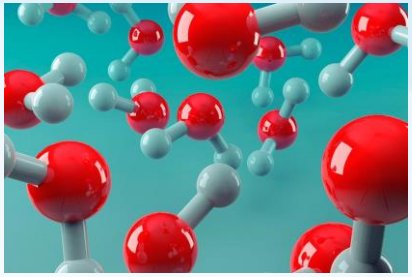
تعریف اتم؟

کوچکترین واحد تشکیل دهنده یک ماده است که خواصی مشابه آن ماده را داراست.



تعریف مواد؟

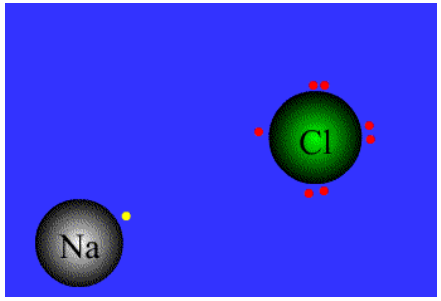
از کنار هم قرار گرفتن اتم ها (یک یا چند نوع اتم) مواد ساخته می سود.



چه چیزی اتم ها را کنار هم نگه می دارد؟

پیوندهای اتمی

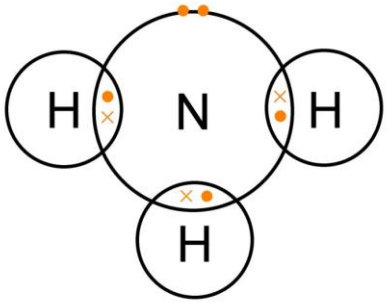
انواع پیوند ها



پیوند یونی

بر اساس تبادل الکترونی بین اتم ها به جهت کاهش انرژی آزاد (تشکیل یون)

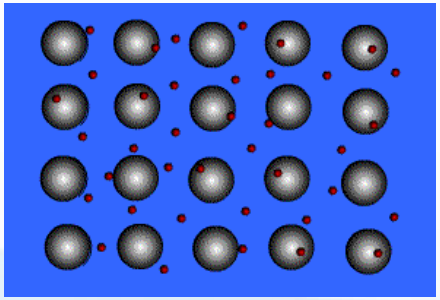
مثال: نمک طعام، سرامیک ها و ...



پیوند کوالانسی

بر اساس به اشتراک گذاشتن الکترون های یکدیگر به جهت رسیدن به حالت تعادل در تعداد الکترون های لایه آخر

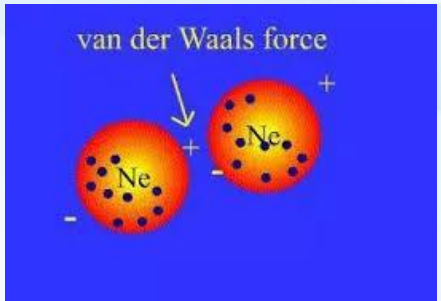
مثال: آمونیاک، سرامیک ها و ...



پیوند فلزی

گسترش پیوند کوالانسی بین چندین اتم که سبب تشکیل ابر الکترونی از الکترون های ظرفیت می گردد.

مثال: فلزات، آلیاژها



پیوند واندروالس

حضور نیروهای جاذبه ی ضعیف بین قطب مثبت و منفی (هسته و الکترون)

مثال: گازهای نجیب: هلیوم، نئون، آرگون و ...

انواع پیوندهای اتمی

انواع مواد

تقسیم بندی مواد
(کلاسیک)

فلزات (Metals)

عناصری هستند که دارای الکترون های ظرفیت در اربیتالهای آخرشان هستند و میل به دادن الکترون دارند.

مثال: آهن، آلومینیوم، تیتانیوم، مس و ...

سرامیک ها (Ceramics)

سرامیک ها مواد غیر فلزی هستند که از ترکیب فلزات یا غیر فلزات با عناصر دیگر تشکیل شده باشند.
ترکیبی از عناصر فلزی با اکسیژن (سرامیک های اکسیدی) و مواد سختی نظیر کاربیدها، نیتریدها، سیلیسیدها (سرامیک های غیر اکسیدی).

مثال: آلومینا (Al_2O_3)، زیرکنیا(ZrO_2)، شیشه (SiO_2) و ...

پلی مرها (Polymers)

از هم کنار قرار گرفتن مولکول ها و عناصر آلی C، H2، Cl، F، O و ... به شکل زنجیره ای پلیمر ها ساخته می شوند.

مثال: پلاستیک ها، رزین و پروتوئین ...

کامپوزیت ها (Composite)

به ترکیب ماکروسکوپی دو یا چند ماده مجزا که دارای خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی متفاوتی هستند که پس از ترکیب شدن، خواص کاملا متفاوتی را نسبت به اجزای سازنده ی خود بوجود می آورند.
ترکیب هر یک از سه ماده ی فلز، سرامیک و پلیمر به شکلی که یکی از آن ها فاز زمینه و دیگری به صورت پراکنده در زمینه قرار گرفته باشد.

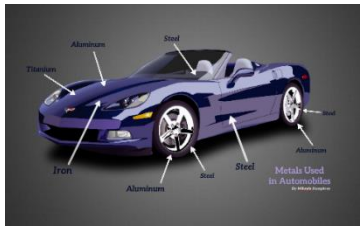
مثال: چوب، بتن، کامپوزیت های زمینه فلزی، سرامیکی، پلیمری

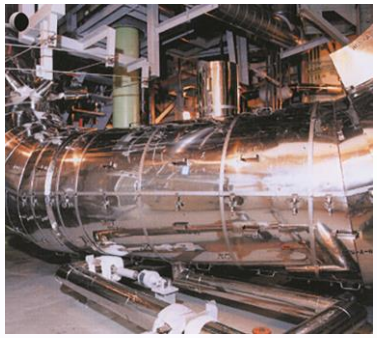
خواص فلزات

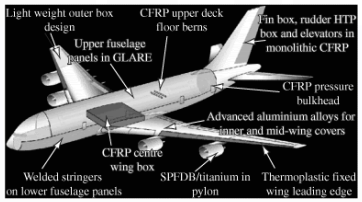
فلزات (Metals)

- دارای ساختار اتمی کریستالی در حالت جامد
- فلزات مدرن دارای ساختار اتمی آمورف هستند (مواد آمورف فلزی)
- هدایت الکتریکی و حرارتی بالا
- هدایت الکتریکی و حرارتی بالا
- استحکام و تافنس بالا
- قابلیت بازتاب نور (جلا)
- پیوندهای فلزی

کاربرد فلزات





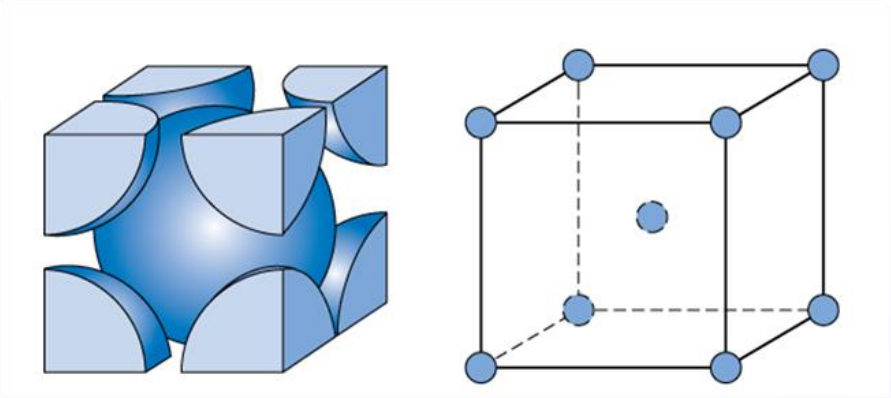


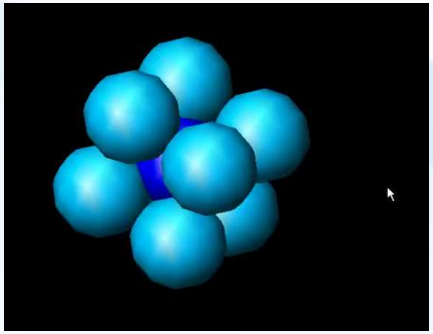
ساختار اتمی فلزات

به طور کلی در فلزات، اتم ها با یک چینش مشخص و منظمی کنار هم قرار می گیرند که به آن ساختار کریستالی می گویند.

عمده ترین ساختارهای کریستالی در فلزات: BCC, FCC, HCP هستند.

Body-centered cubic (BCC)



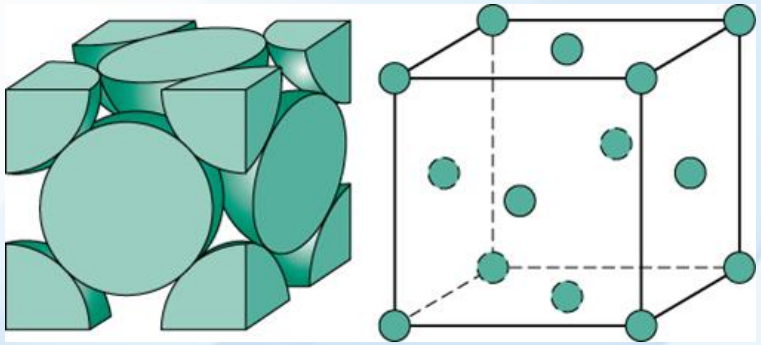


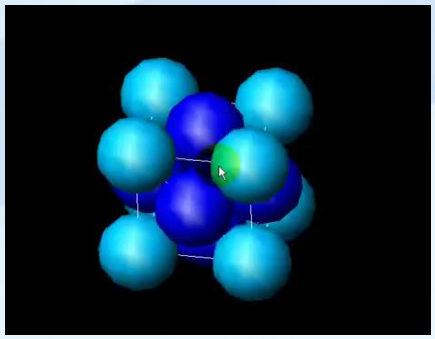
دارای ۲ اتم کامل

APF: 68%

Fe (α) – Fe (δ) – Cr- W- Mo- V- Na

Face-centered cubic (FCC)





دارای ۴ اتم کامل

APF: 74%

Fe (Ɣ) – Al- Cu- Ni- Au- Ag- Pb- Pt-

ساختار اتمی فلزات

پدیده ی آلوتروپی؟

در برخی از عناصر، ماده در حالت جامد می تواند در شبکه های کریستالی متفاوتی متبلور شود.

Allotrops of iron :
(α-Fe): – 910 ° C – (BCC)
(γ-Fe): 910 - 1400 ° C – (FCC)
(δ-Fe): 1400 – 1537 ° C – (BCC)

Allotrops of Ti :
(α-Ti): – 882 ° C – (HCP)
(β-Ti): + 882° C – (BCC)

Allotrops of Co :
(β-Co): - 417 ° C – (HCP)
(α-Co): + 417 ° C – (FCC)

Allotropes of carbon:
a) Diamond
b) Graphite
c) Lonsdaleite
d) C60 (Buckminsterfullerene or buckyball),
e) C540
f) C70
g) Amorphous carbon
h) single-walled carbon nanotube

Hexagonal close-packed (HCP)

HEXAGONAL CLOSED PACKED

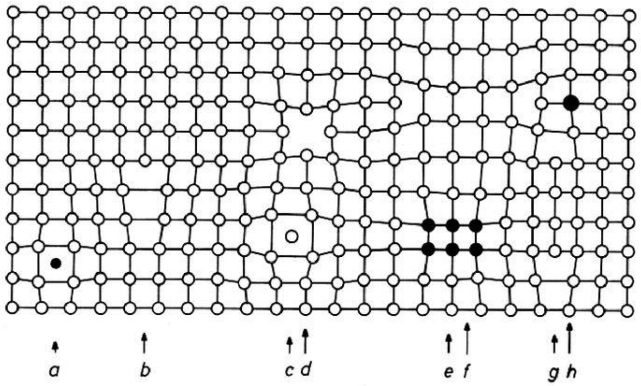
دارای ۶ اتم کامل

APF: 74%

Mg – Br- Cd- Hf- Ti-

- Lecturer: M. Imani (Moein.imani91@gmail.com)

نواقص کریستالی



Defect

a) Interstitial impurity atom
b) Edge dislocation
c) Self interstitial atom
d) Vacancy
e) Precipitate of impurity atoms
f) Vacancy type dislocation loop
g) Interstitial type dislocation loop
h) Substitutional impurity atom

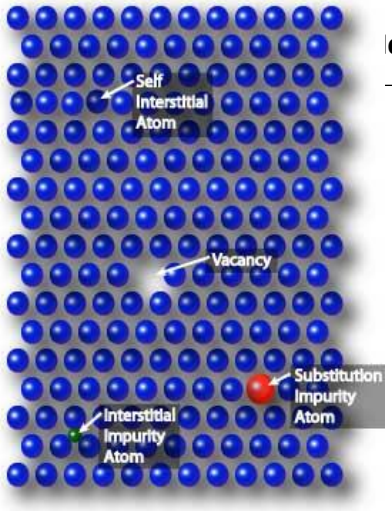
می دانیم یک قطعه فلزی از به هم پیوستن میلیاردها شبکه ی کریستالی بوجود آمده است.

با توجه به روابط متالورژی مکانیکی، استحکام فلزات بر مبنای محاسبات، حدود ۱۰۰ – ۱۰۰۰ برابر است.

وجود این اختلاف بین حالت واقعی و تئوری، به دلیل حضور نواقص کریستالی در ماده است

تقسیم بندی نواقص

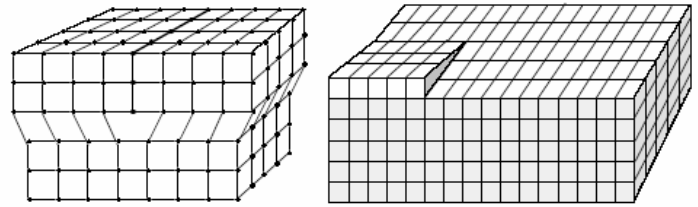
- نواقص نقطه ای (Point imperfections):
  - Vacancy – جای خالی
  - Interstitial atoms – اتم های بین نشینی
  - Substitutional atoms – اتم های جا نشینی
- نواقص خطی (1dimensional imperfections):
  - Edge dislocation – نابجایی لبه ای
  - Screw dislocation – نابجایی پیچی
- نواقص سطحی و حجمی (2 , 3 dimensional imperfections)
  - Grain boundaries – مرز دانه ها (2D)
  - Porosity – حفره (3D)



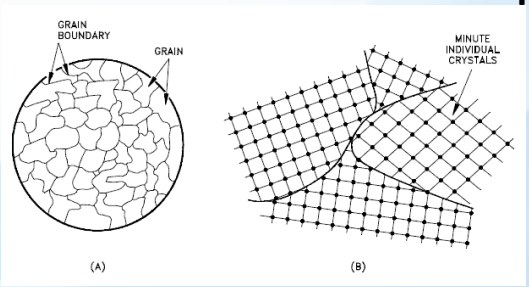
تقسیم بندی نواقص

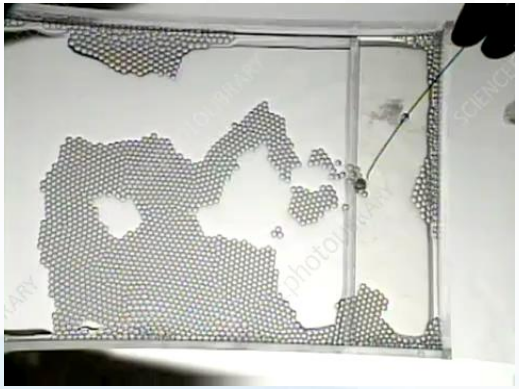
- نواقص نقطه ای (Point imperfections):
  - جای خالی (Vacancy)
  - اتم های بین نشینی (Interstitial atoms)
  - اتم های جا نشینی- (Substitutional atoms)
- نواقص خطی (1dimensional imperfections):
  - نابجایی لبه ای (Edge dislocation)
  - نابجایی پیچی (Screw dislocation)

The dislocation line length in one cubic meter of heavily cold deformed metal can get as high as **1 light year**.

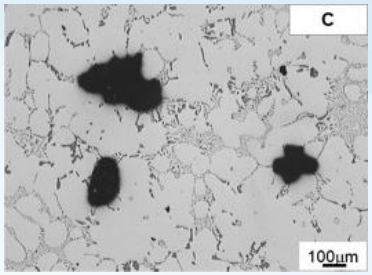


- نواقص سطحی و حجمی (2 , 3 dimensional imperfections)
  - مرز دانه ها (Grain boundaries)





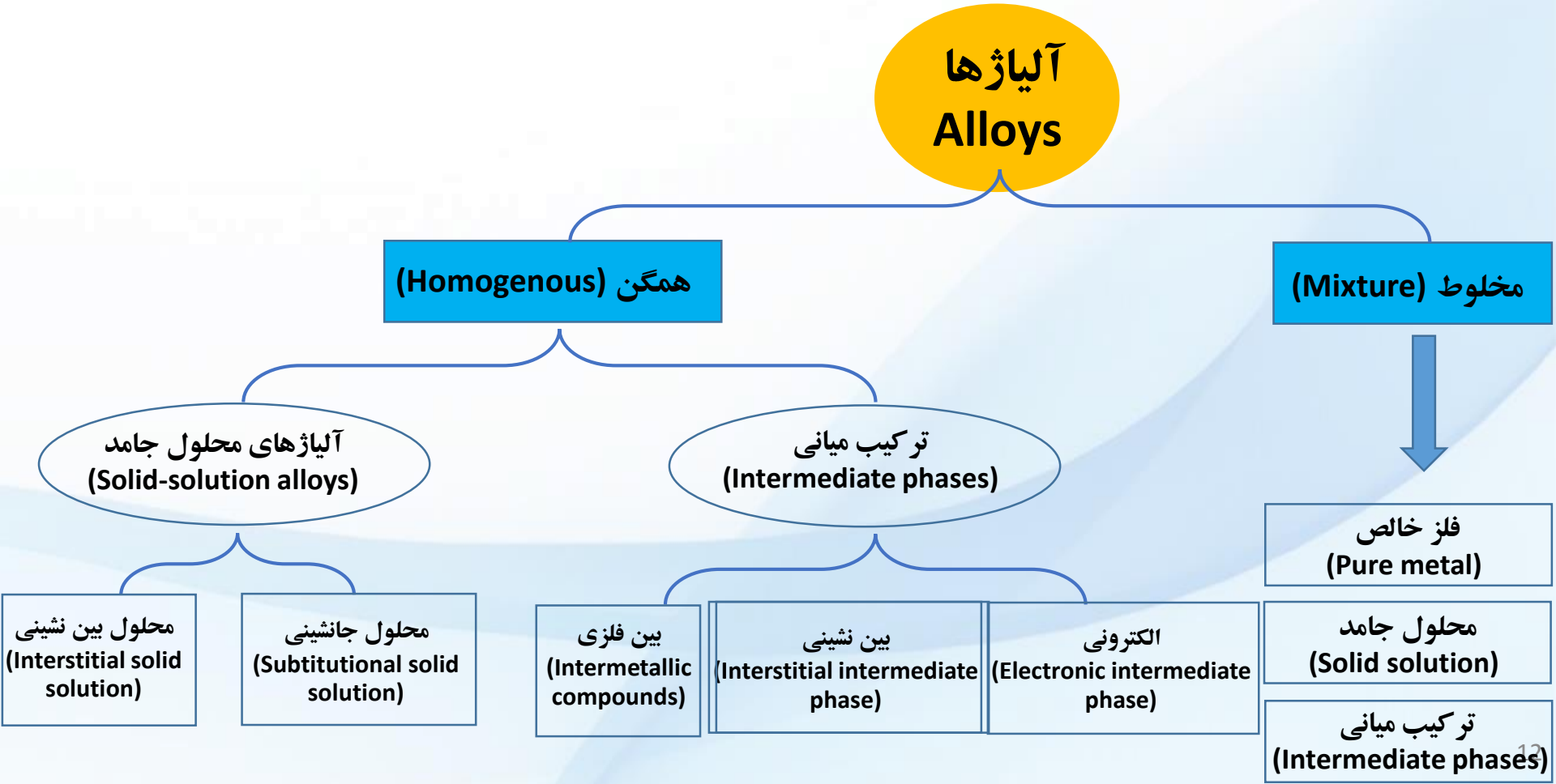
- نواقص حجمی (3 dimensional imperfections)
  - حفره (Porosity)



آلیاژها

تعریف آلیاژ؟ ترکیب دو یا چند عنصر شیمیایی که حداقل یک از آن ها فلز باشد.

هدف از آلیاژسازی؟ دستیابی به خواص مطلوب (خواص فیزیکی – شیمیایی – مکانیکی)



آلیاژها

آلیاژهای محلول جامد (Solid-solution alloys)

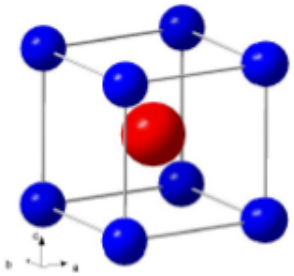
تعریف:

انحلال یکنواخت اتم های یک جز در شبکه ی کریستالی یک عنصر دیگر در حالت جامد، محلول جامد نام دارد.

هر محلول جامد دارای یک حلال و یک حل شونده است.

خواص محلول های جامد، ما بین خواص عناصر تشکیل دهنده ی آن است.

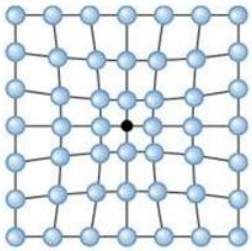
محلول جامد جانشینی (Subtitutional solid solution)

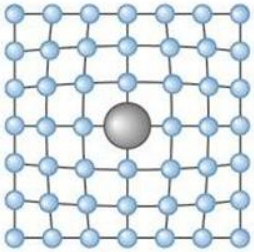


اتم های حل شونده جایگزین اتم های های ماده ی حلال در شبکه کریستالی می شوند.

مثال: اتم کبالت (محلول) در شبکه ی کریستالی آهن (حلال) جایگزین اتم آهن در مرکز شبکه ی کریستالی شده است.

مثال های معروف : مونل (محلول مس- نیکل)
برنج (محلول جامد مس- روی)
برنز (محلول جامد مس- قلع)





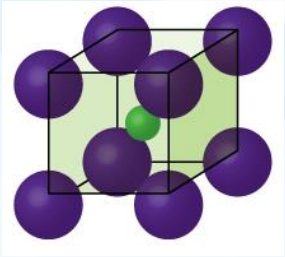
محلول های جامد بر مبنای تنش داخلی که در ماده بوجود می آورند، خواص استحکامی را توسعه می دهند.

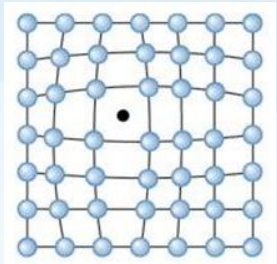
محلول جامد بین نشینی (Interstitial solid solution)

اتم هایی که می توانند محلول جامد بین نشین تولید کنند:

Hydrogen , Oxygen, Nitrogen, Carbon, Boron

مثال های معروف : فولاد (محلول جامد آهن- کربن)





محلول های جامد بر مبنای تنش داخلی که در ماده بوجود می آورند، خواص استحکامی را توسعه می دهند.

آلیاژها

ترکیبات بین فلزی (Intermetallic compounds)

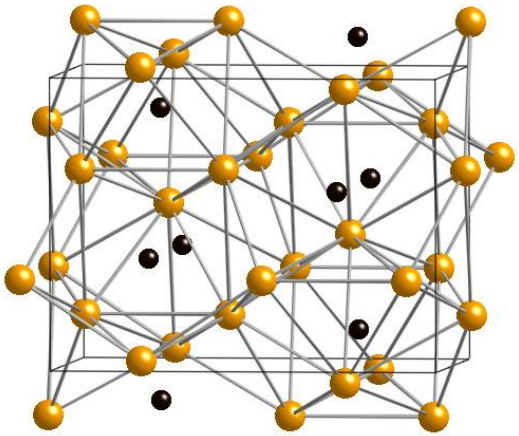
تعریف و ویژگی ها:

ترکیبی از دو یا چند عنصر فلزی یا غیر فلزی با یک فلز هستند که بر اساس قوانین ظرفیت شیمیایی با استوکیومتری کاملا مشخص در شبکه ی کریستالی کاملا منظم ترکیب می شوند.

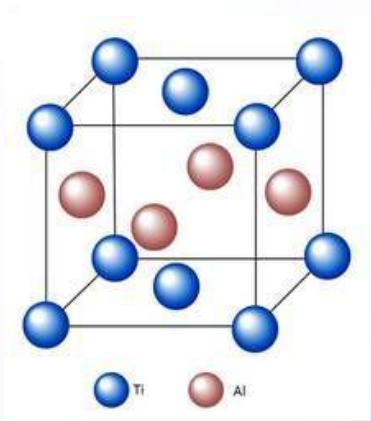
خواص ترکیبات بین فلزی، خواصی منحصر به فرد خود ترکیب است و همانند محلول های جامد، خواصی مل بین عناصر تشکیل دهنده را ندارند.

برخی از مهمترین ویژگی ها: نقطه ذوب بالا، رسانندگی الکتریکی و حرارتی کم، پلاستیسیته ی پایین (ترد)، ساختارهای کریستالی پیچیده و ....

مثال: .... Fe3C/ AlNi/ NiTi/ Ni3P/ Cu2Se/



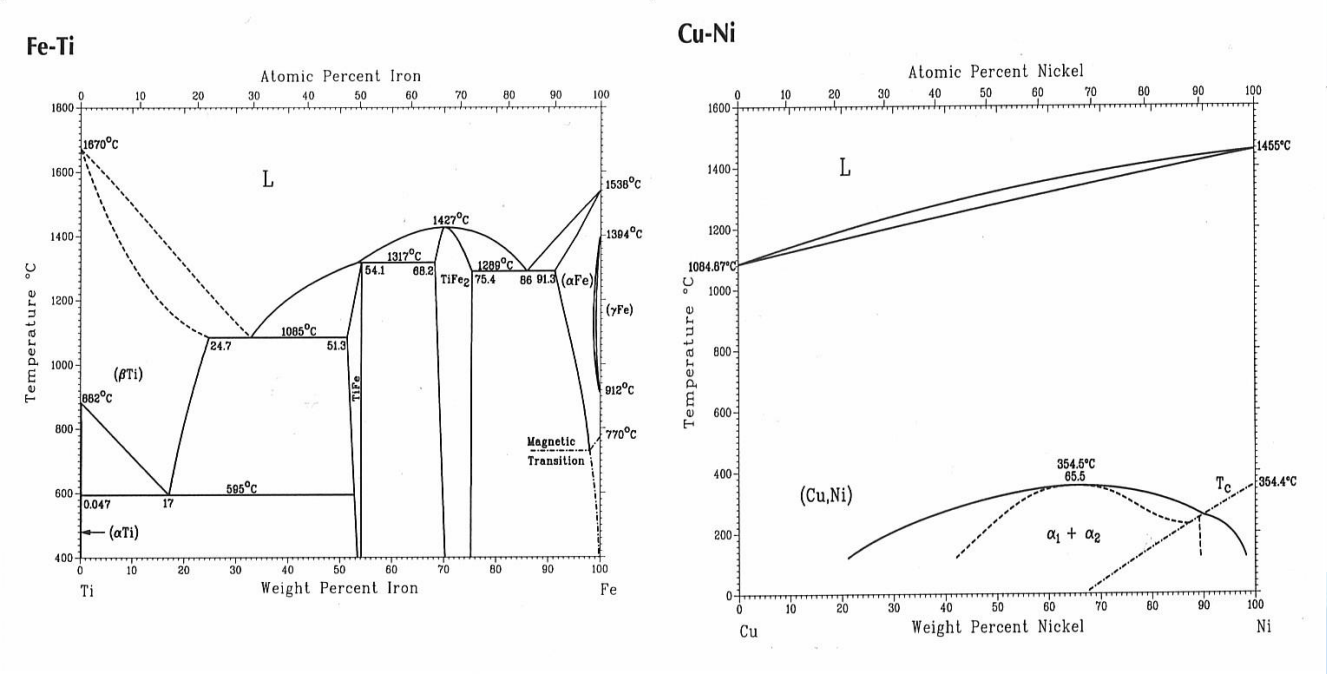
Fe3C: Orthorhombic crystal structure



NiTi: Cubic crystal structure

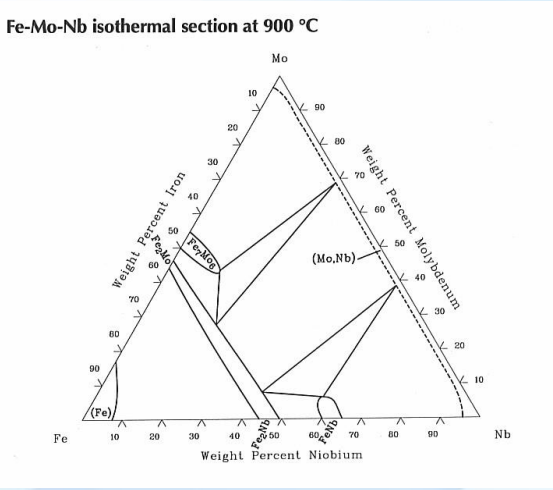
نمودارهای فازی

نمودارهای فازی، نمودراهایی هستند که تغییرات فازی در یک سیستم آلیاژی دوتایی یا سه تایی را در فشار ثابت، اما در ترکیب های شیمیایی متفاوت و دمای متفاوت نشان می دهند.



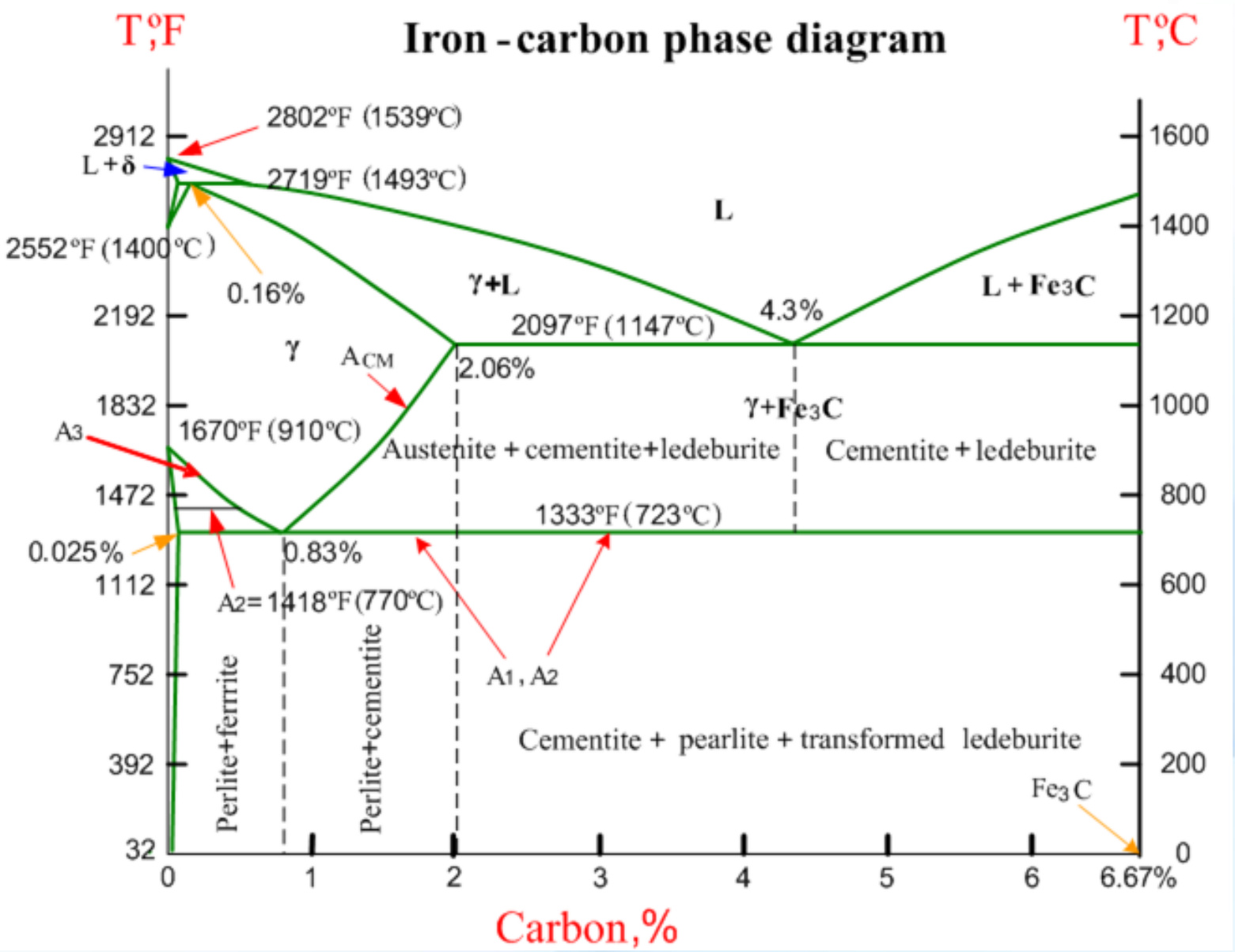
Fe-Ti phase diagram

Cu-Ni phase diagram

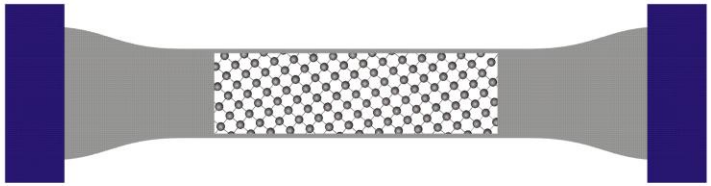


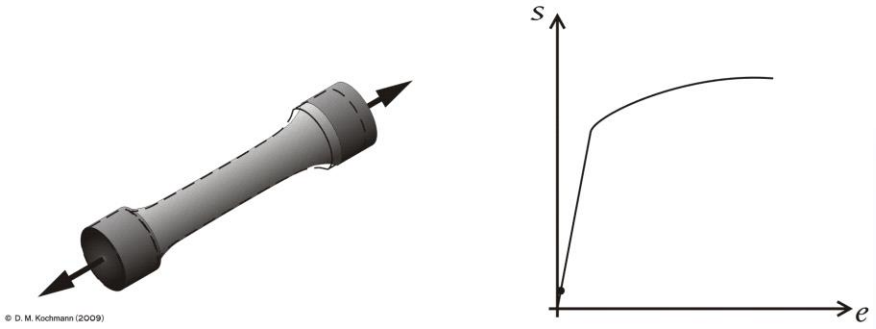
Fe-Mo-Nb phase diagram

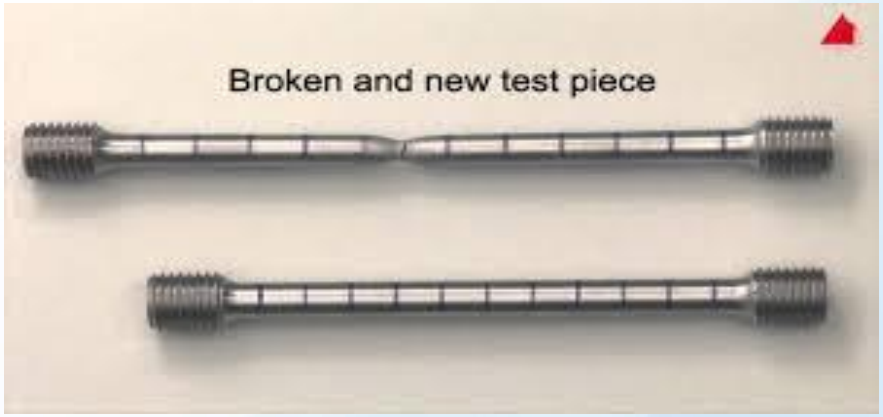
مروری بر نمودار فازی آهن – کربن

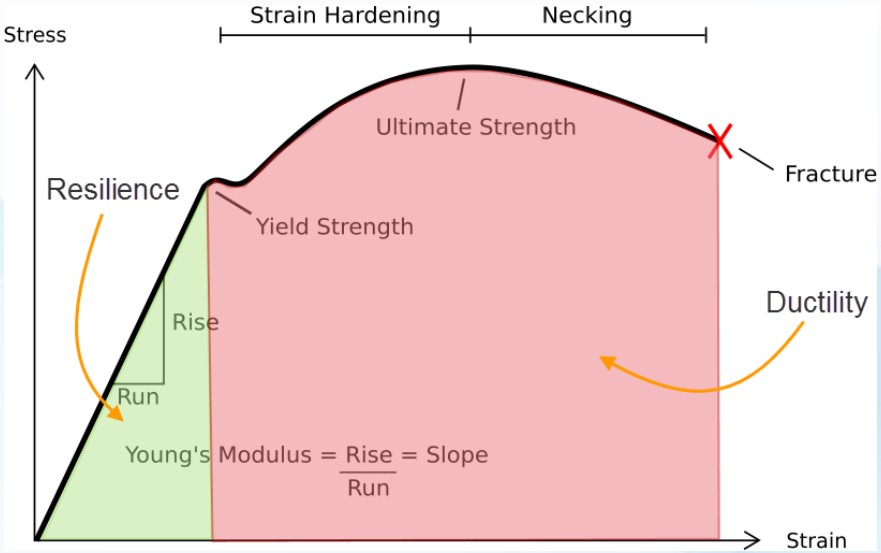


مفاهیم رفتار مکانیکی

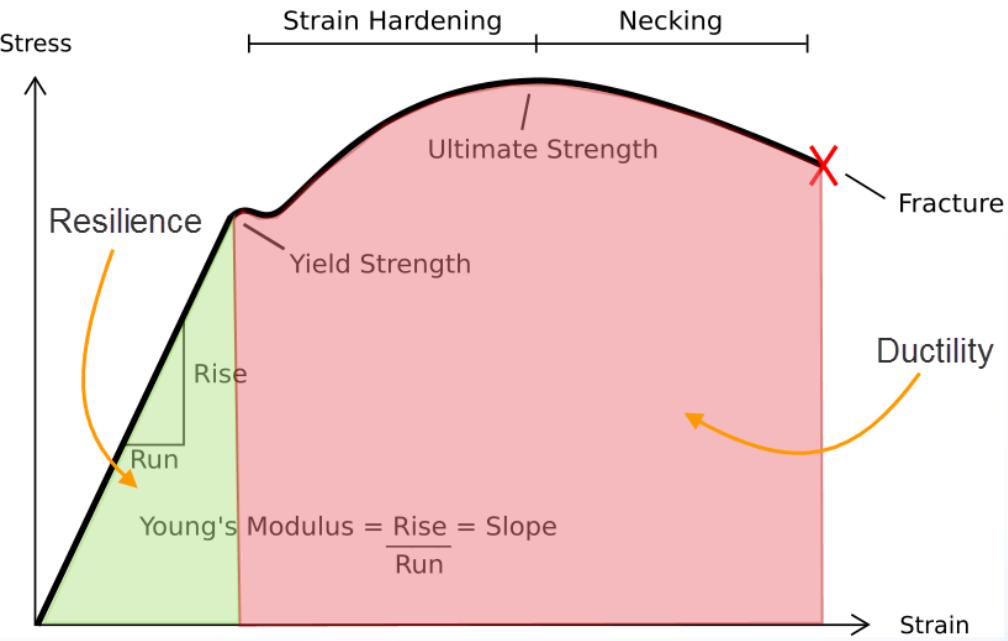








مفاهیم رفتار مکانیکی



تنش تسلیم
σ_y

نقطه ای که تغییر شکل پلاستیک آغاز می شود و قبل از آن تغییر شکل به شکل الاستیک است.

تنش نهایی
σ_{UTS}

استحکام نهایی ماده که پس از آن گلویی رخ می دهد.

تنش شکست
σ_F

استحکام شکست ماده است که پس از گلویی شدن شکست در آن رخ می دهد.

چقرمگی
Toughness

میزان کل انرژی جذب شده در ماده قبل از شکست
(مجموعه ی استحکام و انعطاف پذیری)
%R - %A

انعطاف پذیری
Ductility

میزان انرژی جذب شده پس از الاستیسیته
(انعطاف پذیری)
%E

متالورژی جوشکاری
Welding Metallurgy

خواص یک ماده
Properties of materials

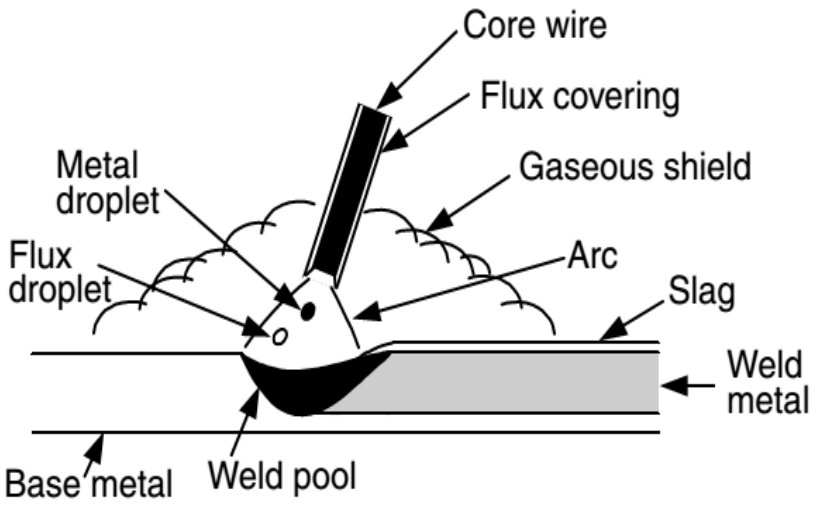
- ترکیب شیمیایی ماده
  Chemical composition
- ریزساختار ماده
  microstructure

خواص جوش؟

- خواص جوش
  - ترکیب شیمیایی فلز جوش
    - ترکیب شیمیایی فلز پایه
      - محاسبه ی درجه ی رقت
        Dilution
    - ترکیب شیمیایی فلز الکترود، روپوش و فلاکس
    - هدر رفت عناصر آلیاژی
    - واکنش های شیمیایی فلز جوش
      Reactions in welding
      - واکنش های فلز مذاب – گاز
        Gas-Metal Reactions
      - واکنش های فلز مذاب – سرباره
        Slag-Metal Reactions
  - ریزساختار فلز جوش
    - ریزساختارها و نواحی متفاوت جوش
    - طریقه ی جوانه زنی همبافته در فلز جوش
    - طریقه ی رشد رقابتی
    - روش های اصلاح ساختار دانه بندی فلز جوش
    - منطقه ی ذوب جزیی شده
    - منطقه ی متاثر از حرارت

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions



Shielded metal arc welding: (*a*) overall process; (*b*) welding area enlarged.

چرا در فلز واکنش رخ می دهد؟

به دلیل کاهش انرژی آزاد گیبس،
فلزات میل دادن الکترون های خود
و شرکت در واکنش های شیمیایی دارند.

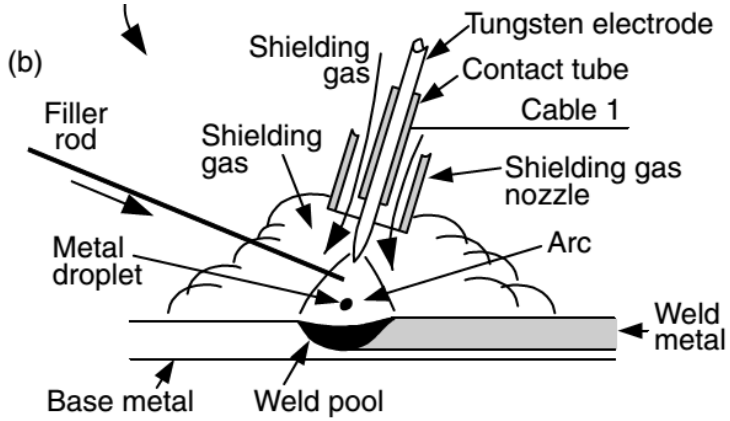
این واکنش ها درکجا رخ می دهند؟

اتمسفر جوشکاری : اتمسفر طبیعی (هوا)، گاز محافظ، گازناشی از سوختن روپوش الکترود و فلاکس، آلودگس قطعات و ...

مکان انجام واکنش ها

- **نوک داغ الکترود**
- **قطرات مذاب در حال انتقال در الکترود یا فیلرمتال**
- **فلز جوش**

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions



انواع محیط های گازی

۱- گاز اتمسفر اطراف
- N_2 - N
- O_2 - O
- H_2 - H

۲- گاز محافظ
- **Inert shield gases** Ar/He
- **Active shield gases** CO_2 / Ar+CO / $Ar+O_2$

۳- گاز حاصل از سوختن روپوش الکترود
- CO_2 - O_2
- H_2O - O_2 / H

۴- آلودگی قطعه کار و رطوبت موجود در روپوش و فلاکس H_2O – H_2

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

اثرات گازها در جوش و فلزات

- **اتم های گازی**
  - کمتر از حد حلالیت ⟸ به صورت محلول جامد
  - بیشتر از حد حلالیت ⟸ تشکیل ترکیب و فاز جدید (واکنش)
- **ایجاد حباب گازی**
  - فرصت خروج داشتن ⟸ آزاد
  - عدم فرصت خروج ⟸ مک گازی (Porosity)

آیا واکنش ها اساسا مضر هستند یا مفید؟

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

با توجه به محیط گازی، عمده ی واکنش ها توسط سه عنصر نیتروژن (N_2)، اکسیژن (O_2) و هیدروژن (H_2) رخ می دهند.

TABLE 3.1 Effect of Nitrogen, Oxygen, and Hydrogen on Weld Soundness

	Nitrogen	Oxygen	Hydrogen
Steels	Increases strength but reduces toughness	Reduces toughness but improves it if acicular ferrite is promoted	Induces hydrogen cracking
Austenitic or duplex stainless steels	Reduces ferrite and promotes solidification cracking		
Aluminum		Forms oxide films that can be trapped as inclusions	Forms gas porosity and reduces both strength and ductility
Titanium	Increases strength but reduces ductility	Increases strength but reduces ductility	

جدول ۳.۱
نگاه کلی

این واکنش ها در همه ی روش های جوشکاری می توانند رخ دهند
SMAW, GTAW, GMAW, SAW, FCAW, PAW …
فصل دوم کتاب مرجع

با چه مکانیزمی این اتفاقات رخ می دهند؟

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – نیتروژن

نیتروژن N2

- گاز محافظ – هیچ واکنش شیمیایی ⟸ Cu, Ni
- گاز فعال – همراه با واکنش شیمیایی ⟸ Fe, Ti, Mn, Cr
  - تشکیل نیترید

منابع

- اتمسفر محیط – هوا (منبع اصلی)
- اضافه شده به گاز محافظ
  - پایداری قوس الکتریکی
  - نقش آستنیت زایی در فولاد ها زنگ نزن

واکنش های فلزجوش – نیتروژن

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

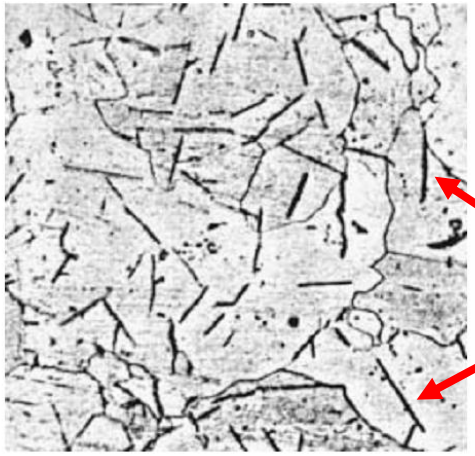


Figure 3.6 Iron nitride in a ferrite matrix (×500). From Seferian (15).

تشکیل نیترید

نیترید های ترد و تیغه ای
پیوندهای غیرفلزی

شکل ۳.۶

شکل ۳.۷

اثرات N2

افزایش استحکام تسلیم – σ_Y

افزایش استحکام کششی – σ_{UTS}

کاهش تافنس

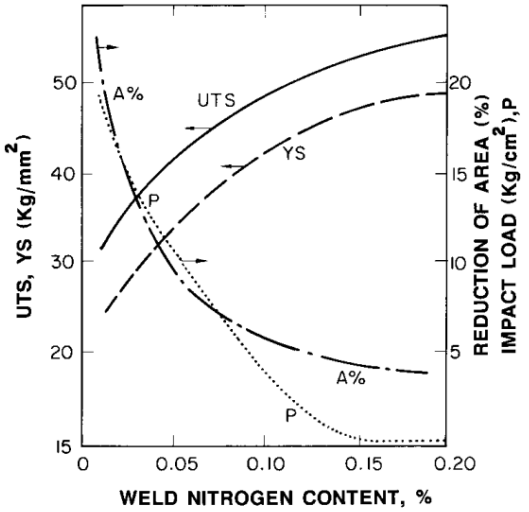


Figure 3.7 Effect of nitrogen on the room temperature mechanical properties of mild steel welds. From Seferian (15).

با افزایش مقدار نیتروژن، چرا روند افزایشی UTS و Y کاهش می یابند؟

افزایش بیش از حد نیترید ها

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – اکسیژن

منابع O_2

۱- هوا + رطوبت هوا

$O_2 \rightarrow O$

$H_2O \rightarrow H + O$

۲- تجزیه اکسیدهای داخل روپوش الکترود یا فلاکس

$FeO, SiO_2, MnO, Al_2O_3, TiO_2$, ...

۳- اکسیژن موجود در گاز محافظ

- O_2 افزودن
  - پایداری قوس الکتریکی
  - کاهش ویسکوزیته مذاب در جوشکاری فولادهای ضدزنگ
- گاز محافظ CO_2

$CO_2 (g) \rightarrow CO (g) + ½ O_2 (g)$

$CO (g) \rightarrow C (s) + ½ O_2 (g)$

۴- اکسیژن اضافی در فرایند (OFW)

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – اکسیژن

اثرات O2

ترکیب با کربن

$O_2 \rightarrow 2O$

$C + O \rightarrow$ CO, CO_2

- فقر کربن ⟸ کاهش استحکام و سختی
- تشکیل گاز ⟸ تولید Porosity

ترکیب با عناصر آلیاژی

$O_2 \rightarrow 2O$

$M + O \rightarrow MO$

$Fe \rightarrow Cr_2O_3, Al_2O_3, TiO_2$

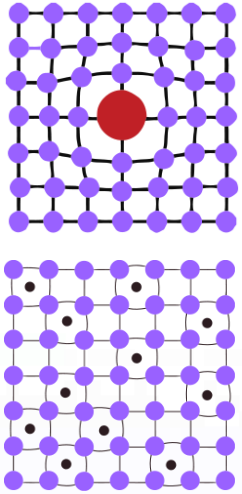
اکسیدهای فلزی

- خروج از مذاب و سرباره ⟸ فقر عناصر آلیاژی
- شناور ماندن در مذاب ⟸ تولید آخال

آیا واکنش ها اساسا مضر هستند یا مفید؟

یادآوری

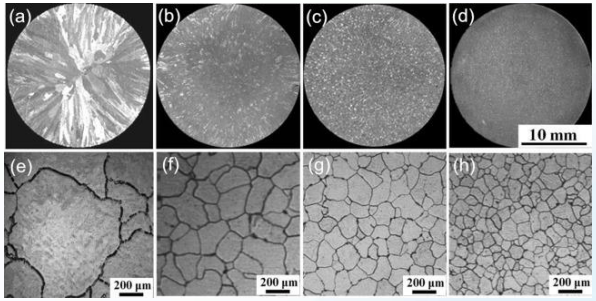
مکانیزم های استحکام دهی
Strengthening mechanisms



جانشینی
substitutional solute

بین نشینی
interstitial solute

محلول جامد (آلیاژسازی)
Solid solution strengthening and alloying



ریزدانگی
Grain boundary strengthening

استحاله های فازی
Transformation

تشکیل رسوبات
precipitation

تغیر ریزساختار
Structural Modification

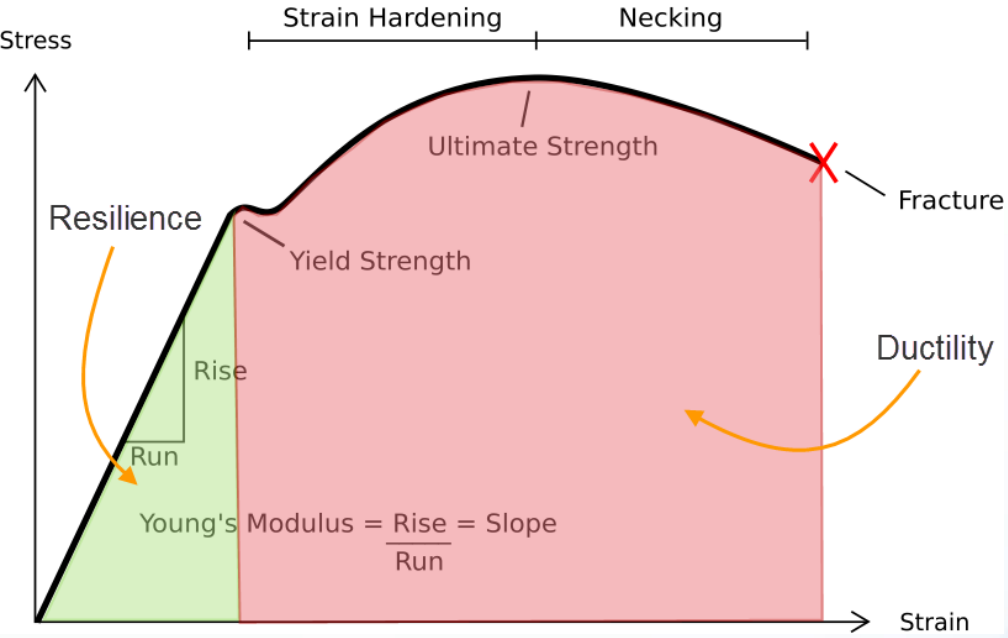
عملیات حرارتی
Heat treatment

هر عملیات مکانیکی سبب تولید و افزایش نابجایی ها می گردد که استحکام آلیاژ و فلز را افزایش می دهند.

کار مکانیکی
Work hardening

نکته: تنها مکانیزمی که همزمان سبب افزایش استحکام و تافنس می شود ریزدانگی است.

یادآوری مفاهیم رفتار مکانیکی



تنش تسلیم
σ_y

نقطه ای که تغییر شکل پلاستیک آغاز می شود و قبل از آن تغییر شکل به شکل الاستیک است.

تنش نهایی
σ_{UTS}

استحکام نهایی ماده که پس از آن گلویی رخ می دهد.

تنش شکست
σ_F

استحکام شکست ماده است که پس از گلویی شدن شکست در آن رخ می دهد.

چقرمگی
Toughness

میزان کل انرژی جذب شده در ماده قبل از شکست
(مجموعه ی استحکام و انعطاف پذیری)
%R - %A

انعطاف پذیری
Ductility

میزان انرژی جذب شده پس از الاستیسیته
(انعطاف پذیری)
%E

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – اکسیژن

TABLE 3.4 Effect of Oxygen–Acetylene Ratio on Weld Metal Composition and Properties of Mild Steel

		$a = O_2/C_2H_2 > 1$				$a \leq 1$	
	Before	$a = 1.14$	$a = 1.33$	$a = 2$	$a = 2.37$	$a = 1$	$a = 0.82$
C	0.155	0.054	0.054	0.058	0.048	0.15	1.56
Mn	0.56	0.38	0.265	0.29	0.18	0.29	0.375
Si	0.03						
S	0.030						
P	0.018						
O	—	0.04	0.07	0.09	—	0.02	0.01
N	—	0.015	0.023	0.030	—	0.012	0.023
Impact value, kg/cm^2	—	5.5	1.40	1.50	1.30	6.9	2.3
Hardness, HB	—	130	132	115	100	140	320
Grain size	—	6	5	4	4	4	5

جدول ۳.۴

$a = O_2 / C_2H_2 > 1$

کربن ⇩

منگنز Mn ⇩

تافنس ⇩

سختی ⇩

اندازه دانه ⇩

a (O_2) ⇧

سوال ۱: چرا اندازه دانه کم شده است؟
اثر جوانه زایی اکسید ها

سوال ۲: مگر ریزدانگی باعث افزایش استحکام (سختی) و تافنس نمی شود؟
فقر کربن
تشکیل اکسید های فلزی MnO
فقر عناصر آلیاژی

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – اکسیژن

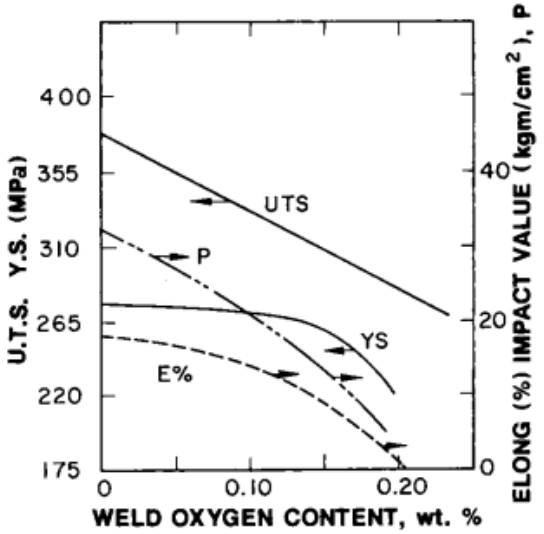


Figure 3.9 Effect of the oxygen content on the mechanical properties of mild steel welds. From Seferian (15).

UTS ⇩

Ys ⇩

% E ⇩

P (تافنس) ⇩

کاهش خواص مکانیکی

جدی گرفتن توصیه های تکنولوژی فرایند !

افزودن عناصر اکسیژن زدا – Al

افزایش بیشتر عناصر آلیاژی در فلز پر کننده یا فلاکس

پیشگیری

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – هیدروژن

منابع
H2

۱- **رطوبت :** هوا - فلاکس – روپوش الکترود – قطعه کار

۲- **تجزیه ترکیبات هیدروژن دار** فلاکس – روپوش الکترود

$(C_6H_{10}O_5) \rightarrow H_2, H_2O, CO, CO_2$
Cellulose Electrode

E6010 → 41% H_2

E6015 → 2 % H_2
Low hydrogen electrode

۳- **آلودگی های هیدروکربنی روی قطعه کار** (گریس و روغن و ...)

۴- محصولات احتراق در فرایند OFW

$(C_2H_2 + O_5) \rightarrow H_2, CO$

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – هیدروژن

اثر H_2

ترک های هیدروژنی
Hydrogen Induced Cracking (HIC)

تردی هیدروژنی
Hydrogen Embrittlement

ترغیب به ترک سرد

z	حد پذیرش	
API	a	غیرقابل قبول
	b	ترک های حفره ای کم عمق یا ترک های ستاره ای که طول آنها بیش از ۴ میلیمتر باشد
AWS		غیرقابل قبول
ISO	d	غیرقابل قبول
	c	
	b	
ASME		غیرقابل قبول

Crack!
the catastrophic defect in welds

یادآوری انواع ترک

انواع ترک

- ترک سرد
  Cold Crack
- ترک گرم
  Hot Crack
  - ترک انجمادی
    Solidification cracking
  - ترک خوردگی مایع
    Liquation cracking
- ترک بازگرمی
  Reheat crack
- ترک لایه ای
  Lamellar Crack

ترک سرد

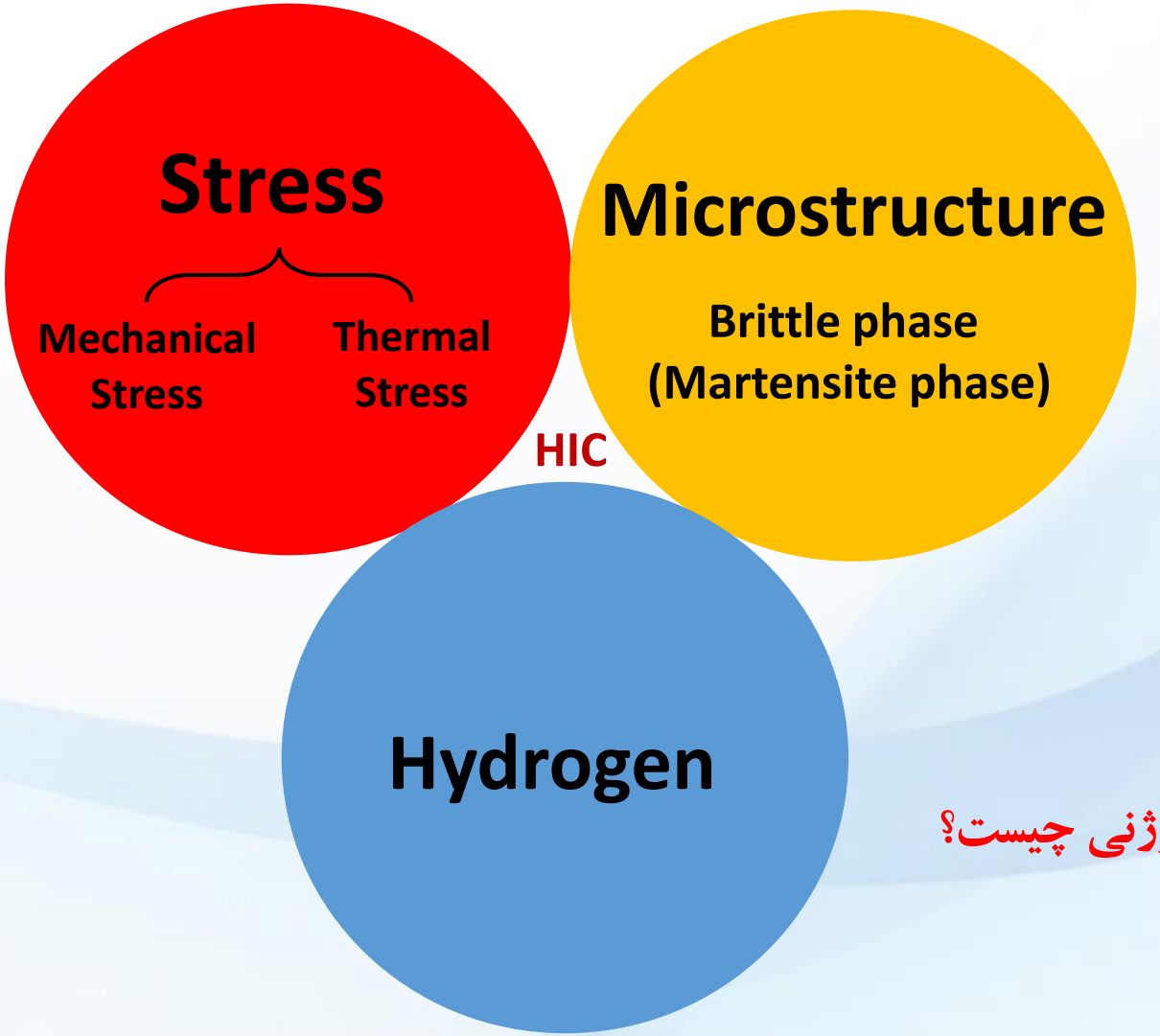
$T < 520\ ^\circ C$

پس از گذشت زمان (تا ۷۲ ساعت)

معمولا در HAZ رخ می دهد و کمتر در BM و WM

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – هیدروژن



ارکان ترک سرد ؟

مکانیزم تشکیل ترک هیدروژنی چیست؟

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – هیدروژن

هیدروژن

H atom

H2 molecule

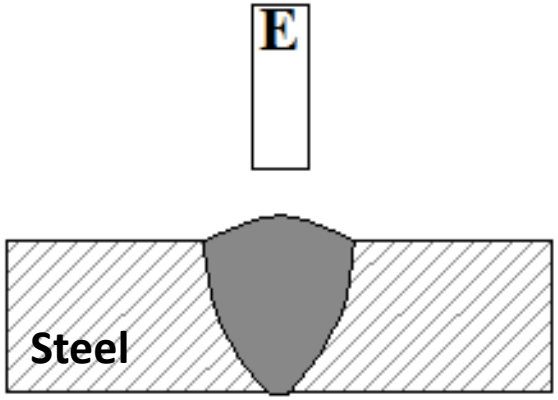
هیدروژن کوچکترین اتم در طبیعت است و به راحتی می تواند در حالت مذاب و یا جامد درون ماده حرکت کند.

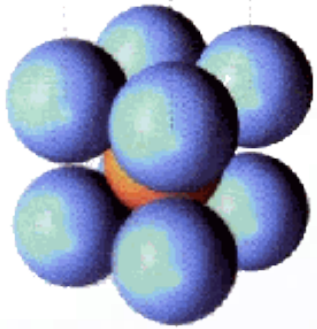
هیدروژن اتمی تمایل دارد تا به هیدروژن مولکولی تبدیل شود.

هیدروژن مولکولی حجمی معادل ۵ برابر هیدروژن اتمی دارد.

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – هیدروژن





BCC Unit Cell

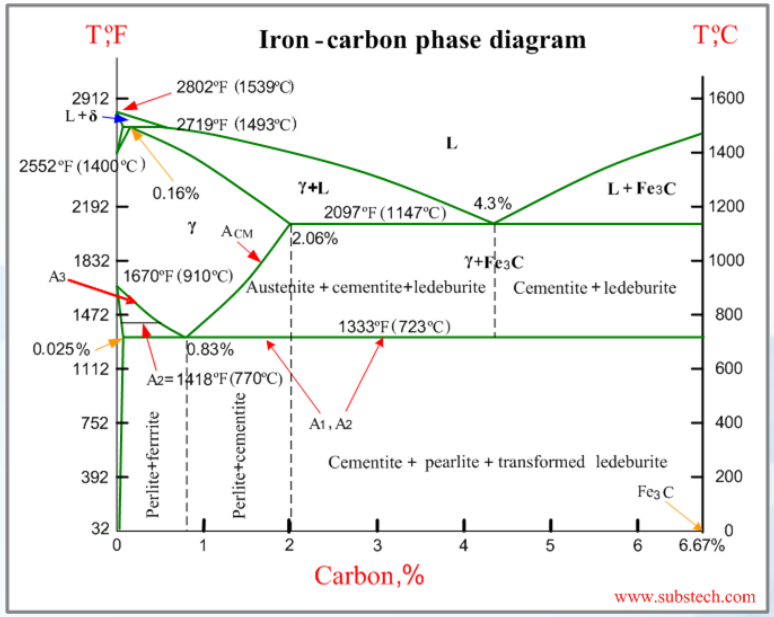
مکانیزم تردی و ترک هیدروژنی؟

ابتدا هیدروژن وارد شبکه ی کریستالی می شود.

اتم های هیدروژن به مولکول هیدروژن تبدیل می شوند و حجم ۵ برابری تشکیل می دهند.

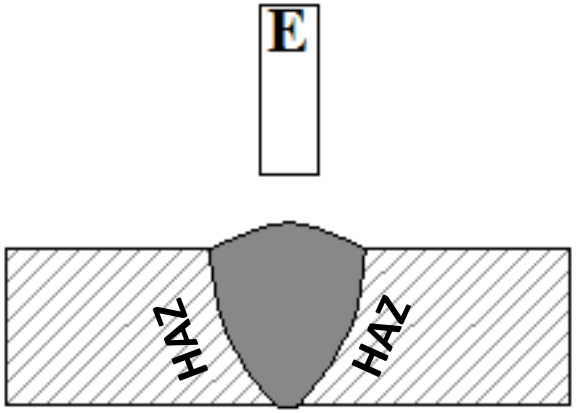
ساختار کریستالی به شدت منبسط می گردد و تنش بزرگی را در سیستم بوجود می آورد.

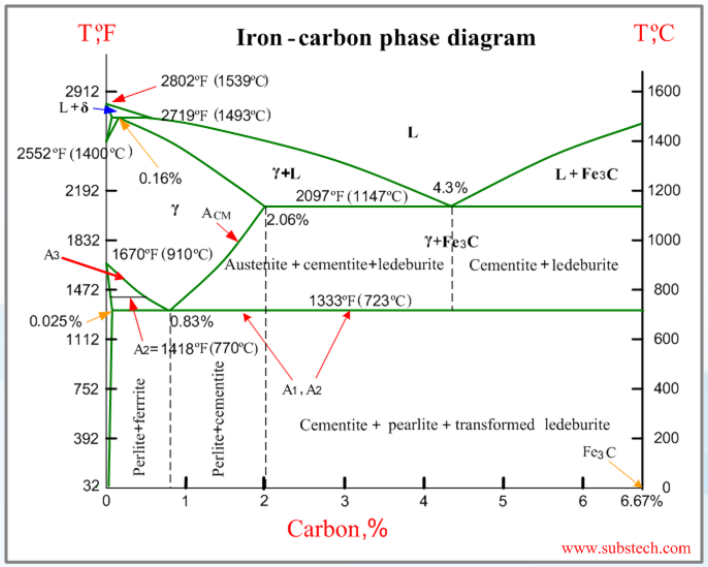
ساختار به شدت ترد و مستعد به ترک می گردد.



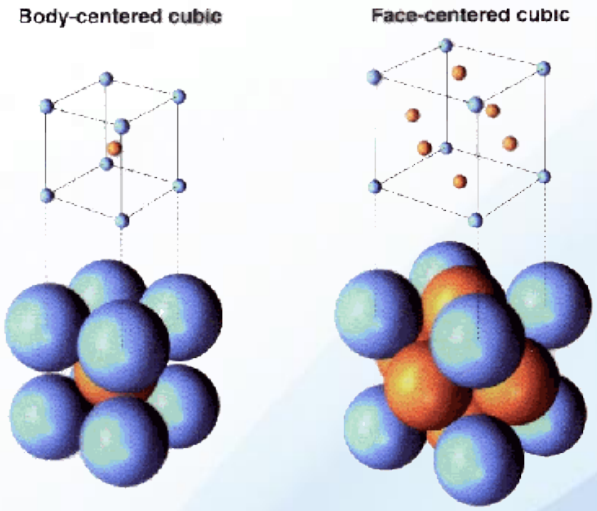
واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – هیدروژن





چرا معمولا ترک هیدروژنی در HAZ رخ می دهد؟



منطقه ی HAZ ⟸ FCC

محمل خوبی برای اتم های بین نشین

پس اتم ها و مولکول های هیدروژن، به دلیل فضای بازتر از مرکز جوش،
به مناطق HAZ مهاجرت می کنند و مکانیزم HIC را در نواحی HAZ پیاده می کنند.

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – هیدروژن

چرا ترک هیدروژنی در دمای پایین رخ می دهد؟

مکانیزم HIC، نیاز به زمان دارد تا مولکول های هیدروژن تشکیل شوند. از طرفی، اتم های هیدروژن به دلیل ریز بودن، می توانند در دماهای پایین به راحتی حرکت کنند.

معمولا تا ۷۲ ساعت! (بازرس با تجربه زمان می خرد؟)

ترک هیدروژنی در همه ی آلیاژها رخ می دهد؟

خیر
باید سه رکن تشکیل ترک حضور داشته باشند.

ترک هیدروژنی در چه فولادهایی رخ می دهد؟

سه رکن تشکیل ترک حضور داشته باشند.

یادآوری انواع فولاد ها

انواع فولاد ها (برحسب کربن)

- **Low carbon Steel** %C < 0.1
  - شکل پذیری بالا ⟸ بدنه ی اتومبیل (پراید!) / لوازم خانگی / کابینت
- **Structural Steel** 0.1< %C < 0.25
  - استراکچرها ⟸ استراکچرهای ساختمانی / مخازن ها / بویلرها ST 37 / ST 44 / ST 52
- **Medium carbon Steel** 0.25< %C < 0.6
  - انتقال نیرو ⟸ زنجیرهای انتقال قدرت، چرخ دنده ها / میل لنگ ها
- **High carbon Steel** %C < 0.6
  - سختی و مقاومت به سایش ⟸ ابزار آلات / تیغچه ها/ مته ها / آچارها / کولیس / سنبه – ماتریس

نقش عناصر آلیاژی؟ (از نظر صنعتی)

تغییر در جزییات خواص

بدنه ی پراید – بدنه پرادو

استراکچر استاتیکی (پل عابر) – استراکچر دینامیکی (پل عبور اتومبیل)

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – هیدروژن

ترک هیدروژنی در چه فولادهایی رخ می دهد؟

سه رکن تشکیل ترک حضور داشته باشند.

در فولادهایی که قابلیت تشکیل مارتنزیت داشته باشند.
از نظر تجربی، در فولادهای حاوی کربن کمتر از 0.35%، مارتنزیت تشکیل نمی شود.

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

ترک هیدروژنی در فولادهای پر کربن و آلیاژی رخ می دهند (نقش کربن معادل)

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – هیدروژن

راه های پیشگیری از HIC

از بین بردن ارکان ترک سرد

۱- کاهش مقدار H

- **پیشگیری**
  - بهره گیری از الکترود های کم هیدروژن (قلیایی)
  - خشک کردن و پخت الکترود و فلاکس
  - تمیز کردن سیم جوش، قطعه کار و ...
- **درمان** ⇐ انجام PWHT (خروج هیدروژن حل شده)

۲- تنش زدایی و عملیات حرارتی پس از جوشکاری PWHT
(حذف عامل تنش باقی مانده)

۳- جلوگیری از تشکیل ساختار ترد مارتنزیتی
(کاهش سرعت سرمایش توسط پیشگرم) PH

واکنش های فلز مذاب – گاز
Gas-Metal Reactions

واکنش های فلزجوش – هیدروژن

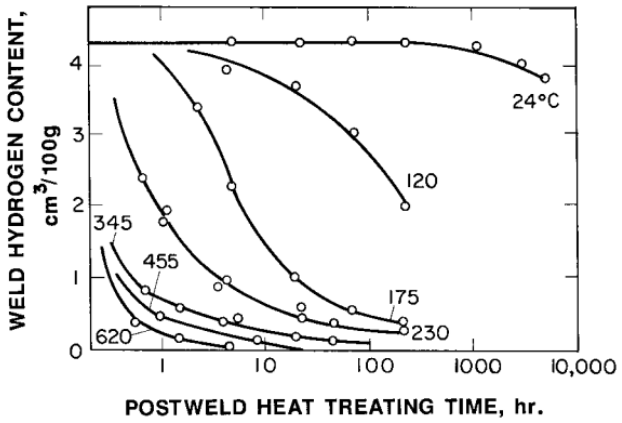


Figure 3.15 Effect of postweld heating on the weld metal hydrogen content of mild steel. Reprinted from Flanigan (27).

شکل ۳.۱۵

هیدروژن زدایی در دماهای بالاتر، سریع تر رخ می دهد.

استاندارد: عملیات PWHT پس از ۷۲ ساعت بایستی صورت بگیرد. چرا؟

زیرا تا ۷۲ ساعت، امکان تشکیل ترک وجود دارد.
پس از آن، PWHT صورت می گیرد تا هیدروژن ها بیرون بیایند و در سرویس کاری سبب ترک نگردند.

تکلیف ۱ : اثر هیدروژن در جوشکاری آلومینیوم چگونه است؟
اثر آن بر روی خواص مکانیکی چیست؟
راه های جلوگیری از اثر مخرب آن چیست؟

برگه آچار
دستنویس
همراه با شکل و نمودار

واکنش های فلز مذاب – سرباره
Slag-Metal Reactions

واکنش های فلز مذاب – سرباره
Slag-Metal Reactions

Slag-Metal Reactions

- **Electrochemical Reaction (الکترون)**
  تغییر در قطبیت الکترود سبب تغییر ترکیب شیمیایی می شود
- **Thermochemical Reaction (حرارت)**

Reaction

- Driving Force
- Activation Energy

اصلا سرباره چی هست؟
و چرا استفاده می شه؟

سرباره (Slag)
فلاکس (Flux)

- روپوش الکترود در روش SMAW
- پودر مصرفی در فرایند SAW/ FCAW

واکنش های فلز مذاب – سرباره
Slag-Metal Reactions

وظایف پوشش (فلاکس)

۱- تشکیل و پایداری قوس الکتریکی

چسب های سیلیکاتی حاوی k و Na (انرژی یونیزاسیون پایین)

۲- حفاظت از فلز مذاب و فلز داغ جوش

تجزیه ی عناصر و تولید گاز (شبیه به گازهای محافظ)

- نوک داغ الکترود
- قطرات مذاب در حال انتقال در الکترود یا فیلرمتال
- فلز جوش

۳- کنترل ترکیب شیمیایی

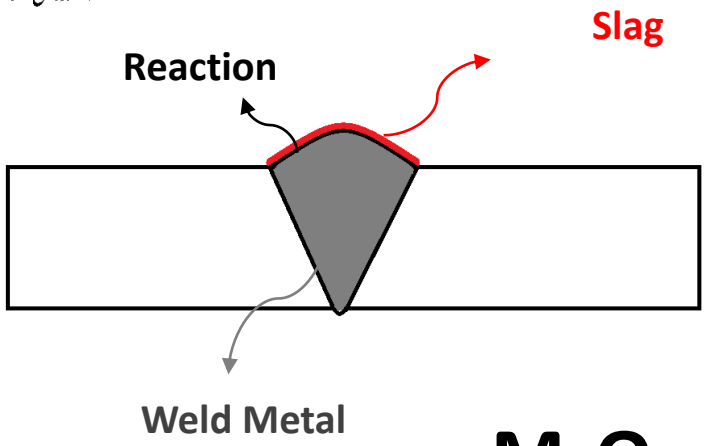
اکسیژن و گوگرد زدایی

$Si + 2O \rightarrow SiO_2$

Deoxidation reaction

افزودن عناصر به جهت نقش مشخص

واکنش های شیمیایی در این جا مطرح می شوند.



واکنش های فلز مذاب – سرباره
Slag-Metal Reactions

واکنش های شیمیایی (تبادل شیمیایی) بین سرباره ی مذاب و فلز جوش که ناشی از حضور حرارت به عنوان انرژی اکتیواسیون است.

$$M_xO_y + yFe \rightleftharpoons xM + yFeO$$

M: Metal, Metalloid

واکنش به سمت راست ⟸ تجزیه اکسیدفلزی، اکسیداسیون آهن، حضور M به صورت خالص **(افزودن عناصر آلیاژی)**

واکنش به سمت چپ ⟸ تجزیه ی اکسید آهن، اکسیداسیون فلز موجود، اکسیژن زدایی آهن **(اکسیژن زدایی)**

Mn, Si, Ti, Al عناصر احیایی هستند که می توانند نقش اکسیژن زدایی ایفا کنند.

چه عاملی تعیین کننده ی جهت واکنش هاست؟

ترمودینامیک

ما که ترمودینامیک نمی دونیم! پس بی خیال؟؟

واکنش های فلز مذاب – سرباره
Slag-Metal Reactions

انواع فلاکس

هالیدی

ترکیبات هالوژن دار و بدون اکسیژن

CaF2 – BaCl2 - NaF

هالوژن

در لغت به معنی نمک زا
گروه ۱۷ جدول مندلیف I – Br – Cl – F
گیرنده ی الکترون (اکسید کنندگی بالا)

اکسیدی

ترکیبات اکسیژن دار

MnO – SiO2 – FeO

هالیدی – اکسیدی

ترکیبات هالوژن دار و اکسیژن دار

CaF2 – CaO – SiO2 / CaO – CaO – Al2O3

واکنش های فلز مذاب – سرباره
Slag-Metal Reactions

انواع اکسید ها

اسیدی

pH < 7، غلظت بالای یون های مثبت هیدروژن (دهنده ی هیدروژن)

V_2O_5 , P_2O_5, TiO_2, SiO_2

بازی (قلیایی)

pH > 7، گیرنده ی هیدروژن و اکسیژن

FeO, MnO, BaO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O

آمفوتر (خنثی)

pH = 7، گیرنده ی هیدروژن

ZnO, V2O3, Cr2O3, Fe2O3, Al2O3

با شناسایی این ترکیبات، بر اساس معیار هایی می توان خواص جوش را کنترل کرد.

واکنش های فلز مذاب – سرباره
Slag-Metal Reactions

شاخص قلیاییت
Basicity Index (BI)

اکسیدهای بازی

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

اکسیدهای آمفوتر + اکسیدهای اسیدی

توانایی فلاکس در حذف اکسیژن و گوگرد
(در فولادسازی)

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

BI <1 ⟸ فلاکس اسیدی

1 < BI <1.2 ⟸ فلاکس اسیدی

BI > 1.2 ⟸ فلاکس اسیدی

واکنش های فلز مذاب – سرباره
Slag-Metal Reactions

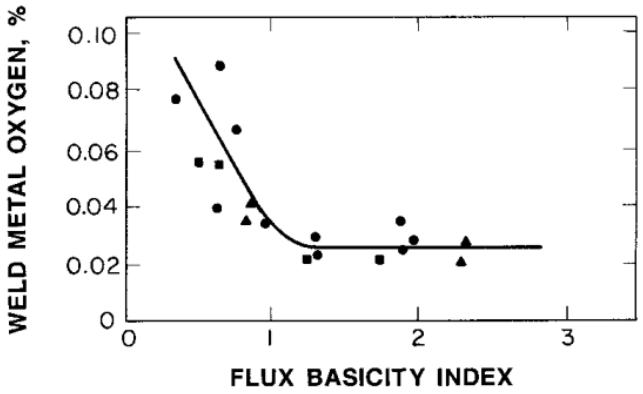


Figure 3.21 Weld metal oxygen content in steel as a function of flux basicity in submerged arc welding. From Chai and Eagar (45).

شکل ۳.۲۱

BI ⇑ ⇐ **اکسیژن فلز جوش** ⇓

(اکسیدهای قلیایی نقش اکسیژن زدایی را ایفا می کنند).

BI <1 اکسیژن در فلز جوش باقی مانده است.

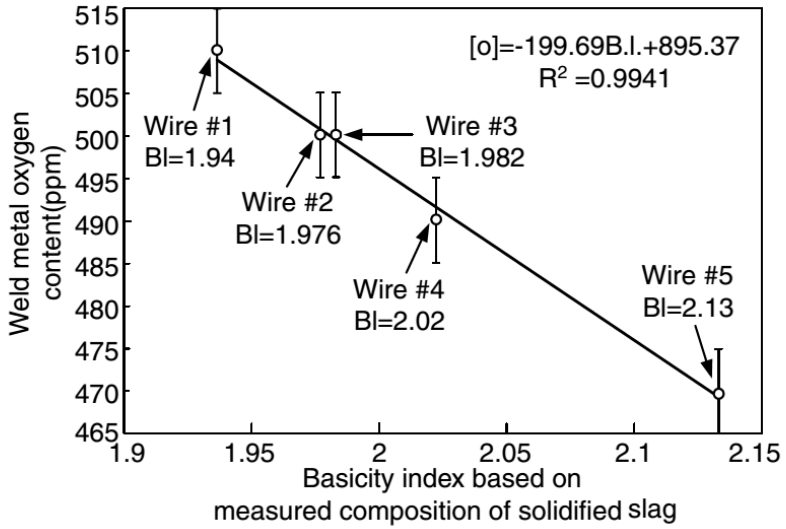


Figure 3.22 Weld metal oxygen content in steel as a function of flux basicity in flux-core arc welding. Reprinted from Baune et al. (46). Courtesy of American Welding

شکل ۳.۲۲

BI ⇑ ⇐ **اکسیژن فلز جوش** ⇓

واکنش های فلز مذاب – سرباره
Slag-Metal Reactions

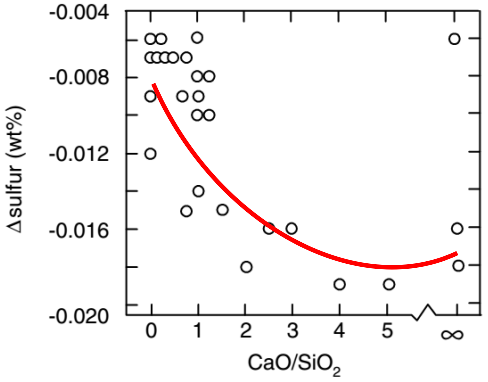


Figure 3.23 Desulfurization of high-strength, low-alloy steel welds as a function of basicity index CaO/SiO_2 of CaF_2–CaO–SiO_2 type flux. Reprinted from Dallam et al. (47). Courtesy of American Welding Society.

شکل ۳.۲۳

CaO/SiO_2 ⟸ سولفورزدایی ⇑

CaO/SiO_2 → اسید معروف

باز معروف ⟸ CaO/SiO_2

برای فسفر زدایی هم همین حالت وجود دارد.

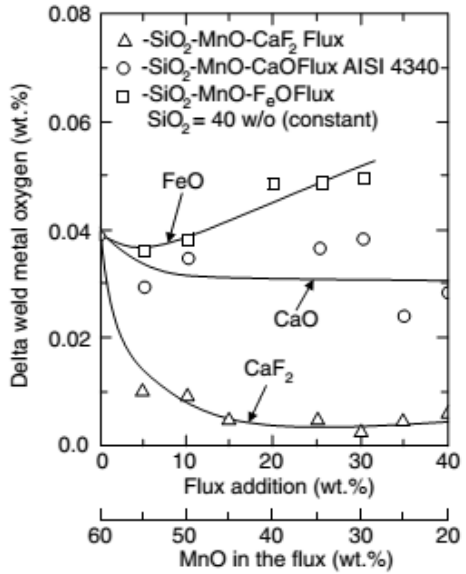


Figure 3.18 Effect of flux additions to manganese silicate flux on extent of oxygen transfer to the weld metal in submerged arc welding of 4340 steel. Reprinted from Burck et al. (38). Courtesy of American Welding Society.

شکل ۳.۱۸

تاثیر فلاکس بر روی میزان اکسیژن

FeO ⟸ **اکسیژن** ⇑

CaO ⟸ **کاهش و ثبات اکسیژن**

CaF2 ⟸ **اکسیژن** ⇓

CaF2 هالیدی و گیرنده ی الکترون است. پس اکسید تولید می کند و به سرباره می فرستد.

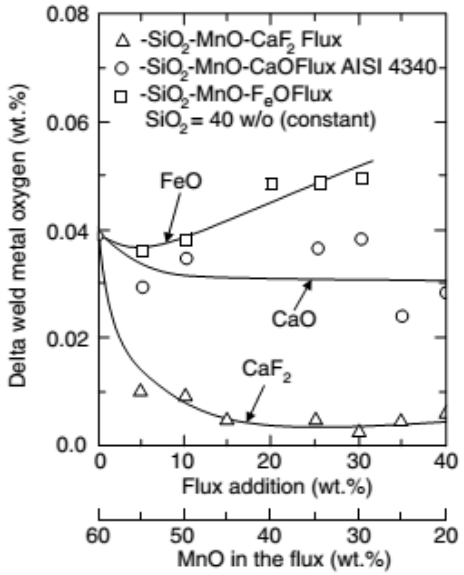


Figure 3.18 Effect of flux additions to manganese silicate flux on extent of oxygen transfer to the weld metal in submerged arc welding of 4340 steel. Reprinted from Burck et al. (38). Courtesy of American Welding Society.

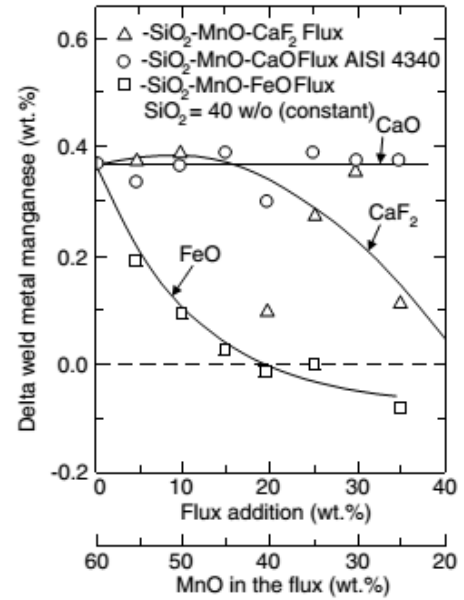


Figure 3.19 Effect of flux additions to manganese silicate flux on extent of manganese transfer to the weld metal in submerged arc welding of 4340 steel. Reprinted from Burck et al. (38). Courtesy of American Welding Society.

واکنش های فلز مذاب – سرباره
Slag-Metal Reactions

CaO و FeO هر دو قلیایی هستند. پس چرا اکسیژن در FeO بسیار زیاد در فلز جوش باقی مانده؟

FeO اکسید بسیار ناپایداری است و سریعا تجزیه می شود.

پایدای اکسیدها

⇓ **FeO, MnO, SiO_2, MgO, Al_2O_3, TiO_2, Na_2O, K_2O, CaO** ⇑

شکل ۳.۱۹

تاثیر ترکیبات FeO، CaO، CaO2 بر روی عناصر آلیاژی

FeO ⇐ **Mn** ⇓

Mn از فلز جوش مذاب به سرباره منتقل شده است.

$$M_xO_y + yFe \rightleftharpoons xM + yFeO$$

M: Metal, Metalloid

CaO ⇐ **تاثیری ندارد.**

CaF_2 ⇐ **با شدت کمتری Mn را کاهش می دهد.**

واکنش های فلز مذاب – سرباره
Slag-Metal Reactions

اثرات O2

ترکیب با عناصر آلیاژی

- خروج از مذاب و سرباره ⟸ فقر عناصر آلیاژی
- شناور ماندن در مذاب ⟸ تولید آخال

$O_2 \rightarrow 2O$

$M + O \rightarrow MO$

$Fe \rightarrow Cr_2O_3, Al_2O_3, TiO_2$

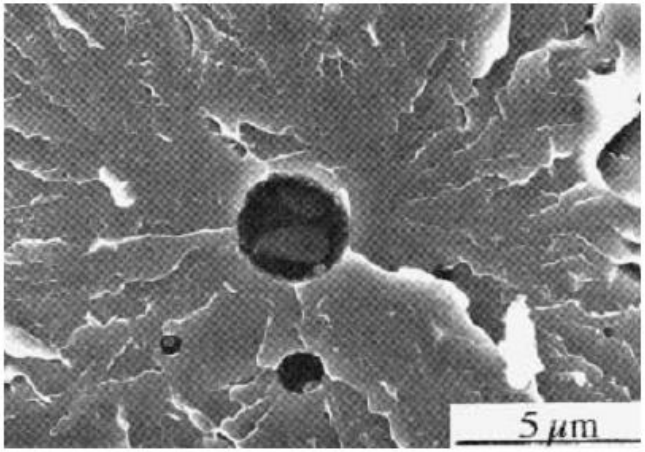


Figure 3.24 Fracture initiation at an inclusion in flux-cored arc weld of high-strength, low-alloy steel. Reprinted from Bose et al. (54).

شکل ۳.۲۴

شروع شکست از حضور آخال اکسیدی در فولاد استحکام بالا و کم آلیاژ

واکنش های فلز مذاب – سرباره
Slag-Metal Reactions

Figure 3.25 Wormhole porosity in weld metal. From Jackson (55).

شکل ۳.۲۵

حفره ی کرمی شکل در اثر حضور اکسیژن زیادی در واکنش با کربن که تولید CO_2 کرده است.

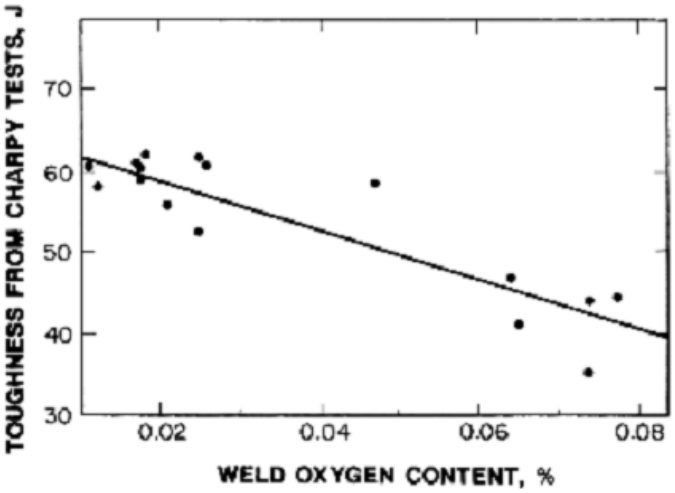


Figure 3.26 Relationship between the toughness at 20°C and the oxygen content of steel welds. Reprinted from North et al. (56). Courtesy of American Welding Society.

شکل ۳.۲۶

افزایش فلز جوش ⟸ تافنس

اکسیژن چه در واکنش های گازی و چه در واکنش های سرباره ای ، نقش خواصی یکسانی دارد!

می توانید تاثیر BI و تافنس را در نمودار رسم کنید؟

مرور

ترکیب شیمیایی فلز جوش

- ترکیب شیمیایی فلز پایه
- ترکیب شیمیایی فلز الکترود، روپوش و فلاکس
  - محاسبه ی درجه ی رقت Dilution
- واکنش های شیمیایی فلز جوش Reactions in welding
  - واکنش های فلز مذاب – گاز Gas-Metal Reactions
  - واکنش های فلز مذاب – سرباره Slag-Metal Reactions
- هدر رفت عناصر آلیاژی

در کنار واکنش های شیمیایی که در فلز جوش رخ می دهند، اتفاقات دیگری نیز می توانند سبب تغییر ترکیب شیمیایی شوند.

تغییر ترکیب شیمیایی با هدر رفت عناصر آلیاژی

هدر رفت عناصر آلیاژی

- پاشش قطرات مذاب حین جوشکاری
  مربوط به تکنولوژی جوش
- تبخیر عناصر آلیاژی

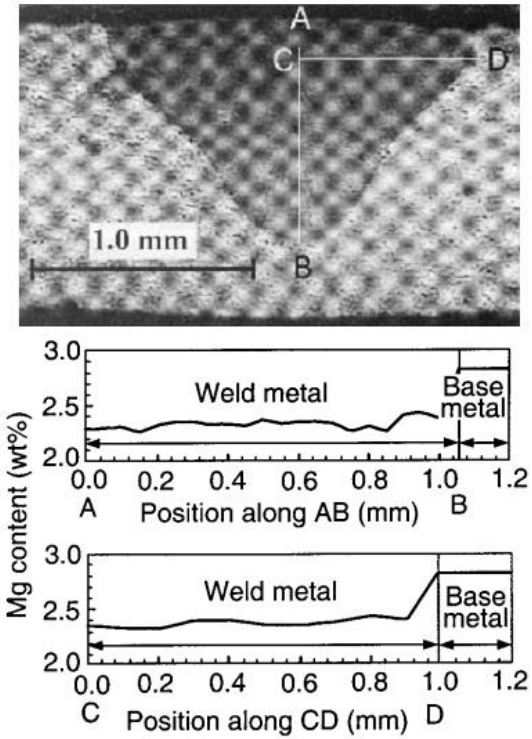


Figure 4.25 Magnesium loss in a laser weld of an Al–Mg alloy. Reprinted from Pastor et al. (45). Courtesy of American Welding Society.

شکل ۴.۲۵

آلیاژ Al – Mg

Mg عنصر آلیاژی اصلی این آلیاژ است و سبب ارتقا خواص مکانیکی می شود.

حدود ۱٪ در اثر تبخیر در جوش کاهش یافته است.

تغییر ترکیب شیمیایی با هدر رفت عناصر آلیاژی

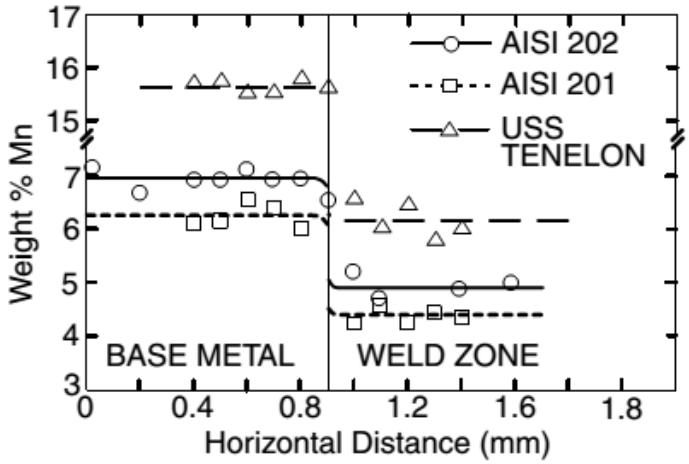


Figure 4.26 Manganese losses in laser welds of stainless steels. Reprinted from DebRoy (46).

شکل ۴.۲۶

تبخیر Mn در فولاد
SS(Y)-AISI 202 / AISI201 / USS

Mn نقش آستنیت زایی و افزایش تافنس در فولاد ها را دارد و با تبخیر آن، ترکیب آلیاژ تغییر کرده و خواص افت می کند.

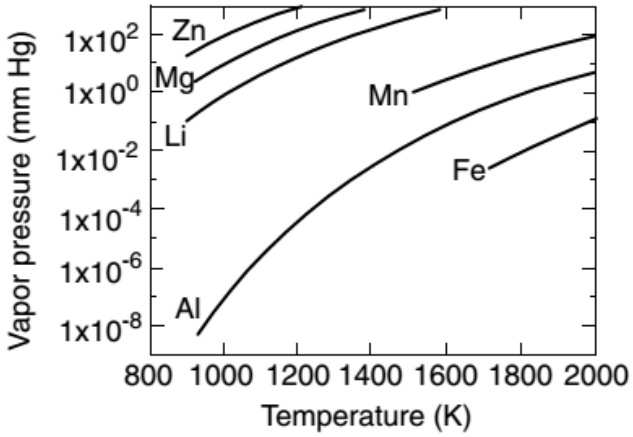


Figure 4.27 Vapor pressure of several metals as a function of temperature.

شکل ۴.۲۷

فشار بخار تعادلی فلزات معروف

فشار بخار؟ (Vapor Pressure)

به فشار تعادلی گفته می شود که در آن فشار، تعداد مولکول های آزاد شده از سطح مایع با مولکول هایی که به مایع بر می گردند یکی باشند.

تغییر ترکیب شیمیایی با هدر رفت عناصر آلیاژی

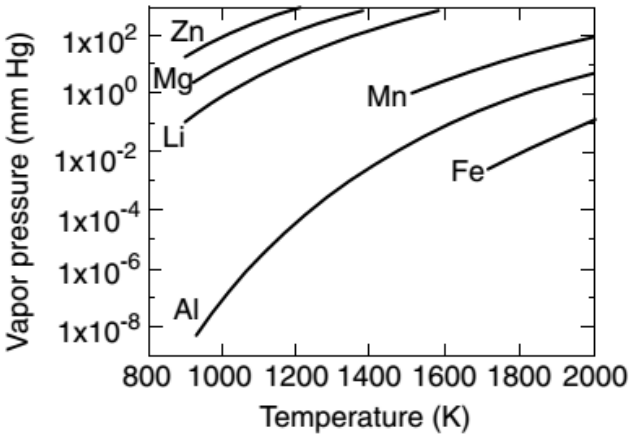


Figure 4.27 Vapor pressure of several metals as a function of temperature.

فشار بخار ⟸ تبخیر

Mn به راحتی در فولاد (آهن) تبخیر می شود.
Mg به راحتی در آلومینیوم تبخیر می شود.

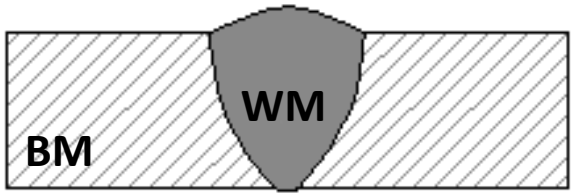
راهکار برای جبران تبخیر

محاسبه یا پیش بینی تبخیر فلزات را می توان انجام داد و به عنوان راهکار کلی، بایستی این عناصر را به شکل اکسیدی (به دلیل عدم تبخیر در حین جوش) و به مقدار بیشتری (جبران مقدارتبخیر) در پوشش الکترود یا فلاکس در نظر بگیریم.

درجه ی رقت (Dilution)

SMAW Technique

E



$$C_{WM} = C_E + C_{BM} + C_R$$

ترکیب شیمیایی فلز جوش

- C_E: ترکیب شیمیایی الکترود
- C_{BM}: ترکیب شیمیایی فلز پایه
- C_R: ترکیب شیمیایی ناشی از واکنش ها

چه مقدار از فلز پایه در فلز جوش مشارمت دارد؟

Dilution: سهم فلز پایه در فلز جوش

$$\%D = \frac{\text{وزن فلز پایه ذوب شده}}{\text{کل وزن فلز جوش}} \times 100$$

هدف از محاسبه :

تعیین ترکیب شیمیایی فلز جوش و در نهایت تعیین خواص

مقادیر D در فرایندهای مختلف:

SMAW:	30-40%
GMAW:	10-40%
SAW:	40-60%
GTAW:	1-100%
BRAZING:	0%

درجه ی رقت (Dilution)

سوال:

ترکیب شیمیایی فلز جوش و الکترود بر حسب درصد وزنی به صورت زیر مشخص است. میخواهیم با فرایند SMAW پوشش دهی روی قطعه ای ایجاد کنیم. درجه ی رقت برابر ۶۰٪ است. درصد کربن و منگنز پاس اول را تعیین کنید.

	% C	% Mn	% Si	% P	% S
Base metal	0.3	1.75	0.5	0.03	0.03
Electrode	0.08	0.57	0.4	0.01	0.015

پاسخ

$$\%C_{WM} = 0.6 \times 0.3 + 0.4 \times 0.08 = 0.212 \ \%\ wt.$$

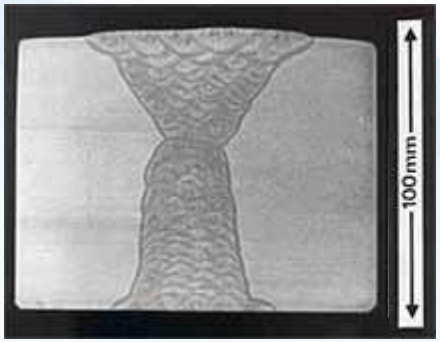
$$\%Mn_{WM} = 0.6 \times 1.75 + 0.4 \times 0.57 = 1.25 \ \%\ wt.$$

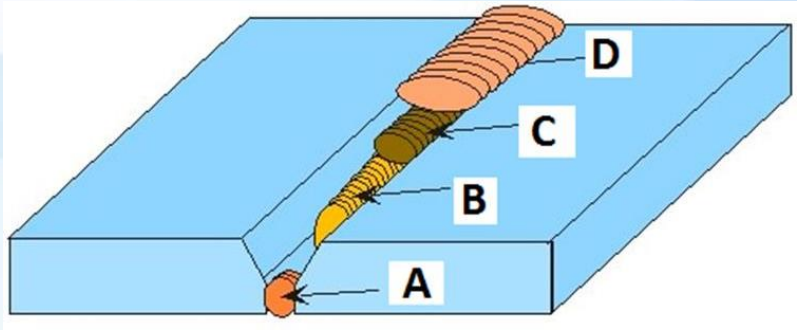
نکته:

در پاس دوم، طبیعی است که پاس یک، نقش فلز پایه برای پاس دوم را دارد.

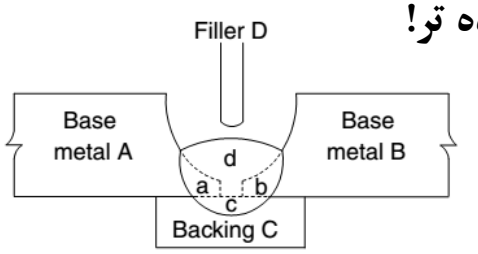
نکته:

هرچه تعداد پاس ها بیشتر می شود، درجه ی رقت کاهش می یابد.





حالت پیچیده تر!



$$(1)\ \%\ \text{dilution} = \frac{a+b+c}{a+b+c+d} \times 100$$

(2) % element E in weld bead =
[a (% E in a) + b (% E in b) + c (% E in c)
+ d (% E in d)] / (a + b + c + d)

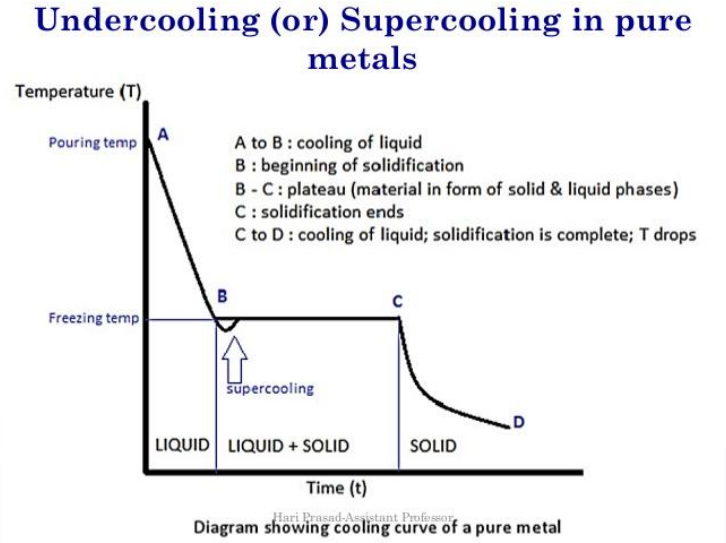
Figure 10.17 Filler metal dilution and composition in dissimilar-metal welding. Reprinted from Estes and Turner (55). Courtesy of American Welding Society.

ریزساختار جوش
(Weld Micro/Macrostructure)

ریزساختار جوش

- خواص جوش
  - ترکیب شیمیایی فلز جوش
    - ترکیب شیمیایی فلز پایه
      - محاسبه ی درجه ی رقت Dilution
    - ترکیب شیمیایی فلز الکترود، روپوش و فلاکس
    - هدر رفت عناصر آلیاژی
    - واکنش های شیمیایی فلز جوش Reactions in welding
      - واکنش های فلز مذاب – گاز Gas-Metal Reactions
      - واکنش های فلز مذاب – سرباره Slag-Metal Reactions
  - ریزساختار فلز جوش
    - مروری بر انجماد آلیاژها و فلز جوش (یادآوری)
    - ریزساختارهای و نواحی متفاوت جوش
    - طریقه ی جوانه زنی همبافته در فلز جوش
    - طریقه ی رشد رقابتی
    - روش های اصلاح ساختار دانه بندی فلز جوش
    - منطقه ی ذوب جزیی شده
    - منطقه ی متاثر از حرارت

یادآوری مروری بر انجماد (Solidification)

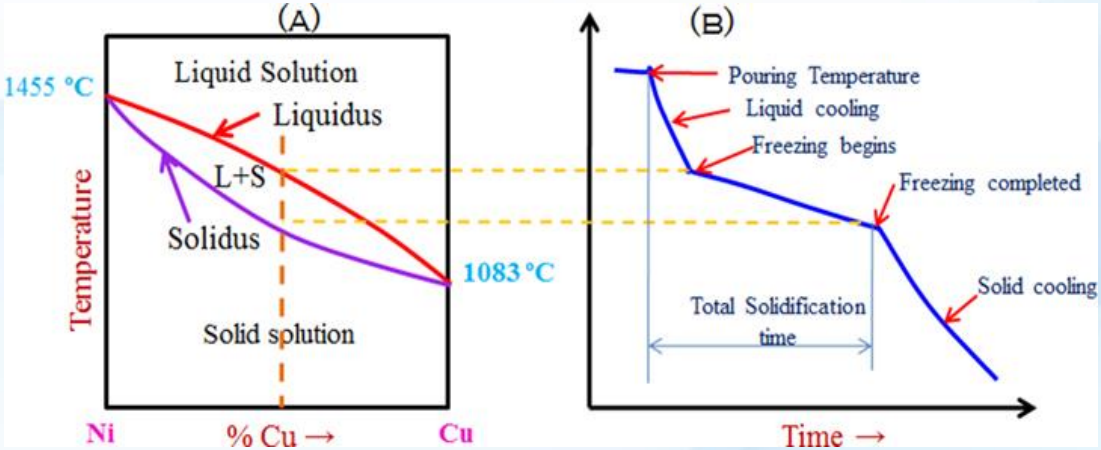


انجماد یک فلز خالص

یک فلز خالص، دارای یک دمای ذوب و یا انجماد مشخص است که در آن دما، چنانچه به ماده حرارت دهیم (انرژی) ماده ذوب و چنانچه دما را کاهش دهیم، فلز منجمد خواهد شد.

Cu
Tm = 1083 ° C
Al
Tm = 660 ° C @ P = 1 atm
Fe
Tm = 1538 ° C

انجماد یک آلیاژ (محلول جامد بین نشین یا جانشینی)



آلیاژ چیست؟

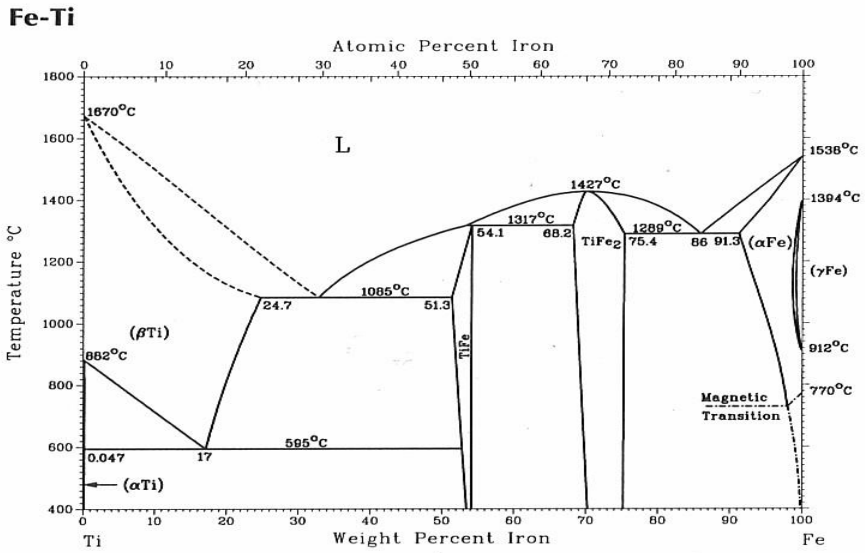
یک محلول جامد، دارای یک شبکه ی کریستالی میزبان است که اتم های بین نشینی یا جانشینی درون این شبکه ی مادر قرار می گیرند و آلیاژ را تشکیل می دهند.

آلیاژ دارای یک محدوده ی دمایی ذوب یا انجماد است.

چرا؟

میهمان!

مروری بر انجماد (Solidification)

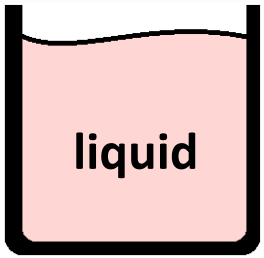


انجماد یک ترکیب اینتر متالیک (Intermetallic compound)

یک ترکیب اینترمتالیک، ترکیبی از دو یا چند عنصر فلزی (یا غیرفلزی) است که با یک نسبت مشخص اتمی با هم ترکیب می شوند و عموما درای یک ساختار کریستالی متفاوت از عناصر تشکیل دهنده ی خود هستند.

ترکیبات اینترمتالیک شبیه به یک فلز خالص عمل می کنند و دارای یک نقطه ی ذوب و یا انجماد هستند.

صرف نظر از اینکه مذاب پیش رو چه باشد (فلز خالص، ترکیب اینترمتالیک، آلیاژ محلول جامد)، مراحل انجماد بایستی رخ دهد.



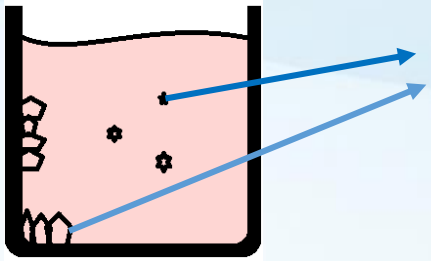
Metallic mold

مراحل انجماد در یک قالب فلزی؟

۱) مذاب (ساختار اتمی بی شکل و آمورف)

۲) تشکیل جوانه های جامد در نقاط مرجح

دیواره قالب — ناخالصی ها (جوانه زاها)



Nucleation

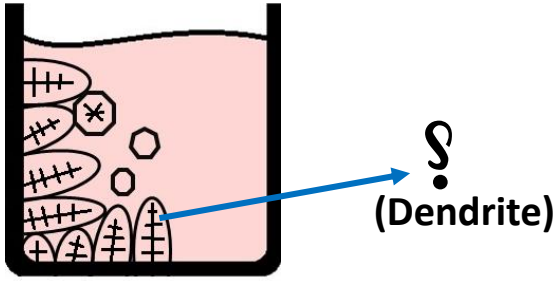
مروری بر انجماد (Solidification)

۳) رشد جوانه های جامد و کاهش مذاب

در این مرحله جوانه های جامد تشکیل شده در مذاب شروع به رشد می کنند.
با کاهش دما، جوانه ها رشد بیشتری می کنند.

دندریت (Dendrite)

در حین رشد، وقتی اتم ها روی روی جوانه های جامد می نشینند به صورت شاخه شاخه ای رشد می کنند و این مکانیزم رشد جوانه های جامد است.



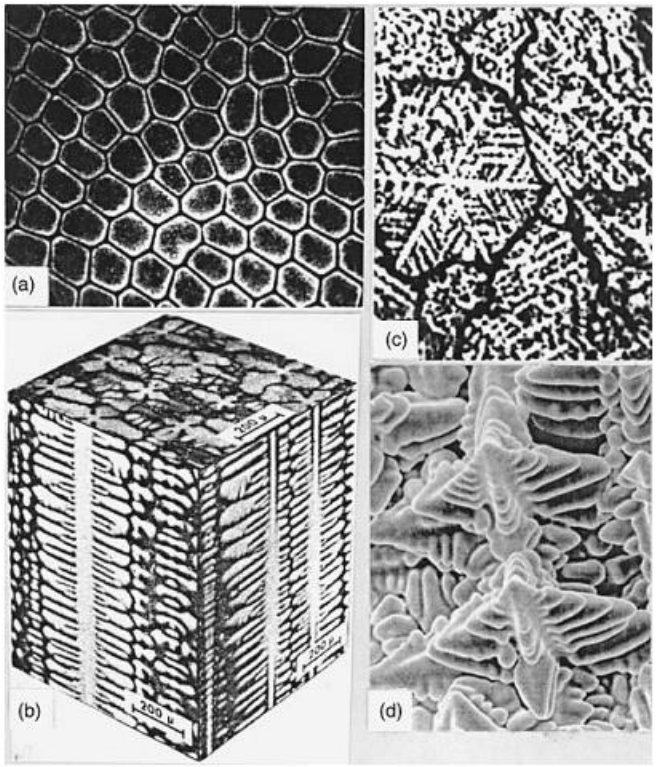


Figure 6.9 Nonplanar solidification structure in alloys. (*a*) Transverse section of a cellularly solidified Pb–Sn alloy from Journal of Crystal Growth (7) (magnification 48×). (*b*) Columnar dendrites in a Ni alloy. From *New Trends in Materials Processing* (8), with permission. (*c*) Equiaxed dendrites of a Mg–Zn alloy from Journal of Inst. of Metals (9) (magnification 55×). (*d*) Three-dimensional view of dendrites in a Ni-base superalloy. Reprinted from *International Trends in Welding Science and Technology* (10).

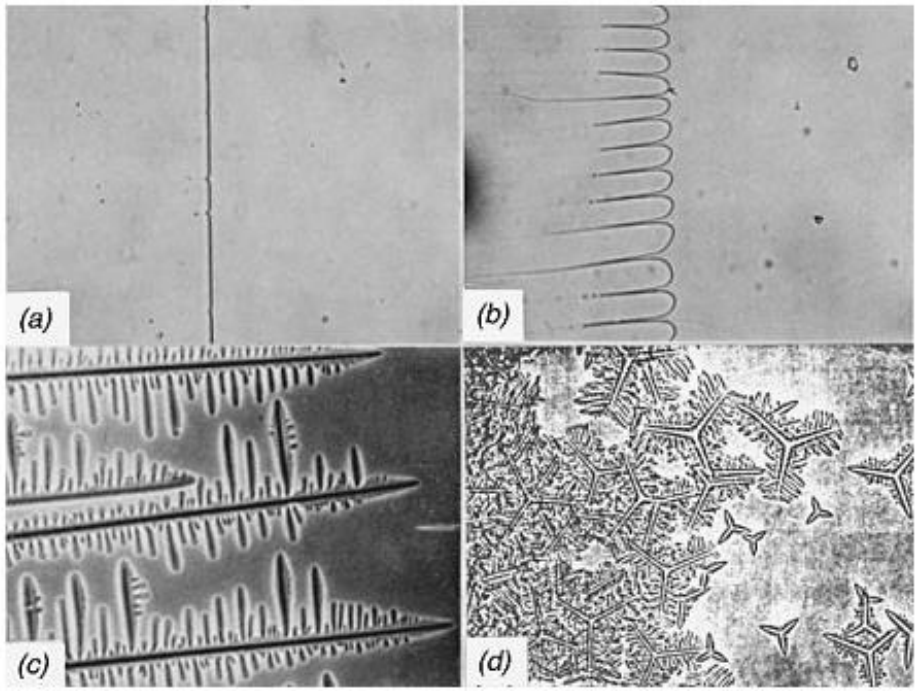
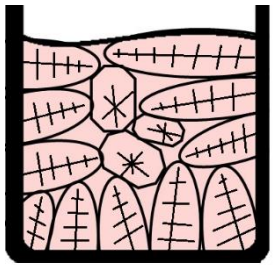


Figure 6.8 Basic solidification modes (magnification 67×): (*a*) planar solidification of carbon tetrabromide (5); (*b*) cellular solidification of carbon tetrabromide with a small amount of impurity (5); (*c*) columnar dendritic solidification of carbon tetrabromide with several percent impurity (5); (*d*) equiaxed dendritic solidification of cyclohexanol with impurity (6). From *Solidification* (5), pp. 132–134, with permission.

مروری بر انجماد (Solidification)



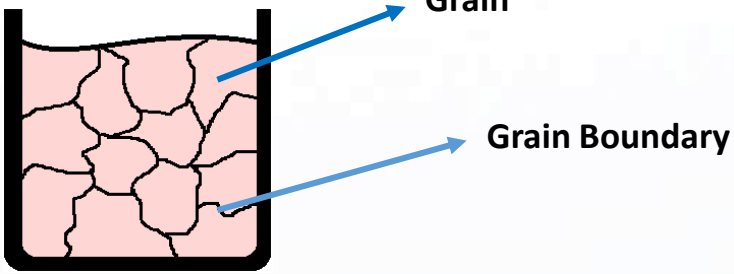
۴) تکمیل رشد همه ی جوانه ها و برخورد جوانه ها به هم

۵) تشکیل مرزدانه ها (Grain Boundary)

مرزدانه: فصل مشترک بین دو دانه

چرا همه ی دانه ها به هم نپیوستند و به یک دانه تبدیل نشدند؟

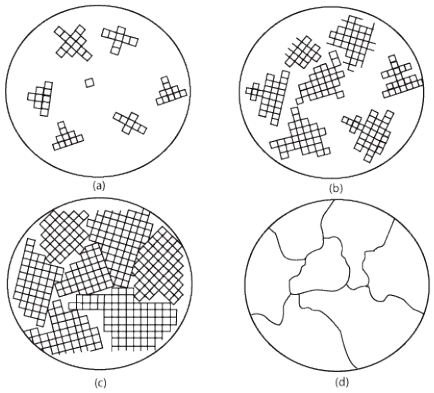
عدم تطابق جهت گیری دانه ها

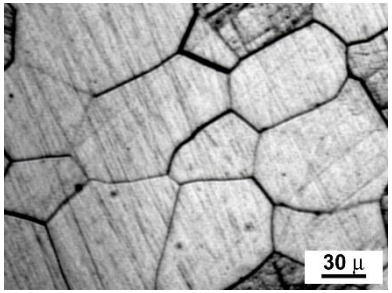


با توجه به مراحل انجماد، می توان با کنترل این مراحل، محصولات متفاوتی را در انجماد تولید کرد:

انجماد پلی کریستال
انجماد جهت دار
انجماد تک کریستال
انجماد سریع

مروری بر انجماد (Solidification)





انجماد پلی کریستال
(Poly crystal solidification)

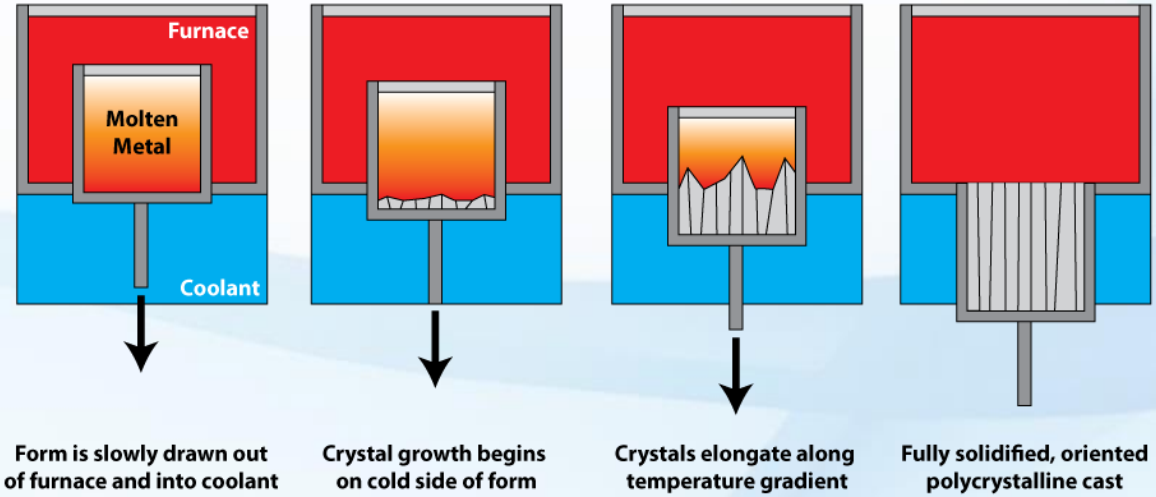
حالتی که بررسی کردیم همان حالت انجماد پلی کریستال بود که به دانه های متفاوتی ختم خواهد شد.

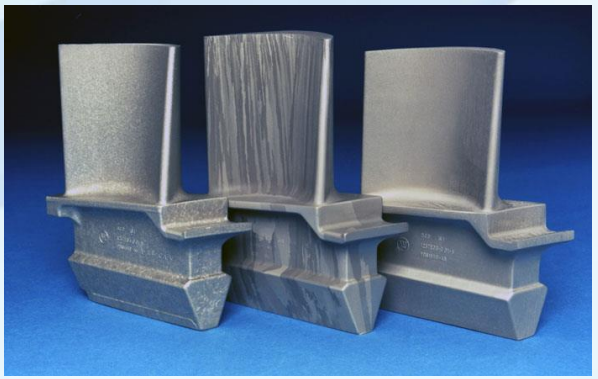
غالب آلیاژهای متداول این گونه منجمد می شوند.

انجماد جهت دار
(Directional solidification)

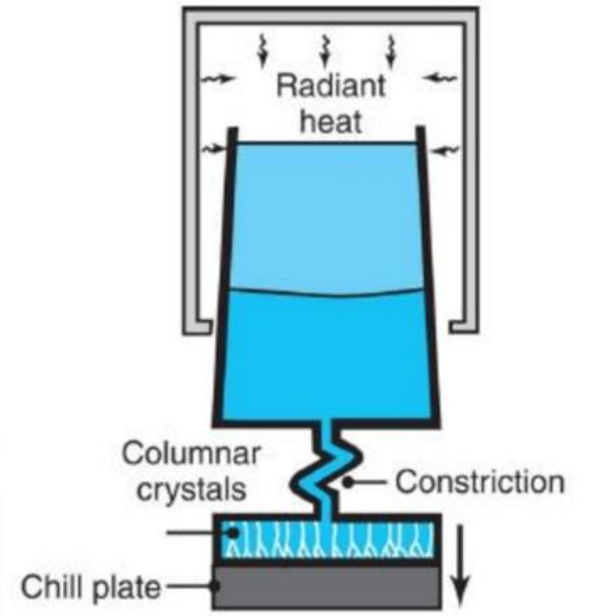
تشویق همه ی دانه ها به رشد در یک جهت

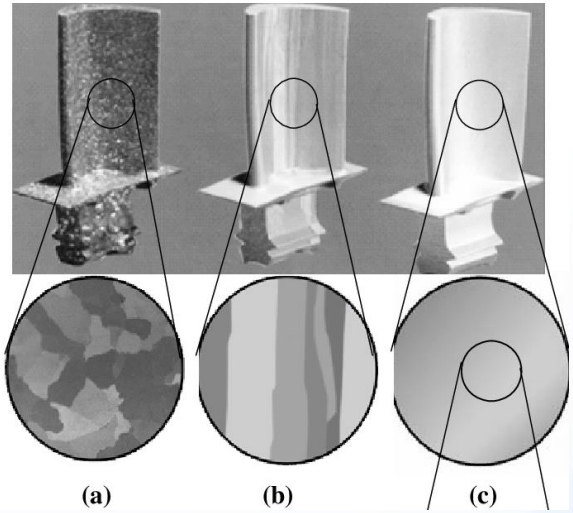
کاربرد: نیاز به استحکام بالا در یک جهت خاص (پره های توربین)





مروری بر انجماد (Solidification)



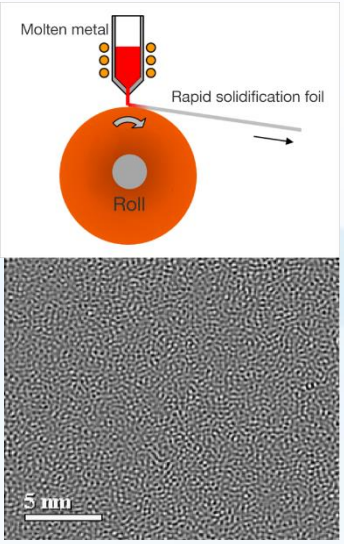


انجماد تک کریستال
(Single crystal solidification)

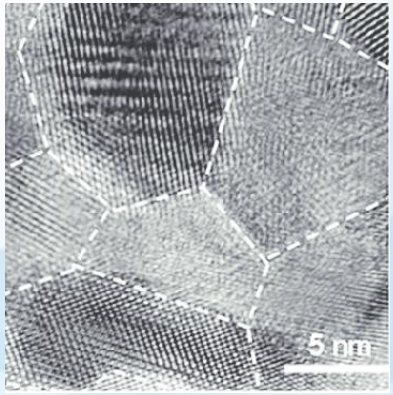
تشویق رشد یک دانه در یک قطعه

کاربرد: (پره های توربین)

مقاومت بسیار بالا در برابر خزش



Amorphous material



Nano-structured material

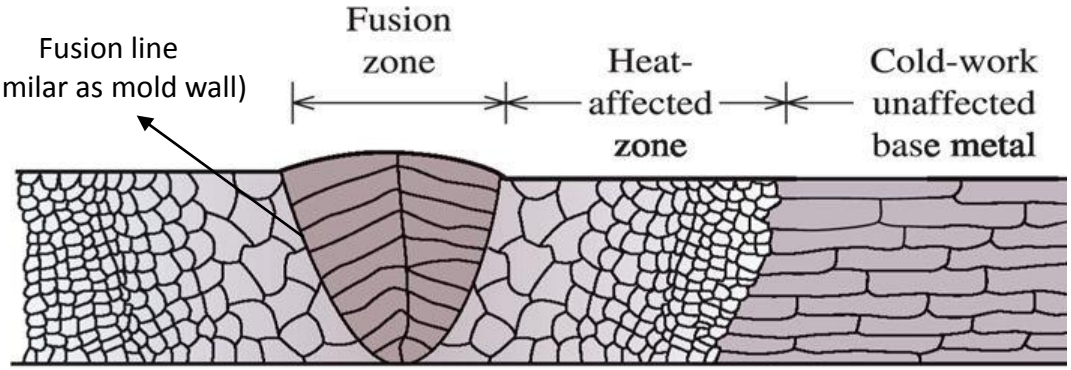
انجماد سریع
(Rapid solidification)

دستیابی به ساختار اتمی آمورف (شیشه ای) و نانوکریستال

استحکام بسیار زیاد
الاستیسیته ی بسیار زیاد
خواص خوردگی بسیار مناسب

کاربرد: رنج کاربری بسیار وسیع
نظامی – پزشکی – ورزشی
موشک های فرو رونده
تیغ های جراحی

ریزساختار جوش

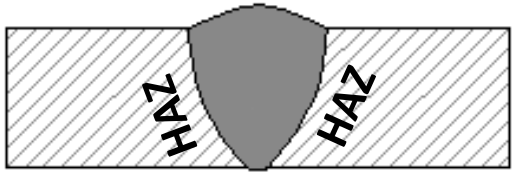


انجماد فلز جوش چگونه است؟

انجماد فلز جوش شبیه به انجماد یک آلیاژ در قالب فلزی است. (فلز پایه نقش قالب فلزی را دارد و فلز جوش مذاب، نقش مذاب آلیاژ). بنابراین هر پدیده ای که در فلز پایه (قالب انجماد جوش) رخ دهد، به اندازه ی فلز جوش اهمیت می یابد.

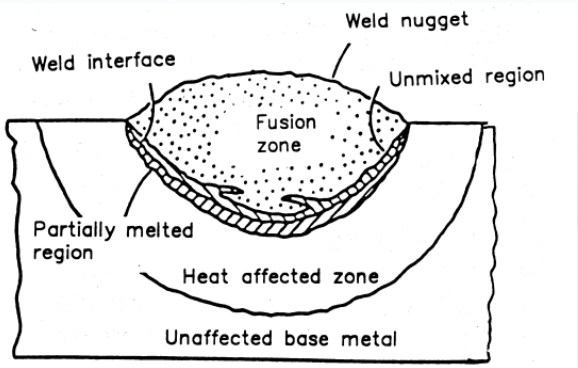
در جوشکاری، به دلیل سیکل های گرمایشی و سرمایشی غیر یکنواخت، تغییرات ساختاری متفاوتی رخ می دهد. همین امر سبب می گردد که جدایی از فلز جوش (Weld Metal)، نواحی متفاوتی در جوش تشکیل شوندکه در خواص اتصال بسیار اهمیت دارند.

جوش چیست؟



از نگاه کلی:

Weld = (WM) + (HAZ)



از نگاه جزیی:

Weld = (WM) + (UZ) + (PMZ) + (HAZ) + (TZ)

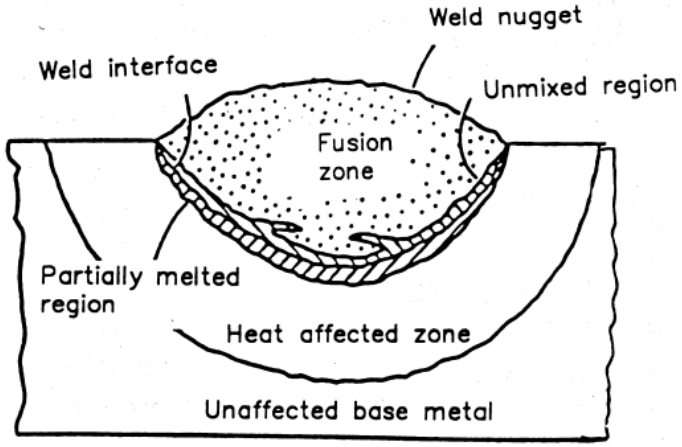


Fig. 1 Schematic showing the regions of a heterogeneous weld. Source: Ref 2

ریزساختارهای جوش

Weld Metal Weld Nugget (WM)

- ذوب و انجماد کامل
- تغییر ساختار میکروسکوپی/ ماکروسکوپی
- امکان تغییر ترکیب شیمیایی
- تغییر خواص مکانیکی- شیمیایی - فیزیکی

Unmixed Region Unmixed Zone (UZ)

- ذوب و انجماد کامل
- تغییر ساختار میکروسکوپی/ ماکروسکوپی
- تغییر نسبی ترکیب شیمیایی نسبت به WM و BM
- تغییر خواص مکانیکی- شیمیایی - فیزیکی
- بسته به حجم و ترکیب شیمیایی می تواند نقطه ی شروع تخریب باشد.

در صورت تفاوت ترکیب شیمیایی فلز جوش و فلز پایه

Partially Melted Zone (PMZ)

- ذوب و انجماد نسبی
- تغییر ساختار میکروسکوپی/ ماکروسکوپی
- تغییر ترکیب شیمیایی
- تغییر خواص مکانیکی- شیمیایی - فیزیکی
- منشا بسیاری از تخریب ها:
  ترک خوردگی مایع (Liquation Cracking)
  ترک خوردگی هیدروژنی (HIC)
  خوردگی های داغ (Hot Corrosion)

Heat Affected Zone (HAZ)

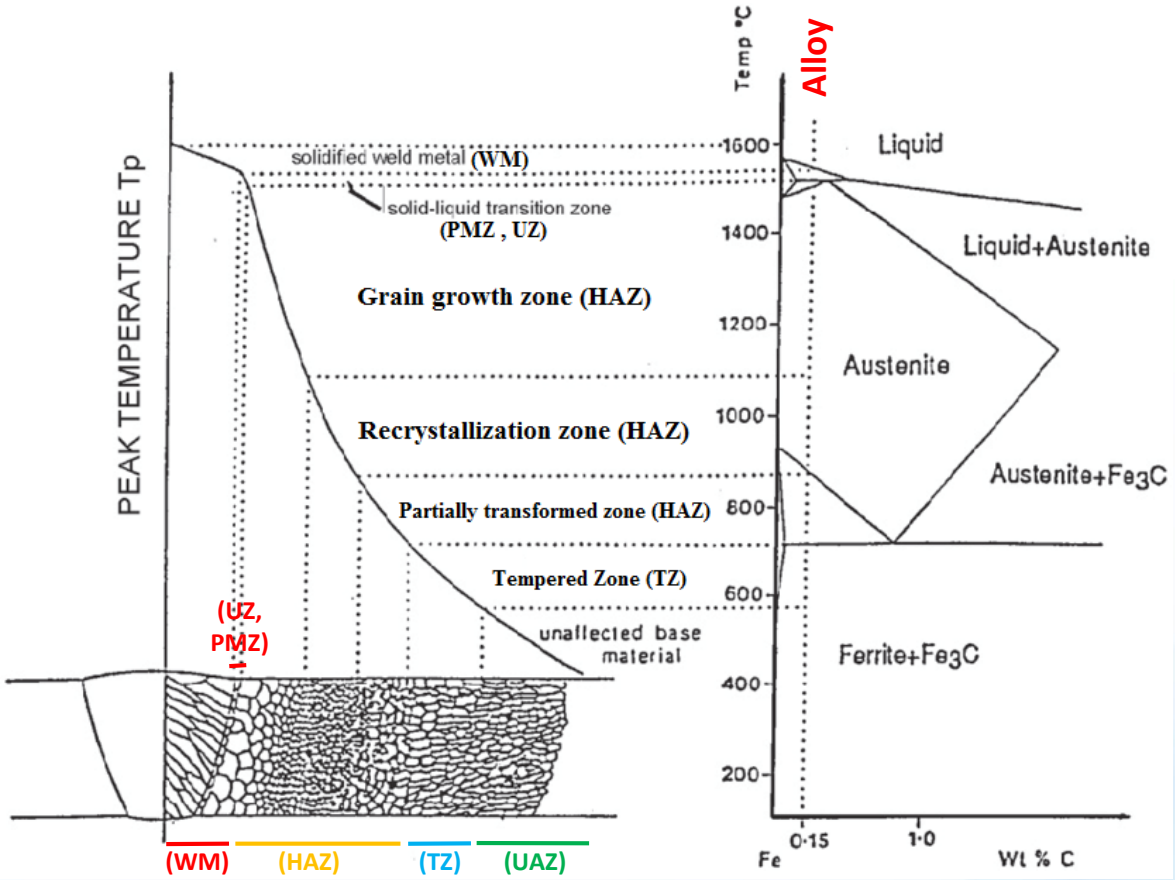
- عدم ذوب و انجماد
- عملیات حرارتی
- تغییر ساختار میکروسکوپی/ ماکروسکوپی
- عدم تغییر ترکیب شیمیایی
- تغییر خواص مکانیکی- شیمیایی - فیزیکی ناشی از تغییرات ساختاری

Temper Zone (TZ)

- تحت گرما قرار می گیرد و عدم ذوب و انجماد
- عدم تغییر ساختار ماکروسکوپی
- تغییر ساختار میکروسکوپی (حذف عیوب کریستالی)
- عدم تغییر ترکیب شیمیایی
- تغییر خواص مکانیکی- شیمیایی - فیزیکی ناشی از تغییرات ساختاری میکروسکوپی

هر یک از این نواحی، نقش منحصر به فرد و ویژه ای در تعیین خواص جوش دارند.

ریزساختارهای جوش و ترکیب شیمیایی



Weld Metal — liquid

PMZ — $L + \delta$

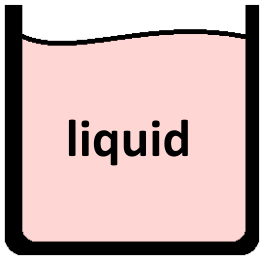
UZ — چنانچه ترکیب شیمیایی فلز جوش و فلز پایه متفاوت باشد.

(HAZ)
- Grain growth — γ
- Recrystallization zone — γ and $\gamma + \alpha$
- Partially transformed zone — $\gamma + \alpha$

TZ — $\alpha + Fe_3C$

تشکیل و وسعت این نواحی
- ترکیب شیمیایی ماده
- سرعت جوشکاری
- حرارت ورودی

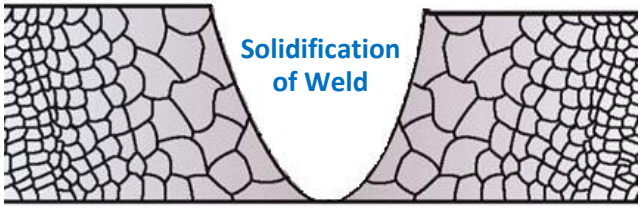
سرعت جوشکاری
- وسعت HAZ ↓
- سایز دانه بندی ↓
- خواص استحکامی ↑



انجماد فلز جوش

انجماد فلز جوش ⟸ **انجماد در قالب فلزی**

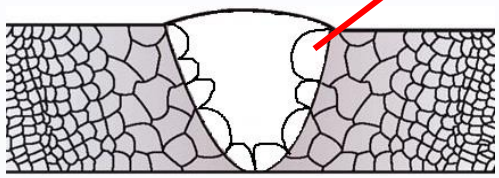
(فلز پایه نقش قالب فلزی را دارد و فلز جوش مذاب، نقش مذاب آلیاژ را).



جوانه زنی در فلز جوش (Nucleation)

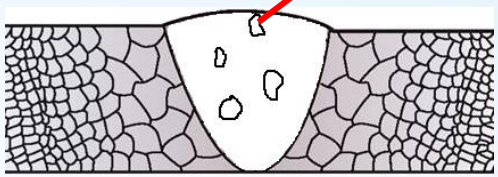
جوانه زنی همگن (Homogeneous Nucleation)

فقط در فصل مشترک WM/BM



جوانه زنی غیر همگن (Heterogeneous Nucleation)

جوانه زنی در عوامل خارجی موجود در جوش مذاب
اکسیدها، نیتریدها، جوانه ها



جوانه زنی همگن در فلز جوش
(Homogeneous Nucleation)

طریقه ی هم بافته (رونشستی)؟
(Epitaxial mechanism)

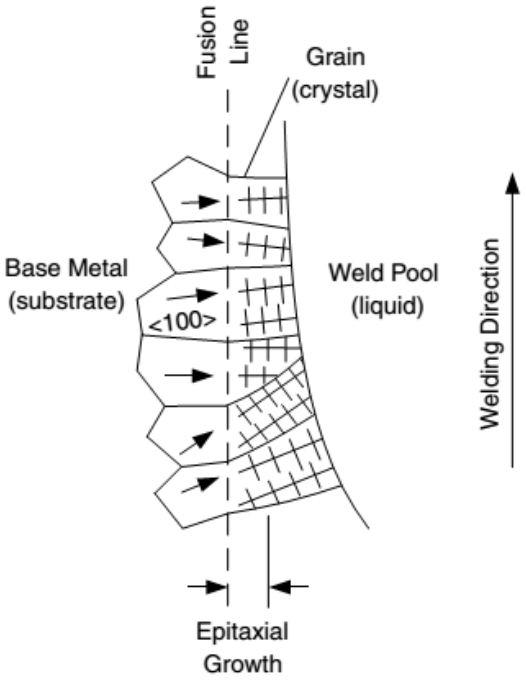


Figure 7.2 Epitaxial growth of weld metal near fusion line.

شکل ۷.۲

جوانه ها در فصل مشترک WM/BM

هر جوانه ی جدید، ادامه ی رشد یکی از دانه های BM است.

اندازه ی جوانه ها توسط اندازه دانه BM تعیین می گردد.

چرا جوانه ها به شکل همبافته با فلز پایه رخ می دهد؟

ترکیب شیمیایی یکسان

ساختار کریستالی یکسان

جوشکاری بدون فیلر

جوشکاری با فیلر یا الکترود شبیه به فلز پایه

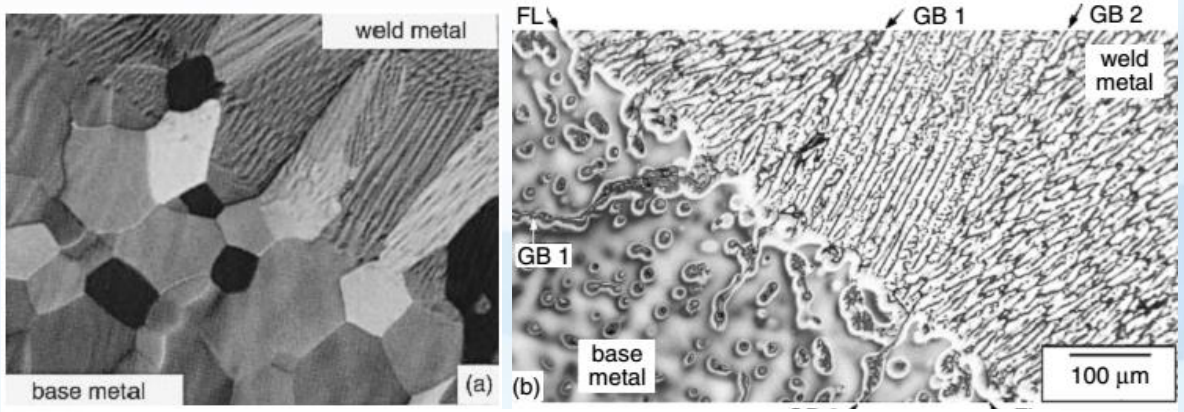


Figure 7.4 Epitaxial growth. (*a*) Near the fusion boundary of electron beam weld of C103 alloy (magnification 400×). Reprinted from O'Brien (9). Courtesy of American Welding Society. (*b*) Near the fusion boundary of as-cast Al–4.5Cu welded with 4043 filler (Al–5Si).

شکل ۷.۴

جوانه زنی همبافته در C103 (آلیاژ نیوبیوم)

جوانه زنی همبافته در 4043 (آلیاژ آلومینیوم)

جوانه زنی همگن در فلز جوش (Homogeneous Nucleation)

طریقه ی غیرهم بافته (غیررونشستی) (Non-epitaxial mechanism)

جوانه های تشکیل شده، در امتداد دانه های BM نیستند و به شکل جداگانه ای تشکیل می شوند.

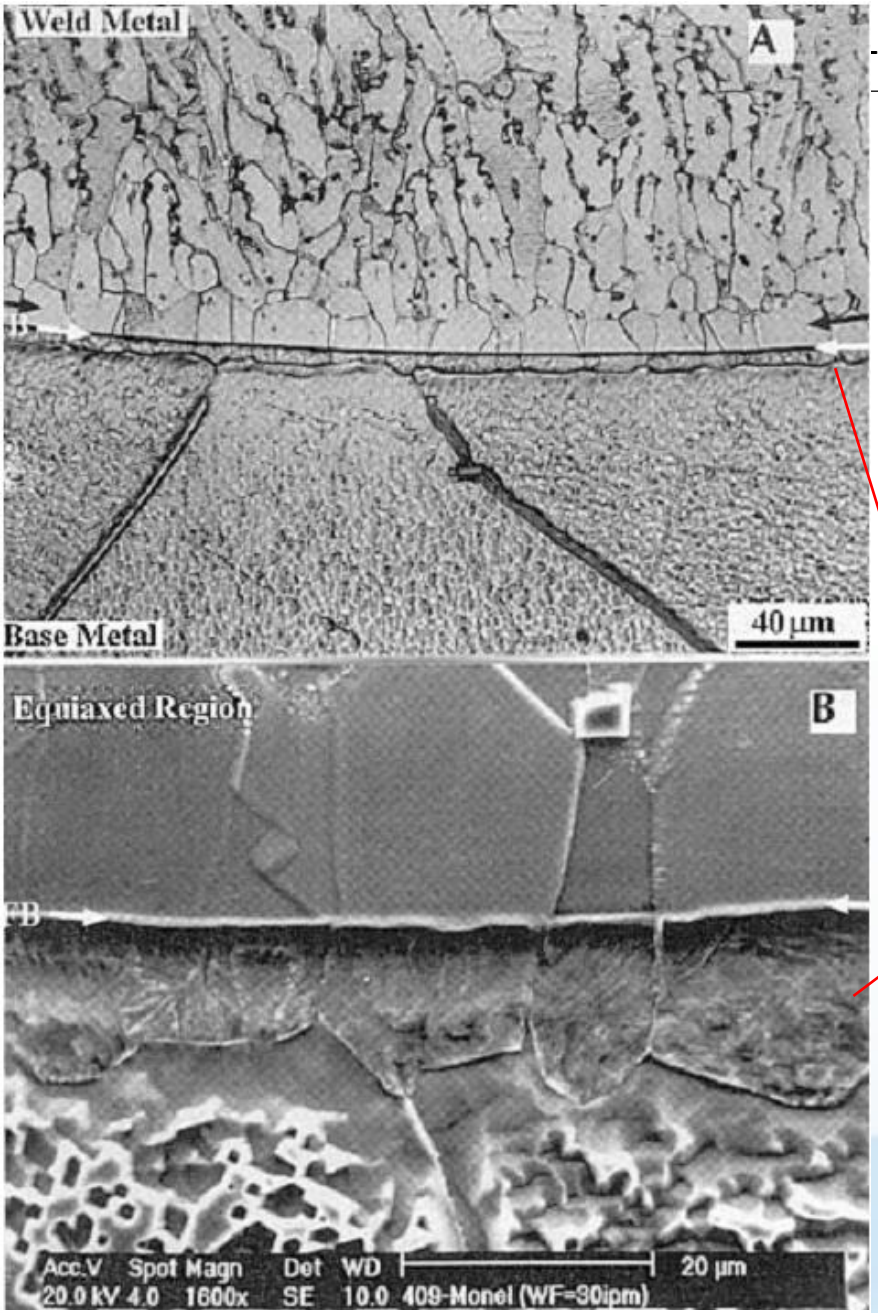


Figure 7.6 Fusion boundary microstructure in 409 ferritic stainless steel (bcc) welded with Monel filler wire (fcc): (*a*) optical micrograph; (*b*) scanning electron micrograph. White arrows: fusion boundary; dark arrows: new grains nucleated along fusion boundary. Reprinted from Nelson et al. (11). Courtesy of American Welding Society.

شکل ۷.۶ جوشکاری SS(α) -409 (BCC) با الکترود MONEL (70%Ni-30%Cu- FCC)

چه زمانی جوانه زنی به شکل غیرهمبافته رخ می دهد؟

?

Unmixed Zone (UZ)

ترکیب شیمیایی متفاوت BM وWM

ساختار کریستالی متفاوت

استفاده از الکترودهای متفاوت

اتصال فلزات غیر مشابه

فلسفه ی تشکیل این منطقه چیست؟

واسطه ای برای بر طرف کردن عدم تطابق های شیمیایی و ساختاری

پس از تشکیل جوانه ها چه به صورت هم بافته و چه به صورت غیر هم بافته، مرحله ی بعدی رشد است.

رشدجوانه ها در فلز جوش

جوانه های تشکیل شده، در رشد با هم در رقابت هستند!

رشد رقابتی (Competitive Growth)

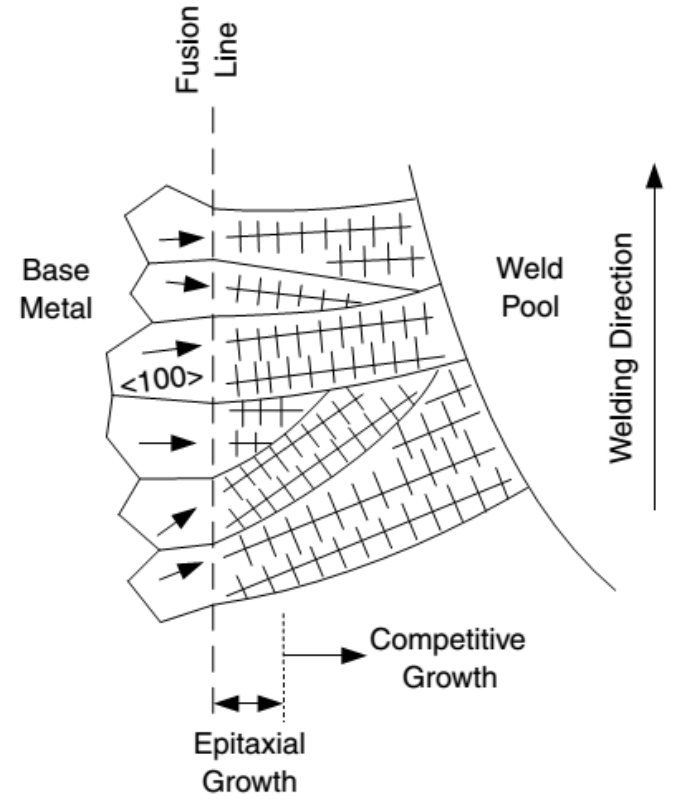


Figure 7.7 Competitive growth in bulk fusion zone.

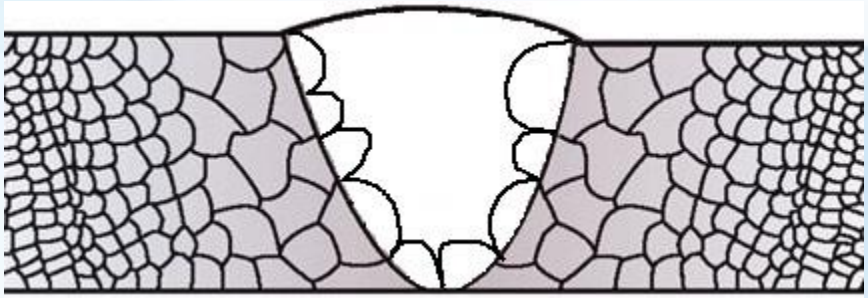
شکل ۷.۶

جوانه های ایجاد شده در حال رشد هستند و با هم در حال رقابت هستند.

عوامل تعیین کننده ی رقابت؟

رشد یک دانه، با خروج حرارت از آن صورت می گیرد. به عبارت دیگر، چنانچه انرژی (گرمایی) که سبب مذاب بون ماده است، خارج شود، اتم های بیشتری به جوانه ها جامد شده ملحق می شوند و انجماد ادامه می یابد.

با توجه به اینکه محیط سرد کننده در جوش BM است، پس خروج حرارت نیز در BM رخ می دهد. حال هرچه جوانه ی ایجاد شده تطابق بیشتری با جهت گیری دانه های فلز پایه داشته باشد، در این رقابت شانس بیشتری دارد.



عامل اول

جوانه ها تمایل به رشد در جهت عمود به فصل مشترک جامد/مذاب (BM/WM) دارند. زیرا این جهت دارای حداکثر شیب حرارتی است که در نتیجه ی آن، میزان خروج حرارت بیشتر است.

رشدجوانه ها در فلز جوش

رشد رقابتی (Competitive Growth)

عوامل تعیین کننده ی رقابت؟

عامل دوم دندریت ها تمایل به رشد در جهات رشد آسان دارند.

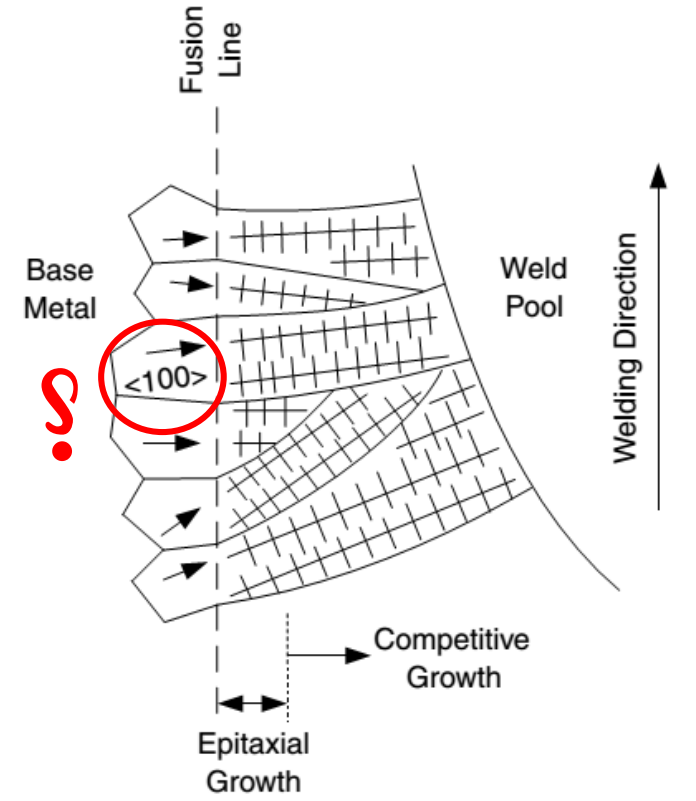


Figure 7.7 Competitive growth in bulk fusion zone.

جدول ۷.۱

TABLE 7.1 Easy-Growth Directions

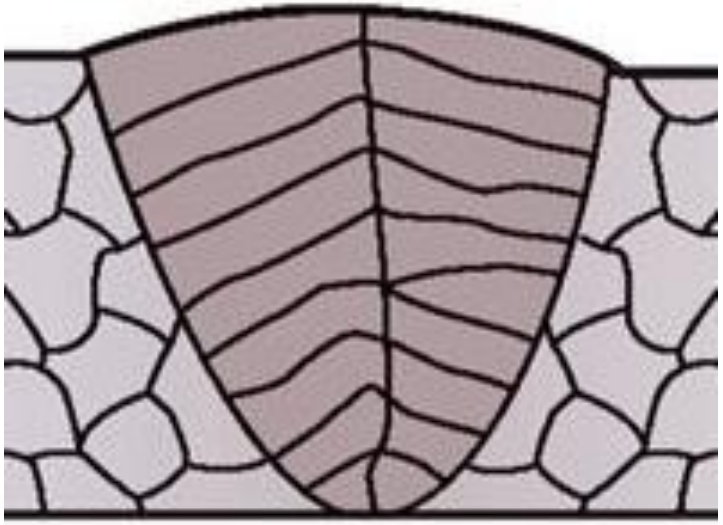
Crystal Structure	Easy-Growth Direction	Examples
Face-centered-cubic (fcc)	<100>	Aluminum alloys, austenitic stainless steels
Body-centered-cubic (bcc)	<100>	Carbon steels, ferritic stainless steels
Hexagonal-close-packed (hcp)	$<10\bar{1}0>$	Titanium, magnesium
Body-centered-tetragonal (bct)	<110>	Tin

Source: From Chalmers (12).

پس در این رقابت، دانه هایی بیشتر رشد می کنند که جهت رشد آسان آن ها عمود بر فصل مشترک BM/WM باشد.

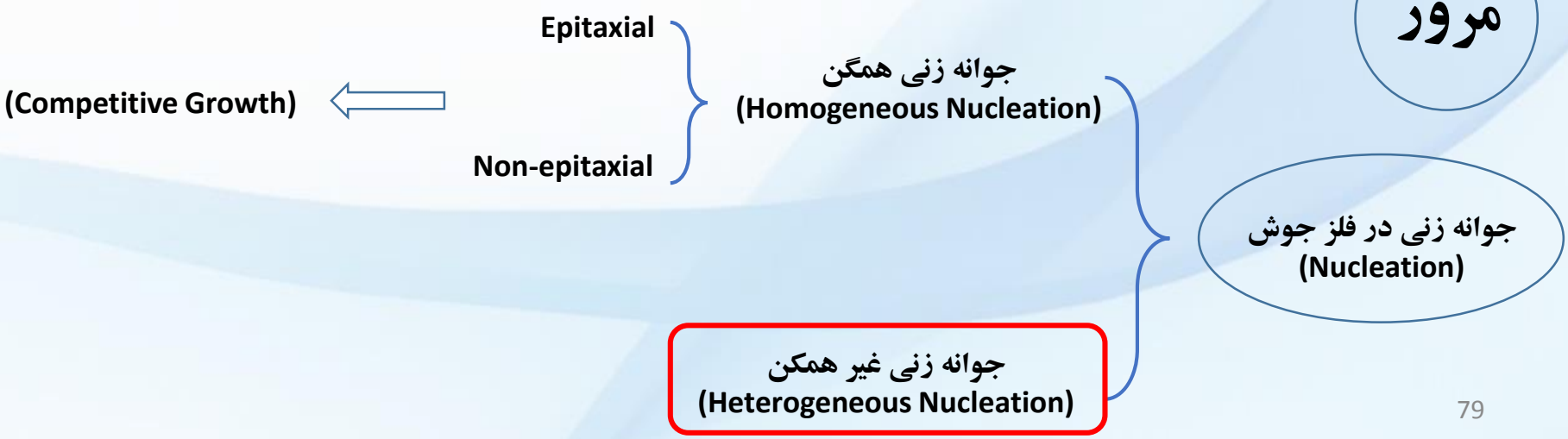
رشدجوانه ها در فلز جوش

رشد رقابتی (Competitive Growth)

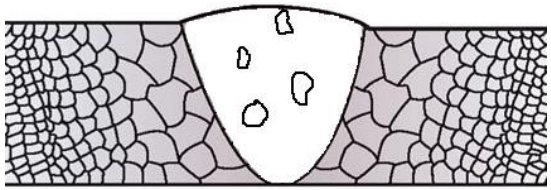


ساختار نهایی فلز جوش در جوانه زنی همگن؟

دانه بندی های جهت دار و کشیده و نسبتا درشت!



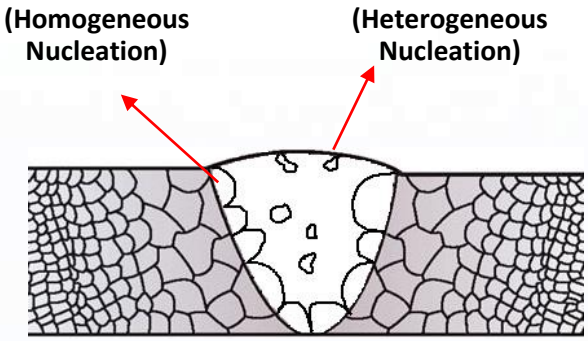
جوانه زنی غیرهمگن در فلز جوش
(Heterogeneous Nucleation)



حضور هر گونه عامل خارجی می تواند به عنوان مرکز جوانه زنی عمل کند که در این صورت جوانه زنی غیر همگن خواهد بود.

عوامل خارجی

- اکسیدها و نیتریدهای ناشی از محافظت ضعیف حین جوشکاری
- آخال ها (آخال تنگستنی در GTAW)
- سرباره
- جوانه زاها (تعمدی)



نکته

در عمل ما نمی توانیم از تشکیل جوانه های همگن جلوگیری کنیم. بنابراین، معمولا هر دو جوانه زنی همگن و غیر همگن ا با هم رخ می دهند.

هرگاه جوانه زنی غیر همکن داشته باشیم، جوانه های عمگن هم وجود دارند، اما بر عکس این حالت رخ نمی دهد.

Equiaxed Grain (Dendrite)?

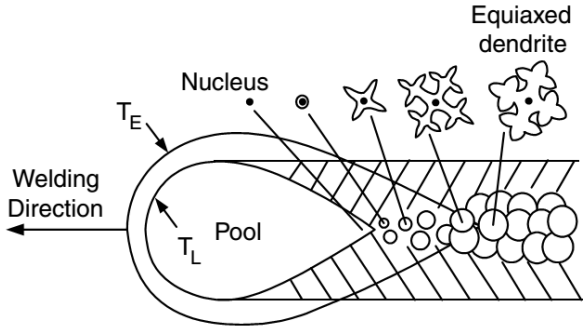


Figure 7.14 Heterogeneous nucleation and formation of equiaxed grains in weld metal.

شکل ۷.۱۴

حضور هم زمان جوانه های همگن و غیر همگن که سبب ساختار Equiaxed شده است.

جوانه زنی غیرهمگن در فلز جوش
(Heterogeneous Nucleation)

شکل ۷.۱۵

ذرات TiB2 به عنوان جوانه زا در جوش Al6061

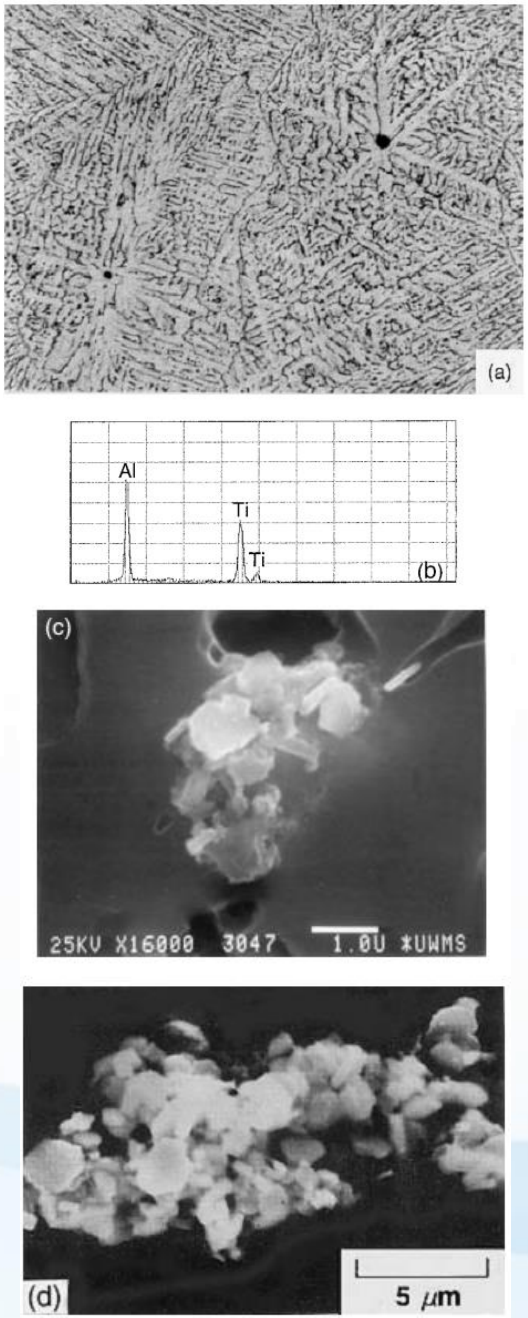
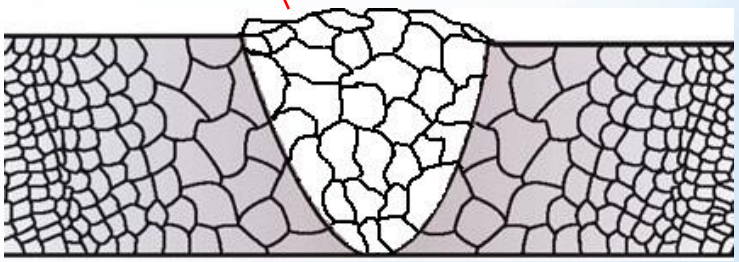


Figure 7.15 Heterogeneous nuclei in GTAW of 6061 aluminum: (*a*) optical micrograph; (*b*) EDS analysis; (*c*) SEM image; (*d*) SEM image of TiB_2 particles in a grain refiner for aluminum casting. (*a*, *b*) From Kou and Le (20). (*d*) Courtesy of Granger (21).

ساختار نهایی فلز جوش در جوانه زنی غیر همگن؟

دانه بندی های هم محور!

Equiaxed Grain structure



شکل ۷.۱۶

جوانه زنی غیرهمگن در اثر حضور TiN در SS(α)

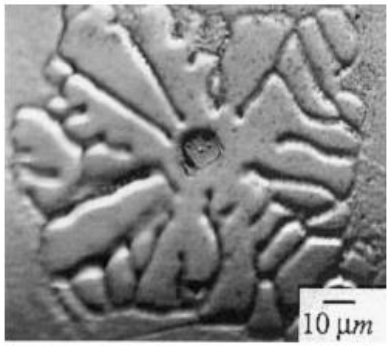
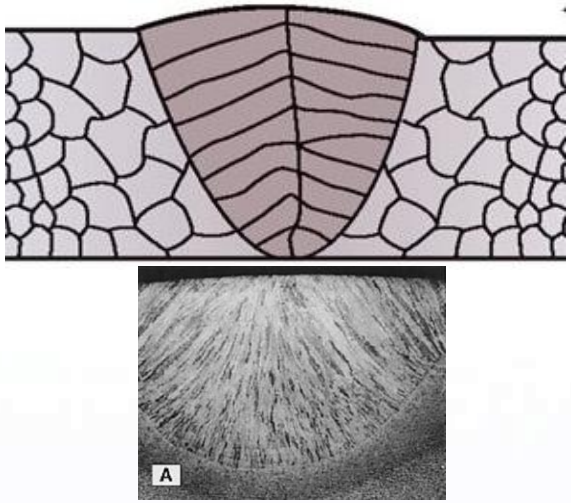


Figure 7.16 TiN particle as heterogeneous nucleus in GTAW of ferritic stainless steel. Reprinted from Villafuerte and Kerr (22).

مرور ساختاردانه بندی فلز جوش در جوانه زنی همگن و غیر همگن؟



جوانه زنی همگن (Homogeneous Nucleation)

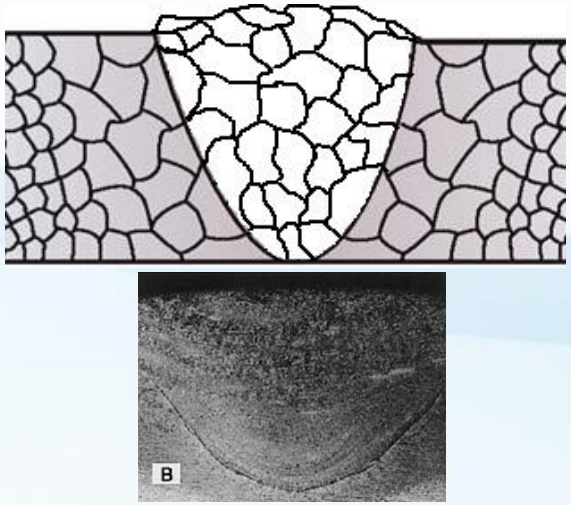
جوانه زنی فقط در فصل مشترک BM/WM

دانه های جهت دار و کشیده

دانه های درشت (کاهش خواص مکانیکی)

- تنش تسلیم
- تافنس

حساس به ترک انجمادی؟ (مرور)



جوانه زنی غیر همگن (Heterogeneous Nucleation)

جوانه زنی در ذرات خارجی و فصل مشترک BM/WM

افزایش تعداد جوانه ها و رشد کمتر جوانه ها

دانه بندی هم محور

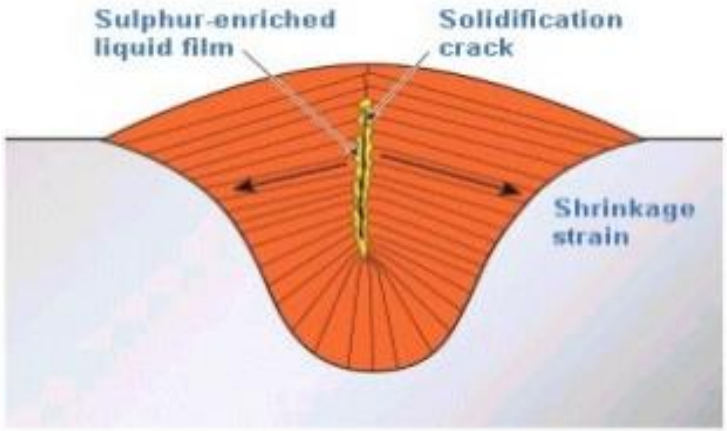
دانه های ریز (افزایش خواص مکانیکی)

- تنش تسلیم
- تافنس

مقاوم به ترک انجمادی؟ (مرور)

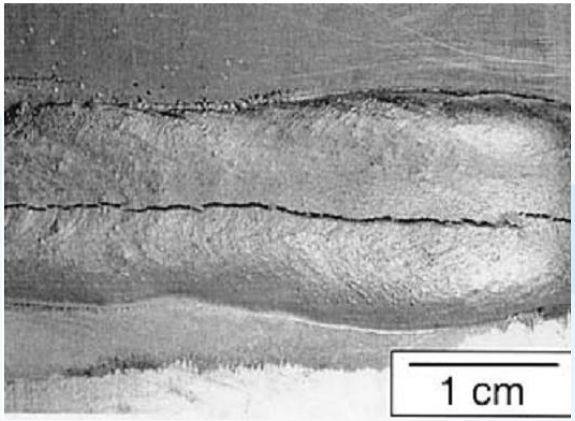
یادآوری انواع ترک

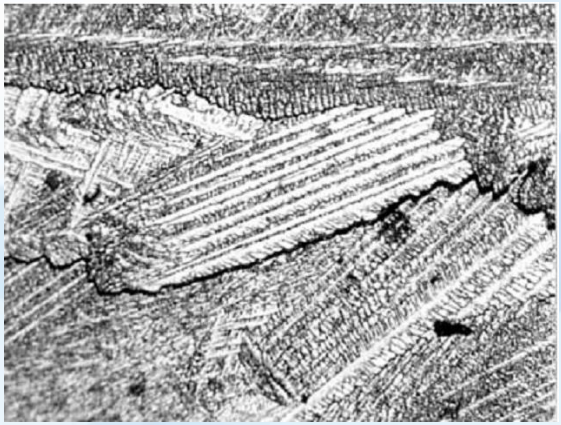
در حین انجماد، عناصر زودگداز مثل p و s (هنگامی که دانه ها در حال رشد هستند) به بیرون دانه ها پس زده می شوند، و در انتهای انجماد در مرکز جوش تجمع می کنند. فسفر و گوگرد تجمع یافته مذاب هستند در حالیکه دانه های ایجاد شده در حال انقباض هستند. این انقباض به راحتی سبب ترک خوردگی می شوند.

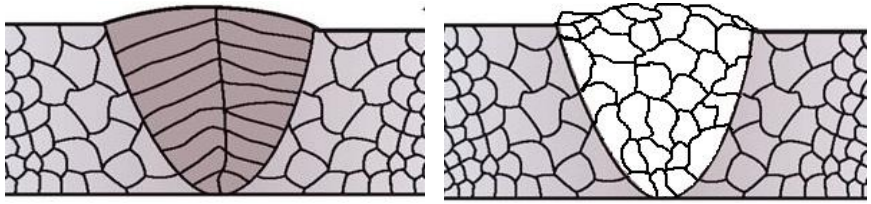


انواع ترک

- ترک انجمادی
  Solidification cracking
- ترک خوردگی مایع
  Liquation cracking
- ترک سرد
  Cold Crack
- ترک گرم
  Hot Crack
- ترک بازگرمی
  Reheat crack
- ترک لایه ای
  Lamellar Crack







مزیت دانه های هم محور

کاهش حساسیت فلز جوش به ترک خوردگی انجمادی

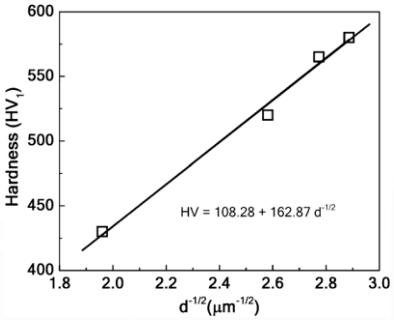
دانه های هم محور و ریز، میزان جدایش عناصر زودگداز را کاهش می دهند.

افزایش تنش تسلیم

ریزدانگی تاثیر مستقیمی بر روی استحکام تسلیم دارد.

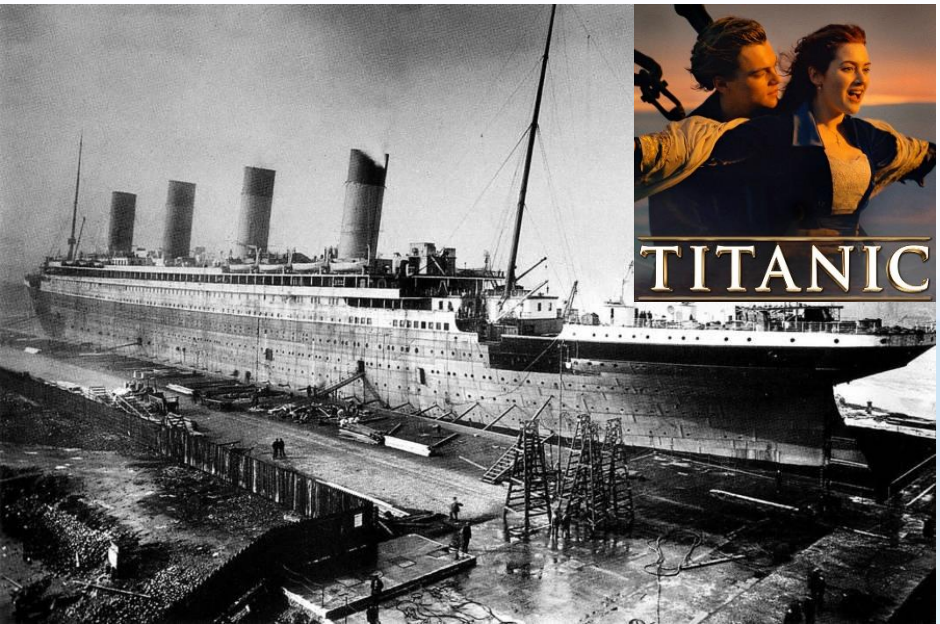
$$\sigma_y = \sigma_o + kd^{-\frac{1}{2}}$$

d : diameter of grain,
σ_y : yield strength,
σ_o and k are constant



افزایش تافنس

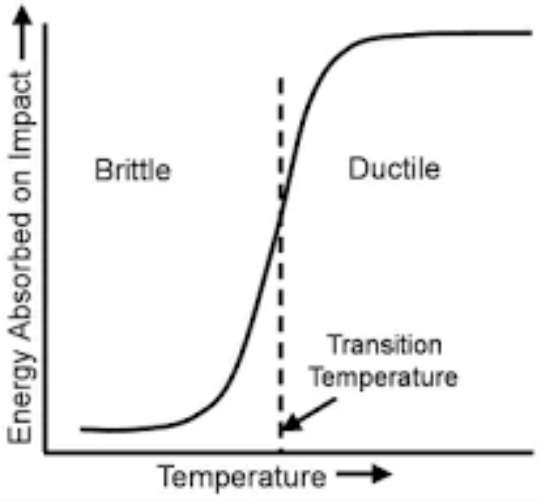
با کاهش دما، تافنس کاهش می یابد.

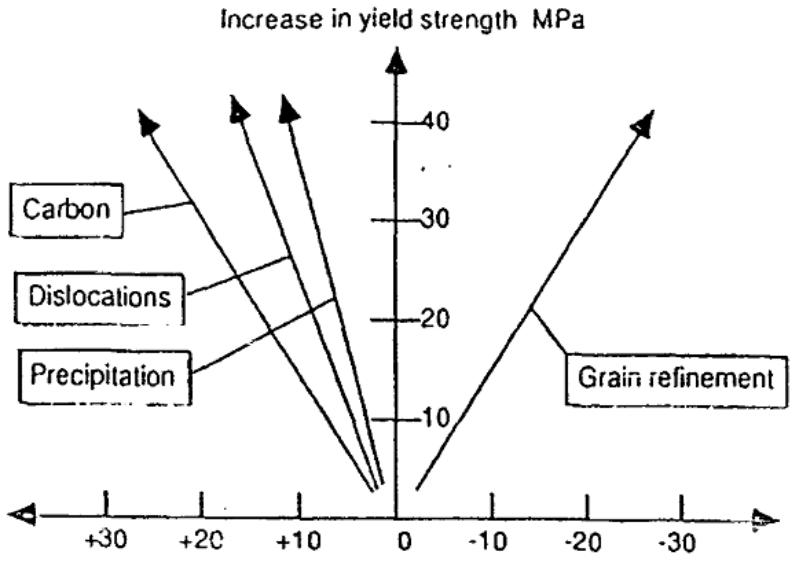


تافنس جوش را معمولا چگونه بیان می کنند؟

تافنس { **آزمون کشش**، **آزمون ضربه**

Ductile to brittle transition temperature (DBTT)





مزیت دانه های هم محور

افزایش تافنس

:DBTT

با انجام چندین تست ضربه در دماهای متفاوت

هرچه DBTT کمتر باشد، تافنس ماده بیشتر می شود.

DBTT ⇐ تردی ⇐ تافنس

ریزدانگی بیشترین کاهش را در DBTT ایجاد می کند.

با وجود این ویژگی های مثبت در اثر ریزدانگی، تلاش بر این است که ساختار دانه بندی جوش را هم محور و ریزدانه کنیم.

روش های اصلاح ساختار دانه بندی فلز جوش

چه عواملی سبب تشکیل دانه های هم محور می شد؟

عوامل خارجی

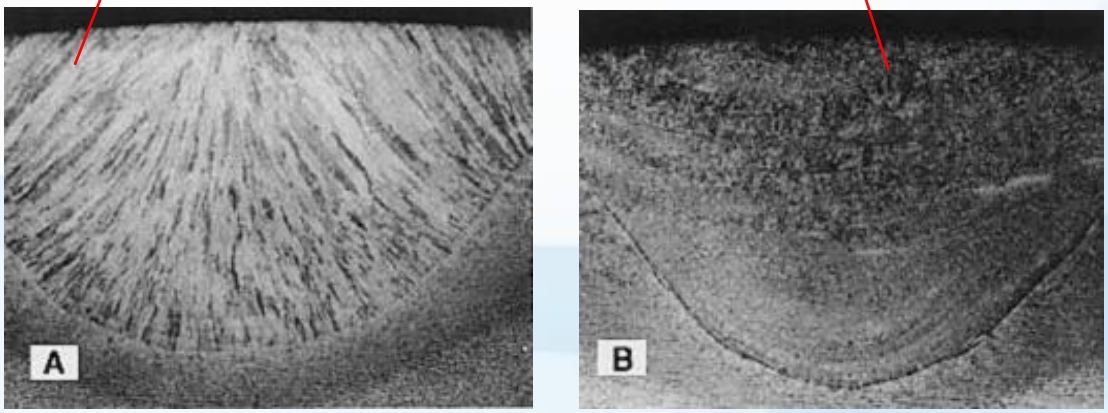
- اکسیدها و نیتریدهای ناشی از محافظت ضعیف حین جوشکاری
- آخال ها (آخال تنگستنی در GTAW)
- سرباره
- جوانه زاها (تعمدی)

نکته

اگرچه اکسیدها و نیتریدها می توانند سبب جوانه زنی غیر همگن و ریزدانگی جوش شوند، اما این عوامل خود نیز به عنوان مناطق مستعد به ترک شناخته می شوند. بنابراین بایستی به دنبال روش هایی بگردیم که اصلاح سازی و دانه بندی فلز جوش ناشی از حضور اکسیدها و نیتریدها به عنوان جوانه زنی نباشد.

دانه بندی درشت و جهت دار

دانه بندی ریز و هم محور



۱- تلقیح یا جوانه زنی (Inoculation)

افزودن ترکیباتی که نقش جوانه زایی دارند.

شکل ۷.۲۲

جوانه زایی Ti در فولاد C-Mn در روش SAW

Figure 7.22 Effect of inoculation on grain structure in submerged arc welds of C–Mn steel (magnification 6×): (*a*) without inoculation; (*b*) inoculation with titanium. Reprinted from Heintze and McPherson (30). Courtesy of American Welding Society.

روش های اصلاح ساختار دانه بندی فلز جوش

تلقیح یا جوانه زنی (Inoculation)

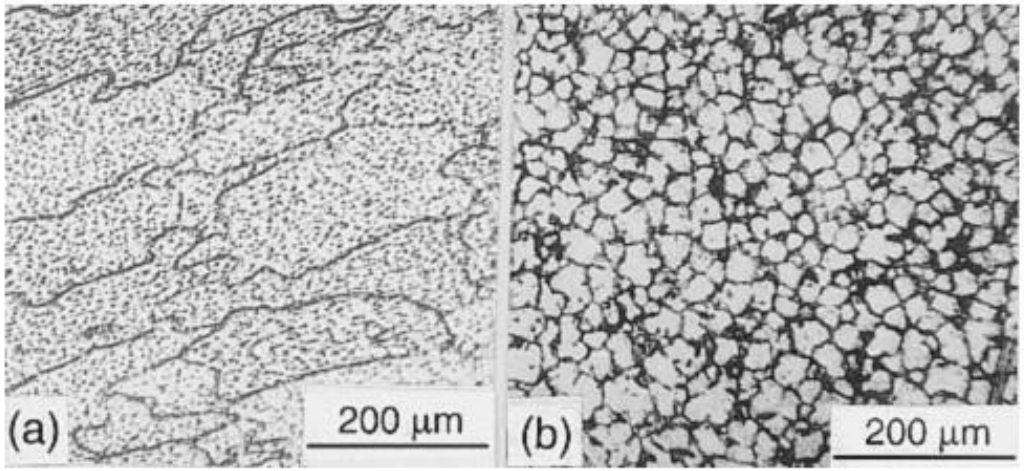


Figure 7.24 Effect of inoculation on grain structure in GTAW of 2090 Al–Li–Cu alloy: (*a*) 2319 Al–Cu filler metal; (*b*) 2319 Al–Cu filler metal inoculated with 0.38% Ti. Reprinted from Sundaresan et al. (35).

شکل ۷.۲۴

جوانه زایی Ti در آلیاژ آلومینیوم Al2090 در فرایند GTAW

مکانیزم؟

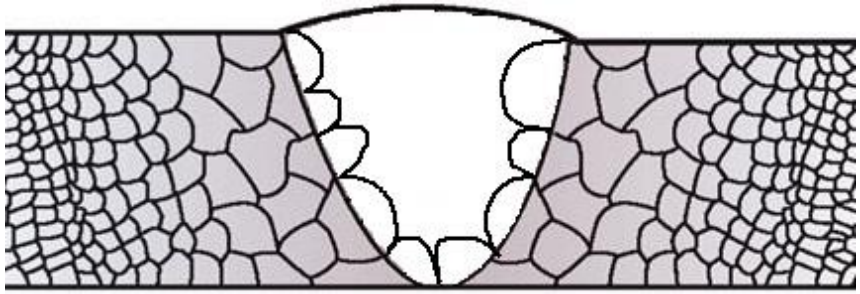
تشکیل جوانه های غیر همگن در مرکز جوش

افزایش تعداد دانه ها و کاهش رشد دانه ها

دانه بندی ریز و هم محور

روش های اصلاح ساختار دانه بندی فلز جوش

۲- هم زدن حوضچه ی جوش (Weld pool stirring)



هم زدن حوضچه ی جوش حین انجماد

↓

شکست جوانه های ایجاد شده

↓

افزایش مراکز جوانه زنی جدید

↓

دانه بندی ریز و هم محور

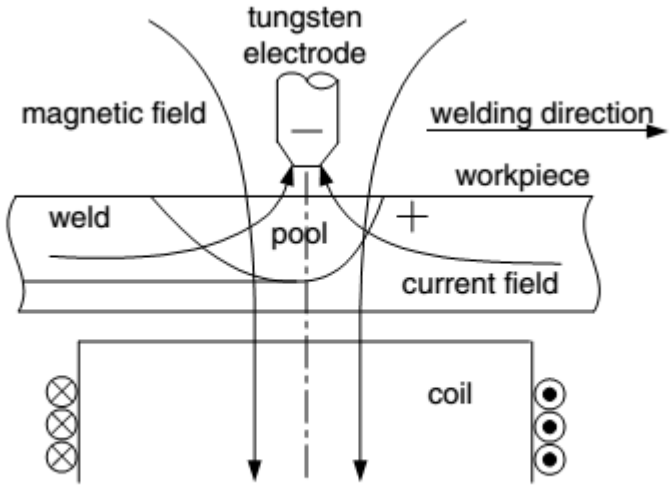


Figure 7.25 Schematic sketch showing application of external magnetic field during autogenous GTAW. Modified from Matsuda et al. (36).

شکل ۷.۲۵

(Electromagnetic stirring)

استفاده از میدان مغناطیسی متناوب خارجی در حین جوش

هم زدن حوضچه ی جوش (Weld pool stirring)

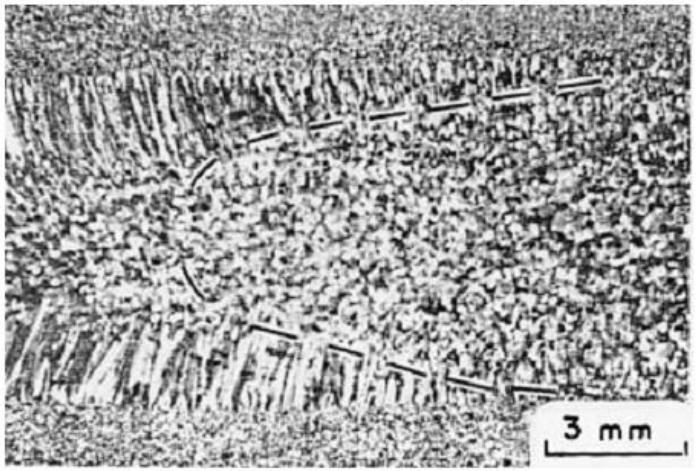


Figure 7.26 Widening of equiaxed zone in GTAW of alloy Al–2.5Mg–0.011Ti by magnetic stirring (at dotted line). Reprinted from Pearce and Kerr (32).

شکل ۷.۲۶

افزایش وسعت منطقه ی ریز دانه و هم محور در جوش Al–2.5Mg–0.011Ti

آلومینیوم مغناطیسی است مگه؟!!

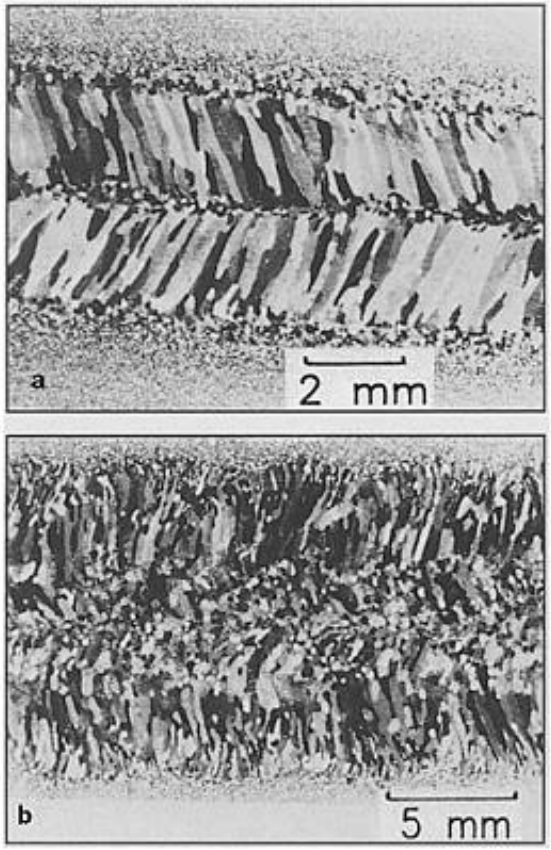


Figure 7.27 Effect of electromagnetic pool stirring on grain structure in GTAW of 409 ferritic stainless steel: (*a*) without stirring; (*b*) with stirring. Reprinted from Villafuerte and Kerr (39). Courtesy of American Welding Society.

شکل ۷.۲۷

ss(α) – 409 - GTAW

روش های اصلاح ساختار دانه بندی فلز جوش

۳- استفاده از جریان پالسی در جوشکاری (Arc pulsation)

تغییرات در جریان الکتریکی

↓

تغییر حرارت ورودی

↓

عدم رشد جوانه های قبلی و تشکیل جوانه های جدید

↓

دانه بندی ریز و هم محور

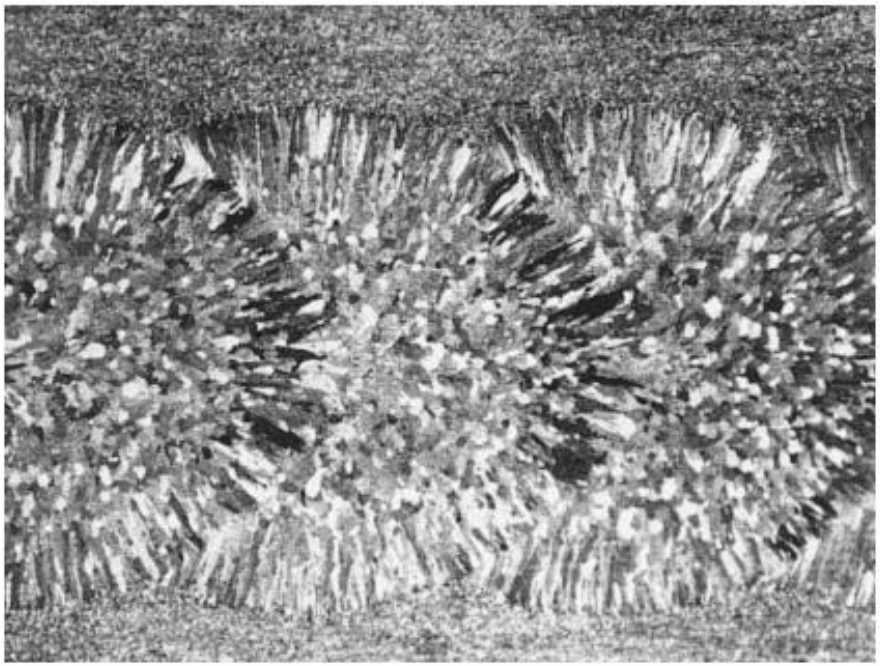


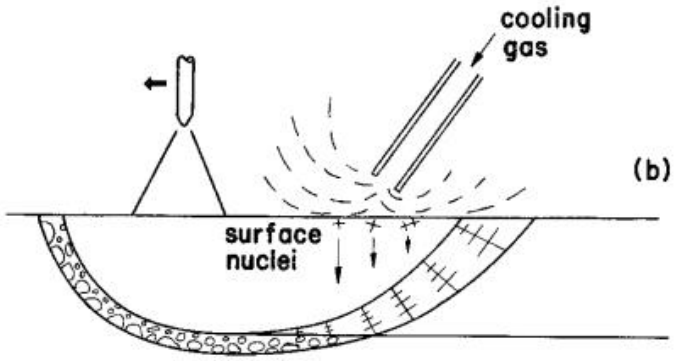
Figure 7.29 Equiaxed grains in pulsed arc weld of 6061 aluminum (magnification 9×). From Kou and Le (44).

شکل ۷.۲۹

تشکیل ساختار هم محور توسط جریان پالسی (AL-6061)

روش های اصلاح ساختار دانه بندی فلز جوش

۴- تحریک جوانه زایی سطحی توسط سرمایش سطح (Stimulated surface nucleation)



MECHANISM 4: Surface Nucleation

Figure 7.13 Nucleation mechanisms during welding: (*a*) top view; (*b*) side view. Reprinted from Kou and Le (19). Courtesy of American Welding Society.

شکل ۷.۱۳

مکانیزم جوانه زنی سطحی توسط سرمایش سطح

سرمایش سطح و جوانه زنی در سطح

دانه بندی ریز و هم محور

ناحیه ی مخلوط نشده (unmixed Zone)

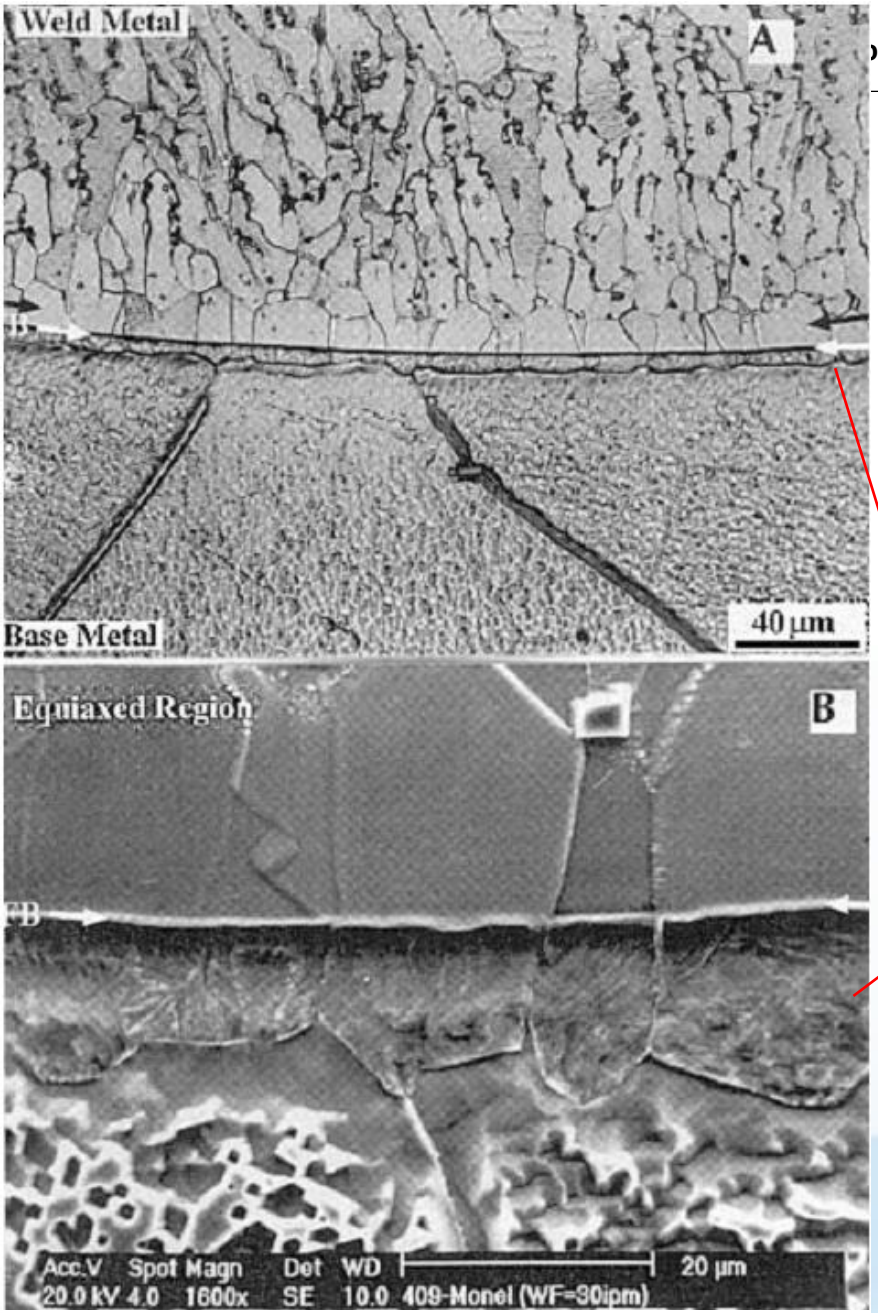


Figure 7.6 Fusion boundary microstructure in 409 ferritic stainless steel (bcc) welded with Monel filler wire (fcc): (*a*) optical micrograph; (*b*) scanning electron micrograph. White arrows: fusion boundary; dark arrows: new grains nucleated along fusion boundary. Reprinted from Nelson et al. (11). Courtesy of American Welding Society.

Unmixed Zone (UZ)

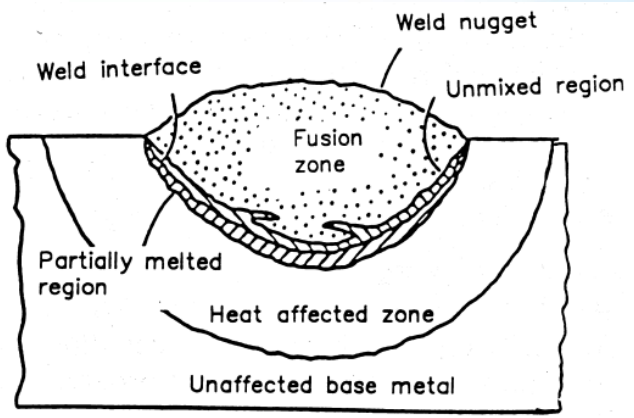


Fig. 1 Schematic showing the regions of a heterogeneous weld. Source: Ref 2

تشکیل در صورت تفاوت ترکیب شیمیایی فلز جوش و فلز پایه

(نقش لایه ی واسطه و ایجاد تطابق ساختاری و شیمیایی)

Unmixed Region
Unmixed Zone (UZ)

Partially Melted Zone (PMZ)

ناحیه ی ذوب شده ی جزئی
(Partially Melted Zone - PMZ)

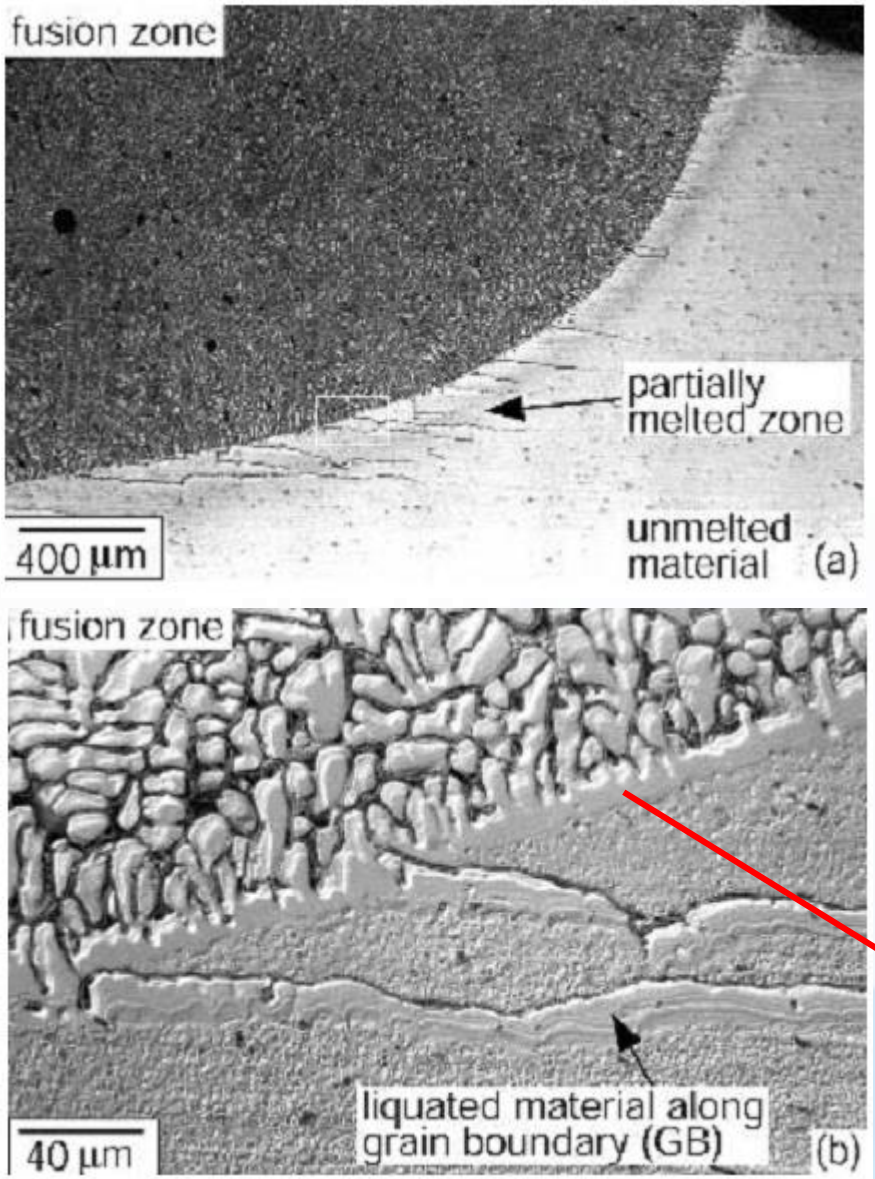


Figure 12.1 PMZ microstructure of gas–metal arc weld in 6061 aluminum made with 4145 aluminum filler wire. Rectangular area in (*a*) enlarged in (*b*).

مرور

Partially Melted Zone (PMZ)

ذوب و انجماد نسبی

تغییر ساختار میکروسکوپی/ ماکروسکوپی

تغییر ترکیب شیمیایی

تغییر خواص مکانیکی- شیمیایی - فیزیکی

منشا بسیاری از تخریب ها:
ترک خوردگی مایع (Liquation Cracking)
ترک خوردگی هیدروژنی (HIC)
خوردگی های داغ (Hot Corrosion)

شکل ۱۲.۱

ناحیه ی PMZ در جوش AL-6061 با فیلر AL-4145 در فرایند GTAW

مکانیزم جوانه های ایجاد شده چیست؟

(UZ)

منطقه ی UZ وجود دارد؟

ناحیه ی ذوب شده ی جزئی
(Partially Melted Zone - PMZ)

شکل ۱۲.۱

ناحیه ی PMZ در جوش AL-6061 با فیلر AL-4145 در فرایند GTAW

درون دانه های فلز پایه، در نزدکی مرزدانه ها نواحی جداگانه ای مشاهده می شود که ناشی از ذوب جزیی است (بخشی از یک دانه). تعریف (PMZ)

PMZ در فلز پایه است!

تفاوت رنگ در تصویر میکروسکوپی در این مناطق به دلیل تفاوت ترکیب شیمیایی است.

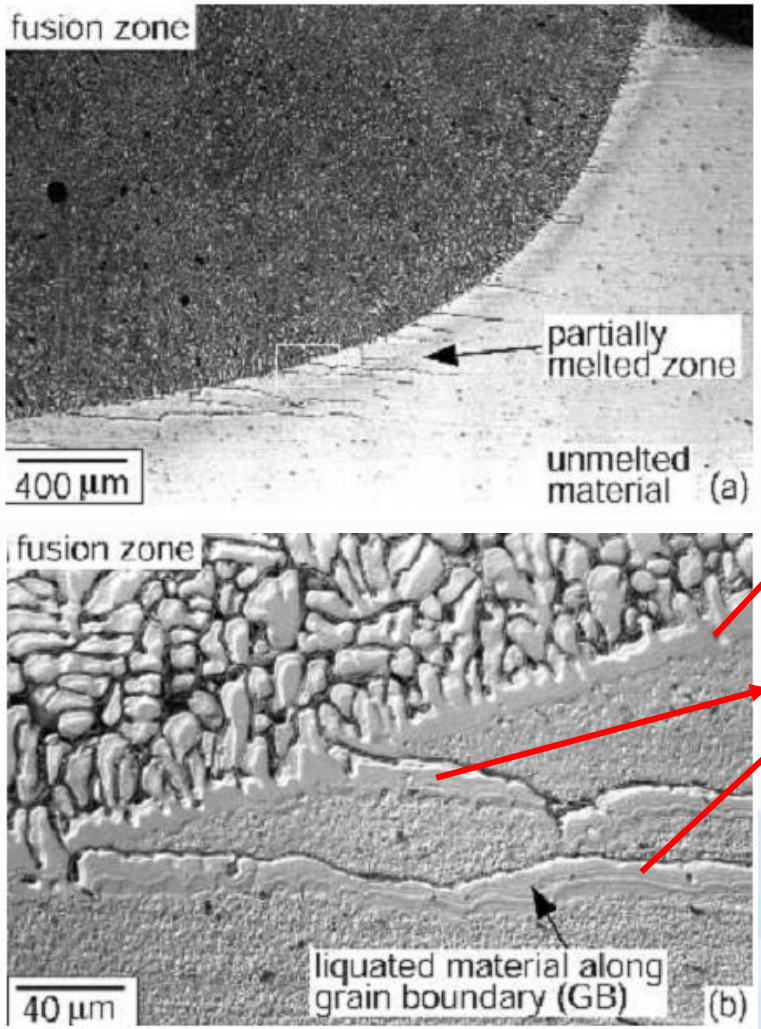
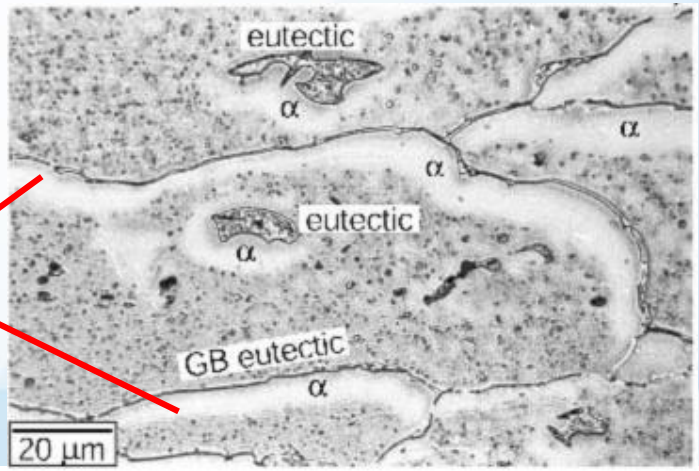


Figure 12.1 PMZ microstructure of gas–metal arc weld in 6061 aluminum made with 4145 aluminum filler wire. Rectangular area in (*a*) enlarged in (*b*).

(UZ)

(PMZ)



شکل ۱۲.۵

ناحیه ی PMZ در جوش AL-2219

Figure 12.5 Microstructure evolution in PMZ of 2219 aluminum with SEM image of the base metal on the top and optical micrograph of the PMZ at the bottom. Reprinted from Huang and Kou (1). Courtesy of American Welding Society.

ناحیه ی ذوب شده ی جزئی
(Partially Melted Zone - PMZ)

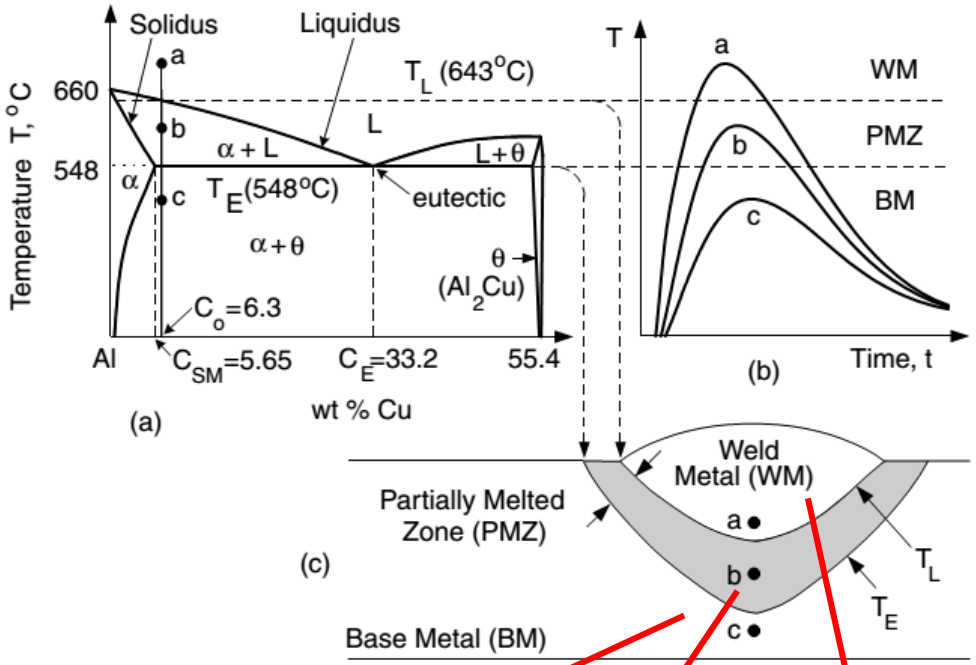


Figure 12.3 Formation of PMZ in 2219 aluminum weld: (*a*) Al-rich side of Al–Cu phase diagram; (*b*) thermal cycles; (*c*) transverse cross section.

شکل ۱۲.۳

تحلیل هم زمان ساختاری و فازی

a) نمودار فازی Al-Cu
Al2219 (Al-Cu)

b) سیکل های حرارتی حین جوشکاری

c) نواحی جوش

نکته

PMZ درون BM است. بنابراین دما از دمای کم به دمای زیاد افزایش می یابد. به عبارت دیگر، مذاب در دل جامد جوانه زنی می کند نه جامد در دل مذاب!

α + Θ

Θ (اینترمتالیک) Al2Cu

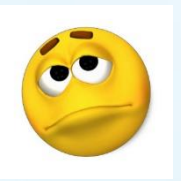
L + α

α (محلول جامد)

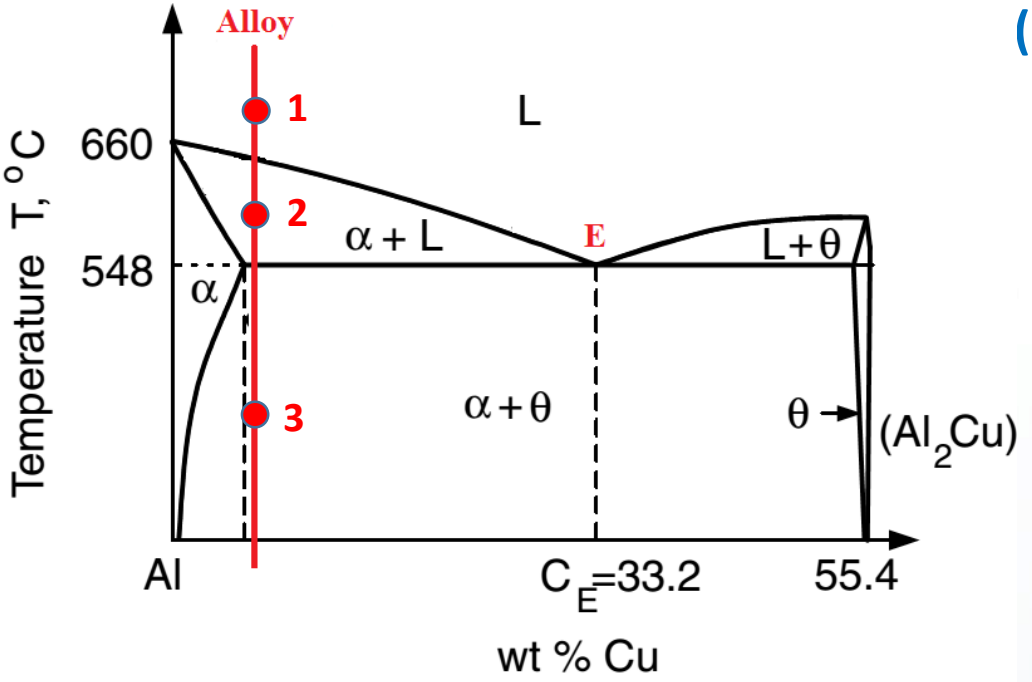
(PMZ)

L

حالا یه بخشی از فلز پایه هم ذوب شده باشه، در نهایت منجمد میشه میره پی کارش دیگه! چرا این قدر داستان داره پس؟!!!



ناحیه ی ذوب شده ی جزئی
(Partially Melted Zone - PMZ)



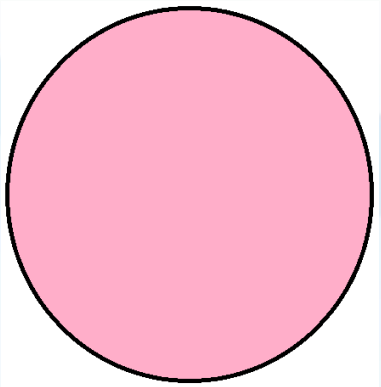
تحلیل میکروساختار فلز جوش در آلیاژ Alloy:

در تحلیل فلز جوش، انجماد را از بالاترین دما تا دمای محیط تحلیل خواهیم کرد.

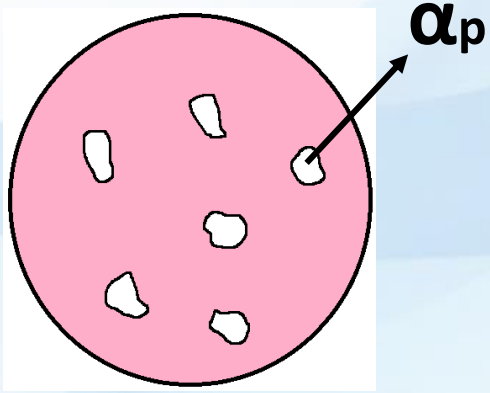
قبل از یوتکتیک

بعد از یوتکتیک

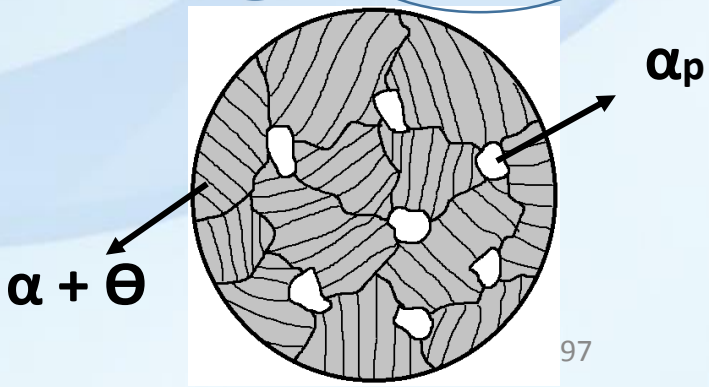
(1) Liquid



(2) α_p + L



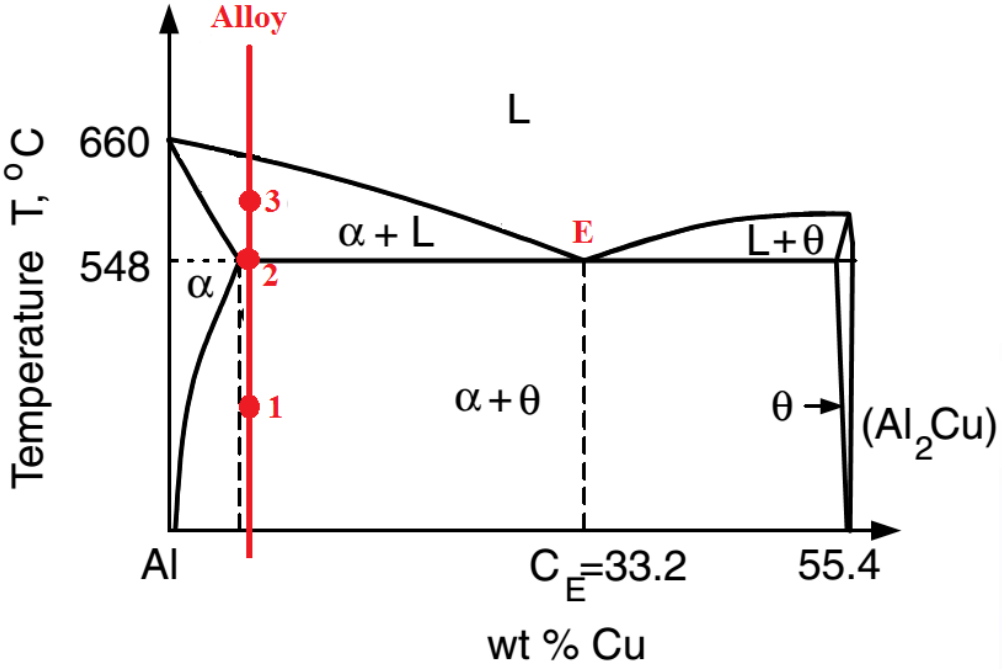
(3) α_p + (α + Θ)

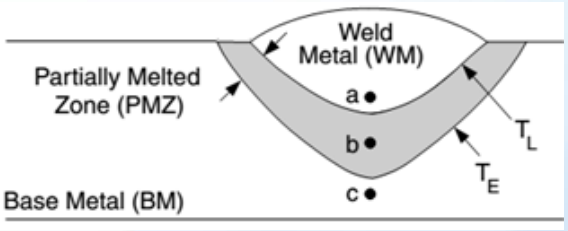


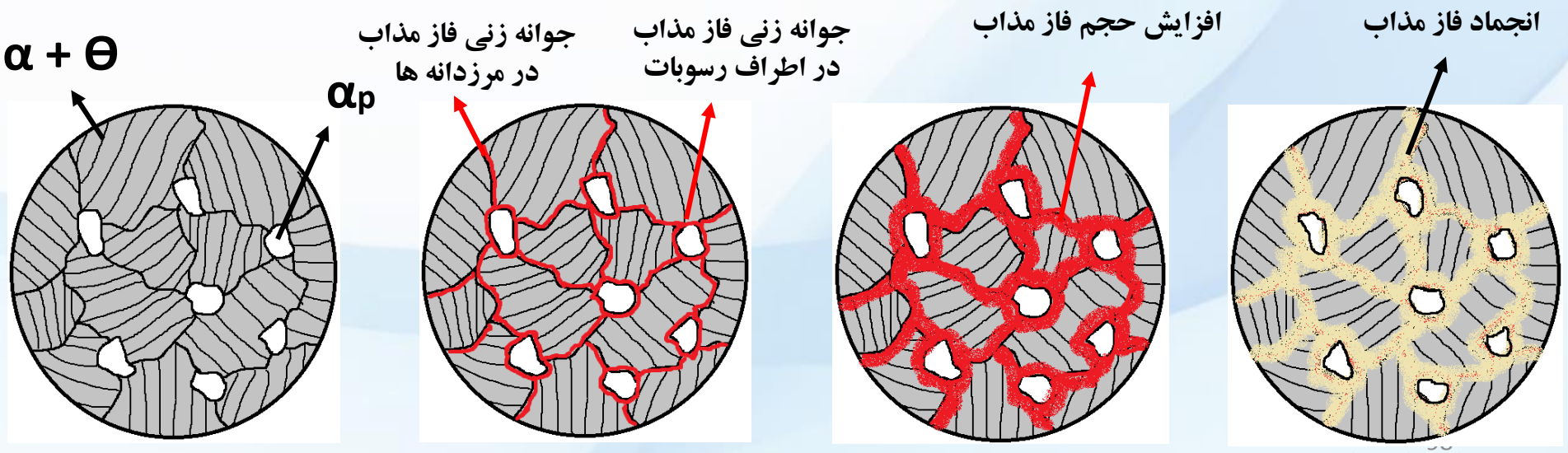
ناحیه ی ذوب شده ی جزئی
(Partially Melted Zone - PMZ)

تحلیل میکروساختار در PMZ درآلیاژ Alloy:

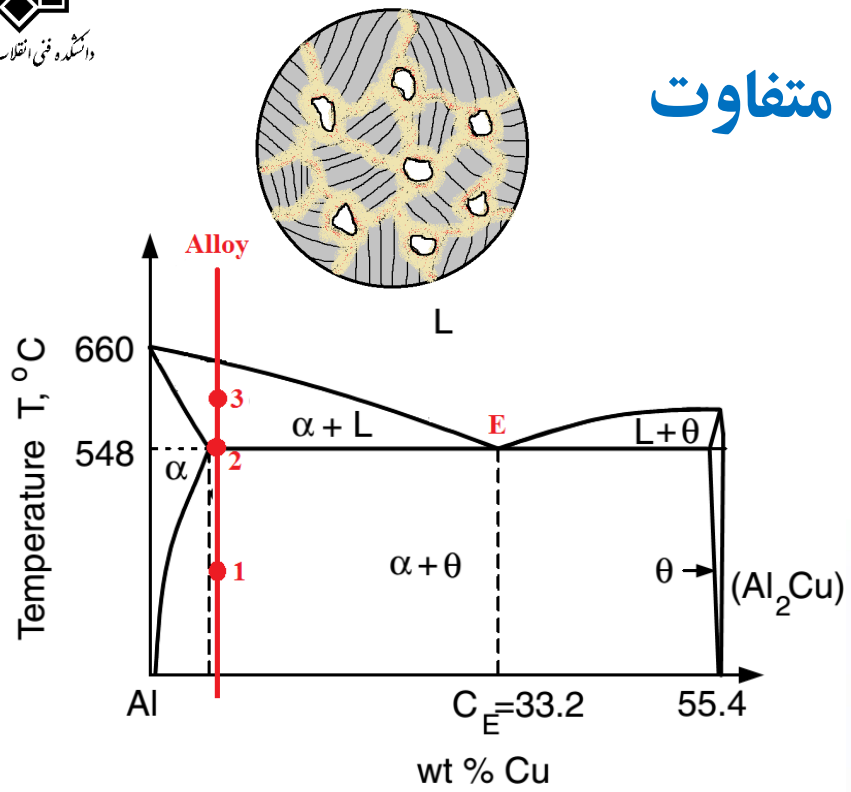
در تحلیل منطقه PMZ، افزایش دما از دمای محیط را مورد تحلیل قرار می دهیم.







تصاویری از PMZ در آلیاژهای متفاوت



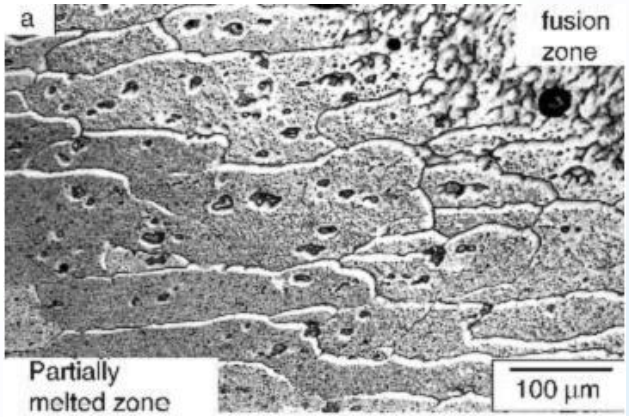


Figure 12.2 PMZ microstructure of gas–metal arc weld in 2219 aluminum made with 2319 aluminum filler wire: (*a*) left of weld; (*b*) right of weld. Reprinted from Huang and Kou (1). Courtesy of American Welding Society.

شکل ۱۲.۲
PMZ در آلیاژ Al2219 با فیلر AL-2319 در فرایند GMAW

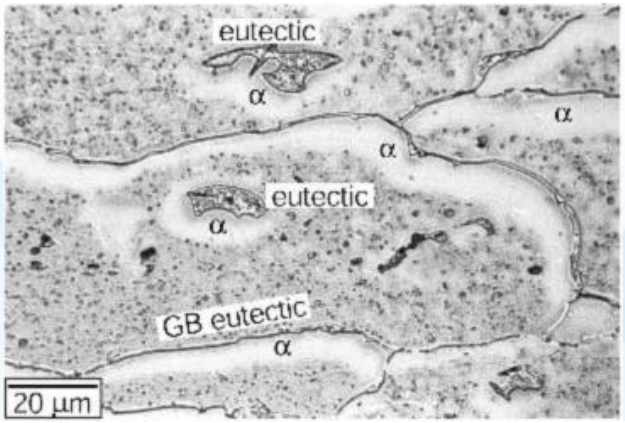


Figure 12.5 Microstructure evolution in PMZ of 2219 aluminum with SEM image of the base metal on the top and optical micrograph of the PMZ at the bottom. Reprinted from Huang and Kou (1). Courtesy of American Welding Society.

شکل ۱۲.۵
PMZ در آلیاژ Al2219

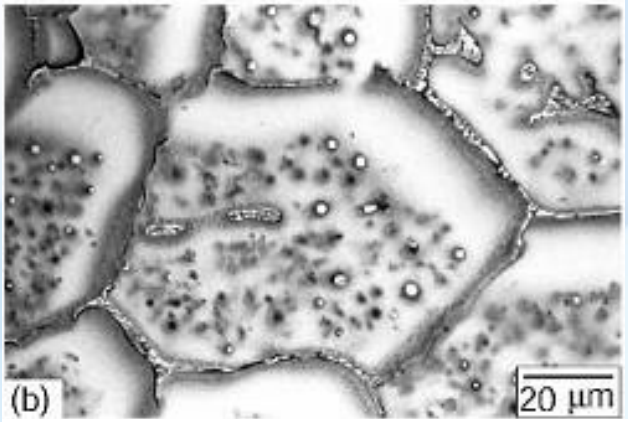


Figure 12.11 PMZ microstructure of gas–metal arc weld in cast Al–4.5Cu homogenized before welding (a) and magnified (b). Reprinted from Huang et al. (4).

شکل ۱۲.۱۱
PMZ در آلیاژ Al-4.5Cu در فرایند GMAW

ناحیه ی ذوب شده ی جزئی
(Partially Melted Zone - PMZ)

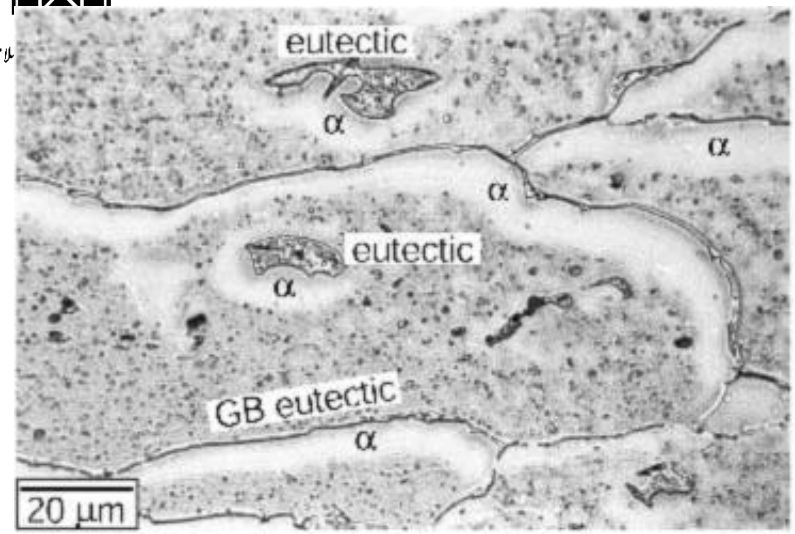
نواحی ایجاد شده دارای ترکیب شیمیایی متفاوت با زمینه است.

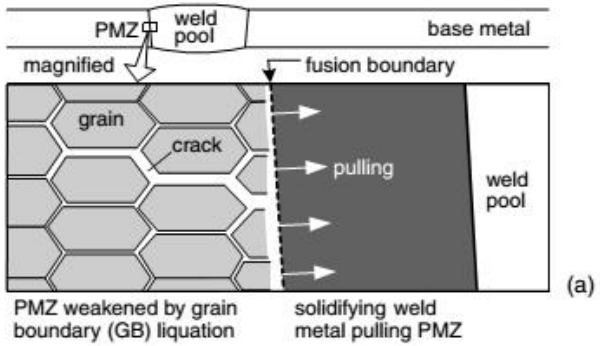
ناهمگنی شیمیایی؟ — **ناهمگنی ساختاری**

α (55% Cu) L (33% Cu)

مهمترین اثرات PMZ

- ترک خوردگی مایع (Liquation Cracking)
- ترک خوردگی انجمادی (Solidification Cracking)
- پارگی لایه ای (Lamellar tearing)
- ترک خوردگی هیدروژنی (Hydrogen Induced Cracking)
- خوردگی گالوانیک (Galvanic Corrosion)
- خوردگی داغ (Hot Corrosion)





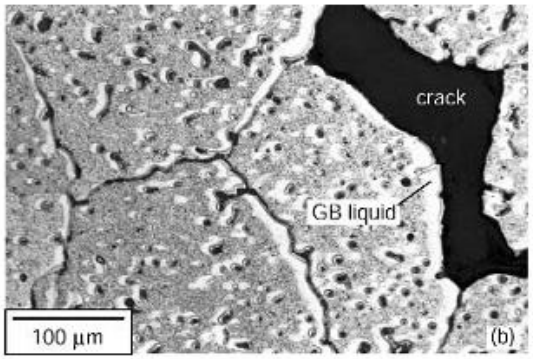


Figure 13.5 Formation of PMZ cracking in a full-penetration aluminum weld: (a) schematic; (b) PMZ cracking in 6061 aluminum. From Huang and Kou (13).

تصویر ۱۳.۵
ترک خوردگی مایع در آلیاژ آلومینیوم Al6061

ناحیه ی ذوب شده ی جزئی
(Partially Melted Zone - PMZ)

تصویر ۱۳.۱

ترک خوردگی مایع در آلیاژ آلومینیوم Al2219

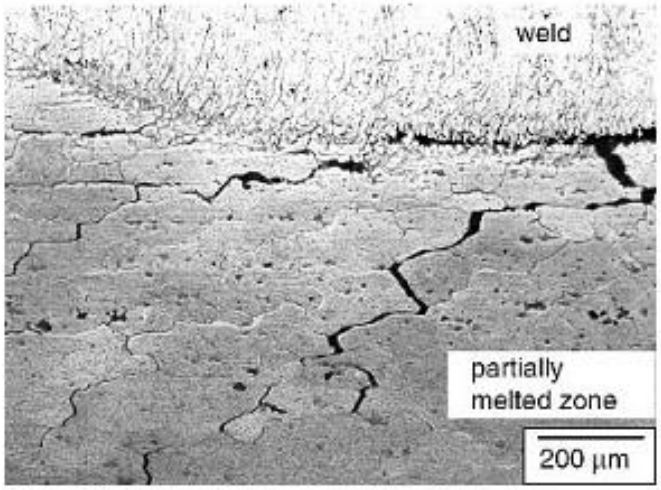


Figure 13.1 PMZ cracking in 2219 aluminum welded with filler metal 1100.

تصویر ۱۳.۹

ترک خوردگی هیدروژنی در آلیاژ فولادی در ناحیه ی PMZ

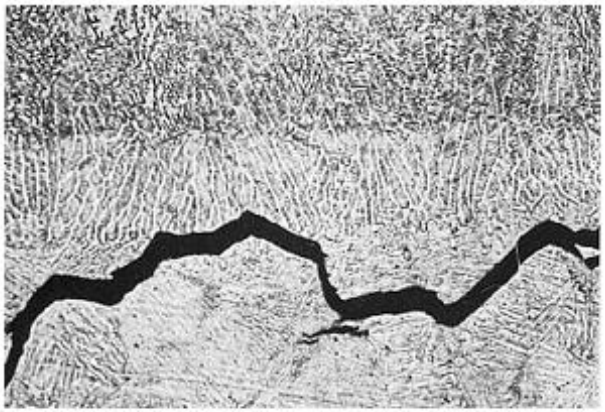


Figure 13.9 Hydrogen-induced cracking in the PMZ of HY-80 steel. Reprinted from Savage et al. (22). Courtesy of American Welding Society.

تصویر ۱۳.۷

پارگی لایه ای در آلومینیوم Al7075

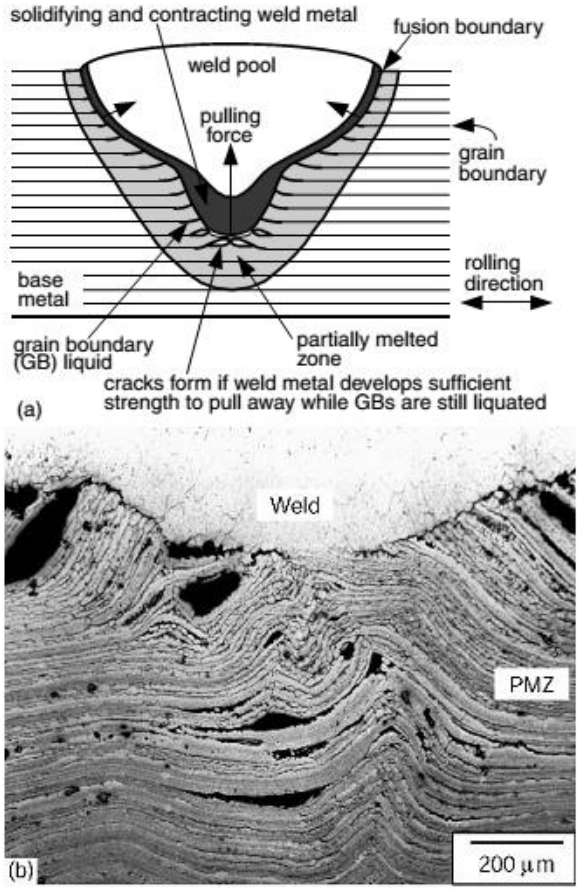


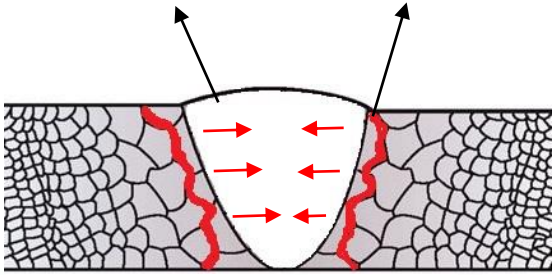
Figure 13.7 Weld metal pulling and tearing PMZ: (a) schematic sketch; (b) 7075 aluminum welded with filler 1100. From Huang and Kou (13).

روش های پیشگیری و اصلاح تشکیل PMZ

the solidus temperatures of the weld metal

the solidus temperatures of the base metal

$T_{WS} > T_{BS}$



انتخاب فیلر متال

چنانچه انتخاب فیلر متال مطابق با معیار روبرو صورت گیرد، هنگامی که فلز جوش منجمد می شود، به دلیل کمتر بودن نقطه ی انجماد فلز پایه، فاز مذاب درون PMZ زود تر جامد می شود و هیچ مذابی در فلز پایه باقی نمانده است. بنابراین، تنش های ناشی از انقباض فلز جوش در حین انجماد، سبب تشکیل ترک نخواهد شد.

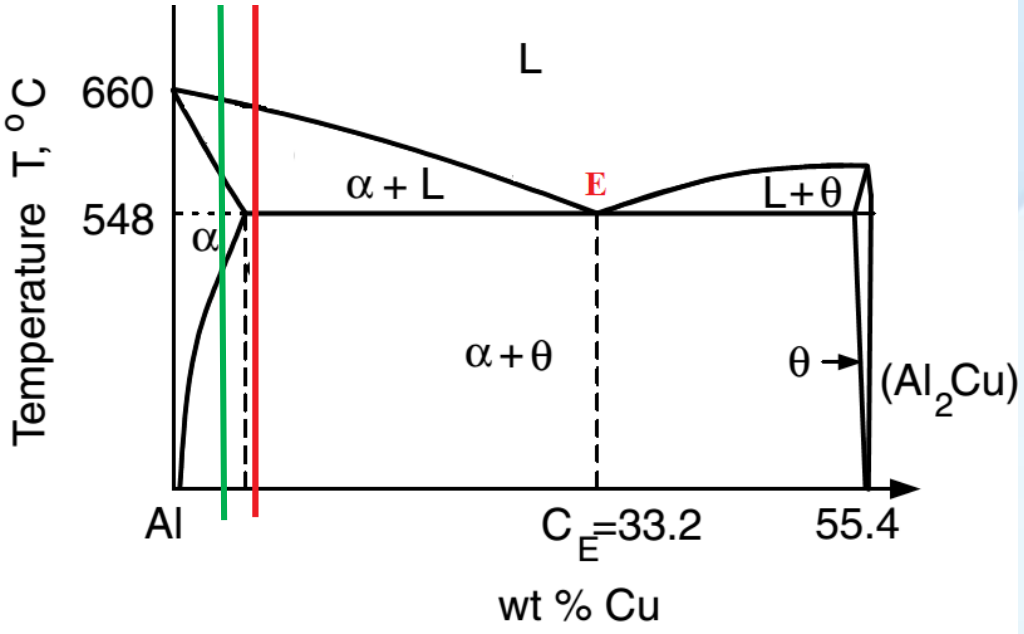
T_{BS} = 548 °C

T_{WS} = 555 °C

کدام یک سریع تر منجمد می شوند؟

هرچه دمای انجماد فلز پایه کمتر از فلز جوش باشد، سریعتر منجمد می شود که این به معنی از بین رفتن مذاب تشکیل شده در PMZ است که سبب ترک خوردگی مایع می شد.

Filler metal Base metal



روش های پیشگیری و اصلاح تشکیل PMZ

فلز پایه

ترکیب شیمیایی ← انتخاب آلیاژ متناسب با معیار TWS > TBS

دانه بندی فلز پایه

کاهش سایز دانه های فلز پایه

↓

کاهش مقدار ذوب در امتداد مرزدانه ها

↓

کاهش حجم PMZ

میزان ناخاصی (عناصر فسفر و گوگرد) ← **کاهش ناخاصی**

کاهش جدایش در مرزها

کاهش حجم PMZ

کاهش احتمال ترک خوردگی انجمادی

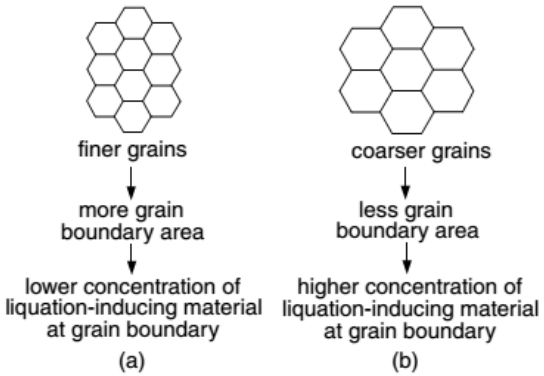


Figure 13.15 Effect of grain size on concentration of liquation-causing material at grain boundaries.

درجه ی مهار

افزایش درجه ی مهار

↓

افزایش تنش های پس ماند

↓

افزایش احتمال ترک خوردگی مایع

منبع حرارت

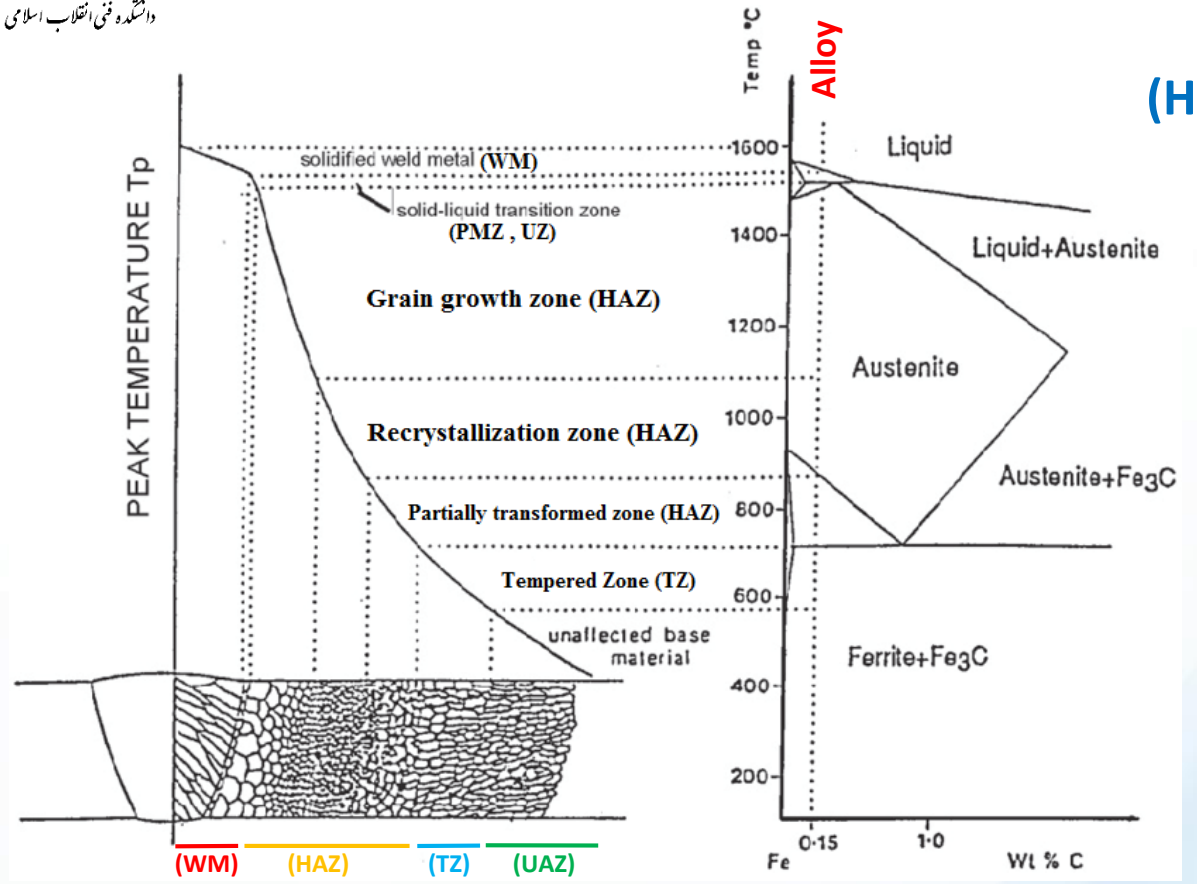
افزایش حرارت ورودی

↓

افزایش احتمال تشکیل و وسعت ناحیه ی PMZ

Temper zone (TZ), Heat affected zone (HAZ)

ناحیه ی متاثر از حرارت
(Heat affected zone - HAZ)



مرور

Heat Affected Zone (HAZ)

عدم ذوب و انجماد

عملیات حرارتی

تغییر ساختار میکروسکوپی/ ماکروسکوپی

عدم تغییر ترکیب شیمیایی

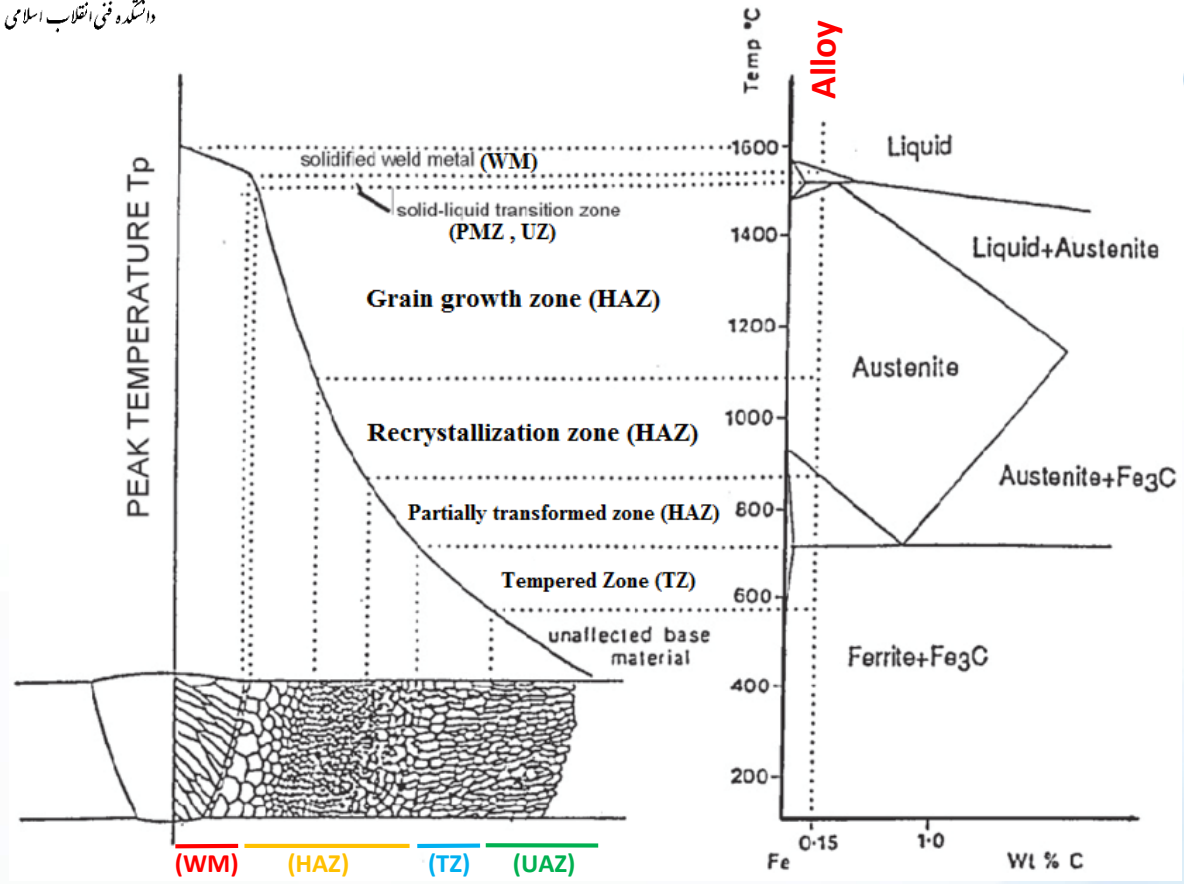
تغییر خواص مکانیکی- شیمیایی - فیزیکی ناشی از تغییرات ساختاری

Phase Transformation – تغییر حالت فازی

Recrystallization - تبلور مجدد

Grain Growth – رشد دانه

ناحیه ی متاثر از حرارت
(Heat affected zone - HAZ)



تغییرحالت فازی
Phase Transformation

در آلیاژ پیش رو در ناحیه ی HAZ چه تغییر حالت هایی داریم؟

$\alpha + L$ — PMZ

$\delta + \gamma$

γ

$\gamma + \alpha$ — HAZ

به دلیل سرعت سرمایش بالا در ناحیه ی HAZ، امکان تشکیل هر یک از این فازها به عنوان فاز نهایی وجود دارد.

هر یک از این فازها خواص مربوط به خود را دارند و بایستی لحاظ گردند.
فاز گاما نرم تر و با استحکام کمتری نسبت به فاز دو گانه ی گاما و آلفا ست.

یادآوری کار مکانیکی

هر عملیات مکانیکی در ماده که سبب تغییر شکل پلاستیک شده باشد.

کار مکانیکی کجا صورت می گیرد؟

- روش ساخت: نورد، اکستروژن
- فرم دهی
- کار مکانیکی به جهت استحکام دهی

تغییر شکل پلاستیک؟

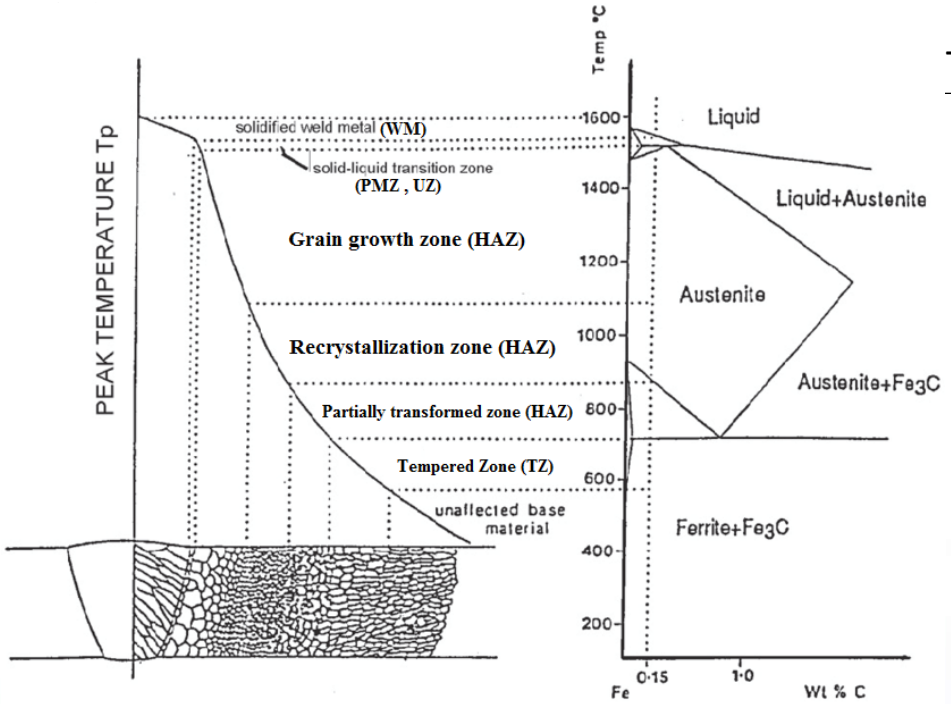
- افزایش دانسیته ی نابجایی ها
- افزایش جاهای خالی
- تشکیل مرزهای ضد فازی

← **افزایش انرژی داخلی ماده**

افزایش انرژی داخلی ماده؟

- افزایش واکنش پذیری شیمیایی: خوردگی، اکسیداسیون
- **افزایش تمایل به تغییرات ساختاری: بازیابی، تبلور مجدد، رشد دانه**
- افزایش تغیرات فازی: جوانه زنی فازهای جدید

کار مکانیکی چه ارتباطی با HAZ دارد؟ روش تولید بسیاری از متریال ها، روش های مکانیکی است. (نورد)



به جهت اینکه بتوانیم تغییرات ساختاری را از ابتدا ارزیابی کنیم، نیاز است ابتدا تغییرات ساختاری در TZ را ارزیابی کنیم.

Temper Zone (TZ)

- تحت گرما قرار می گیرد و عدم ذوب و انجماد
- عدم تغییر ساختار ماکروسکوپی
- تغییر ساختار میکروسکوپی (حذف عیوب کریستالی)
- عدم تغییر ترکیب شیمیایی
- تغییر خواص مکانیکی- شیمیایی - فیزیکی
- ناشی از تغییرات ساختاری میکروسکوپی

تغییرات ساختاری در TZ

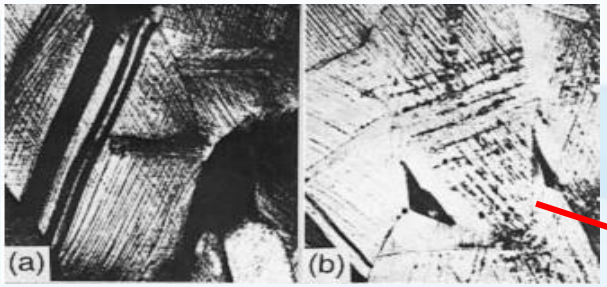
بازیابی (Recovery)

Phenomenon (Reaction)

- Driving Force
- Activation Energy

فرض کنیم جوشکاری را بر روی متریالی انجام داده ایم که روش تولید این آلیاژ، نورد سرد بوده است. (ورق)

به دلیل وجود انرژی داخلی بالا ناشی از حضور نابجایی ها، جاهای خالی، مرزهای ضدفازی و ... (نیروی محرکه)، در اثر حضور حرارت (انرژی فعالسازی) اتم ها و نابجایی ها درون ماده حرکت می کنند و به نوعی باز آرایی جدیدی را انجام می دهند. منظور از بازآرایی، تغییر ساختار کریستالی نیست، بلکه فقط اتم ها ساختار کریستالی قبلی خود را حفظ می کنند در حالیکه کرنش های ناشی از کار مکانیکی را حذف می کنند. در بازیابی، تعداد جای خالی ها و نابجایی ها نیز کاهش میابند. در واقع در این پدیده، حذف تعدادی از جاهای خالی و آرایش اتمی مجدد خالی از کرنش و حرکت دادان نابجایی ها سبب کاهش انرژی درونی ماده می شود.

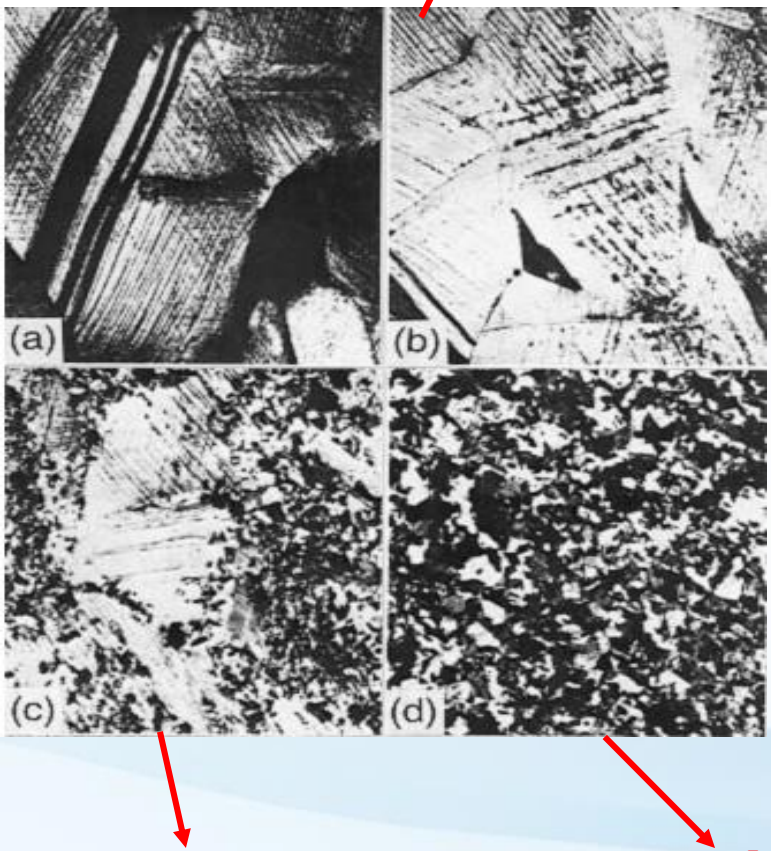


Recovery

این پدیده در دمای بسیار کم رخ می دهد. کمتر از 0.3 Tm فلز پایه

تغییرات ساختاری در HAZ

تبلور مجدد (Recrystallization)



فرض کنیم جوشکاری را بر روی آلیاژی انجام داده ایم که روش تولید این آلیاژ، نورد سرد بوده است. (ورق)

به دلیل وجود انرژی داخلی بالا ناشی از حضور نابجایی ها، جاهای خالی، مرزهای ضدفازی و ... (نیروی محرکه)، در اثر حضور حرارت (انرژی فعالسازی) ناشی از جوشکاری، ماده به جهت کاهش انرژی درونی، دانه بندی خود را از نو انجام می دهد و به نوعی تبلوری جدید بنا می کند.

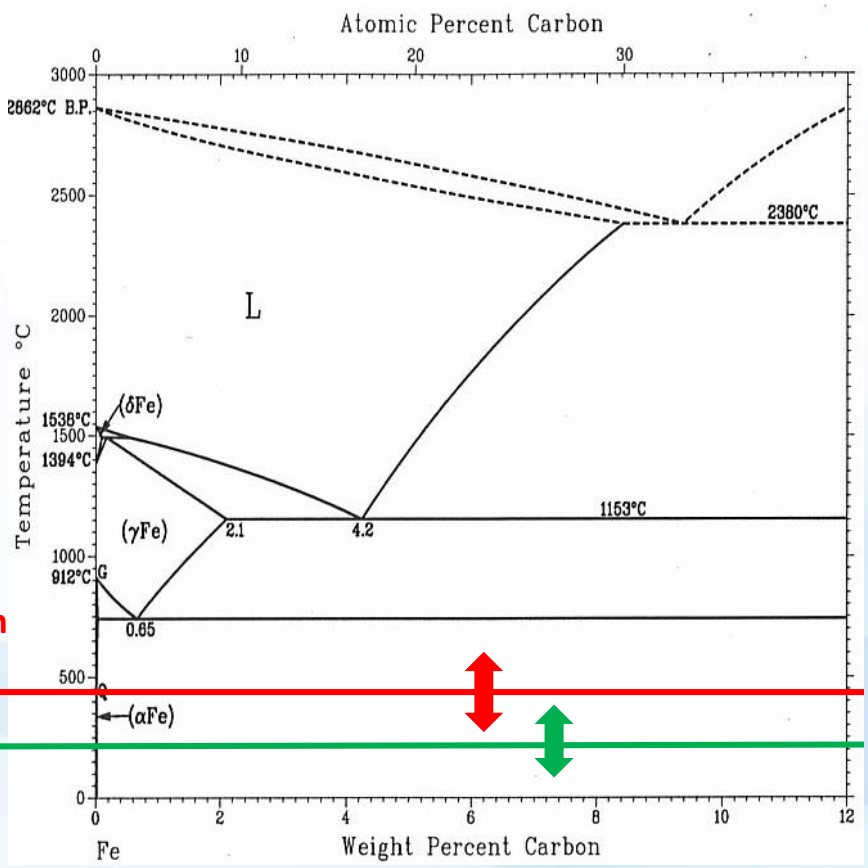
این حالت شبیه به جوانه زنی و انجماد است اما تفاوت د راین جاست که جوانه زنی دانه های جدید در دل دانه های قبلی صورت می گیرد. در واقع این تغییر حالت، یک تغییر حالت جامد است.

جوانه ها در مرزدانه ها و یا مرزهای جدید ناشی از تجمع نابجایی ها در پدیده ی بازیابی رخ می دهدند.

تغییرات ساختاری در HAZ

تبلور مجدد (Recrystallization)

دمای تبلور مجدد، یک دمای سینتیکی است و وابسته به میزان تغییر شکل قبلی است.
هرچه میزان تغییر شکل قبلی بیشتر باشد، دمای تبلور مجدد کاهش می یابد. (همینطور برای بازیابی)



Rx Temperature = 0.3 – 0.5 Tm

TABLE 14.1 Recrystallization Temperatures for Various Metals

Metal	Minimum Recrystallization Temperature (°C)	Melting Temperature (°C)
Aluminum	150	660
Magnesium	200	659
Copper	200	1083
Iron	450	1530
Nickel	600	1452
Molybdenum	900	2617
Tantalum	1000	3000

تغییرات ساختاری در HAZ

تبلور مجدد (Recrystallization)

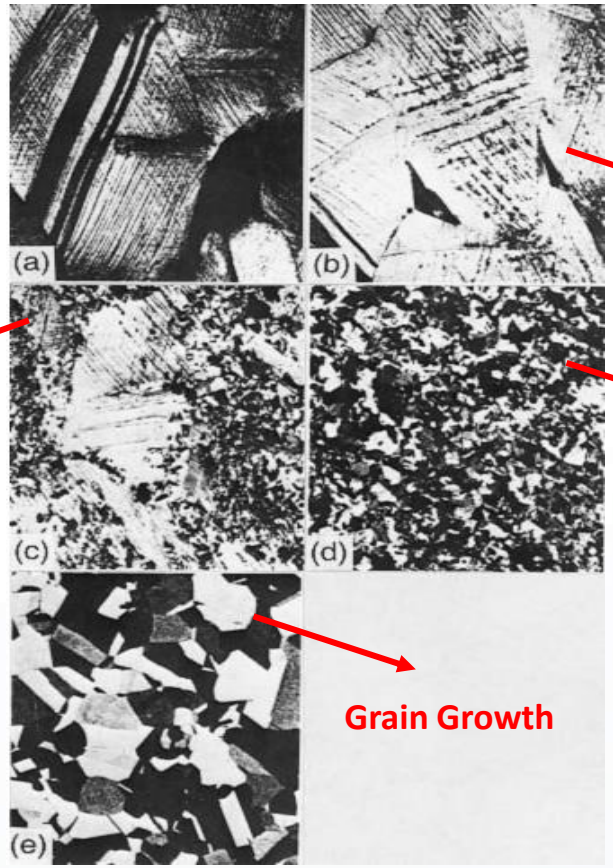


Figure 14.2 Deformation and recrystallization structures of α-brass: (*a*) 33% cold reduction; (*b*) short anneal at 580°C; (*c*) longer anneal; (*d*) completely recrystallized; (*e*) grain growth. From Burke (3).

تصویر ۱۳.۷

تغییرات ساختاری در آلیاژ برنجی تحت
33% - Cold reduction

مقدار و سرعت تبلور مجدد وابسته به میزان کار سرد است.
هرچه کار سرد بیشتر، میزان و سرعت تبلور مجدد بیشتر می گردد.

تبلور مجدد بخش کوچکی از اتفاقات در HAZ است و پیش در آمدی برای رشد دانه است.

تغییرات ساختاری در HAZ

Phenomenon (Reaction) { Driving Force / Activation Energy

رشد دانه (Grain Growth)

رشد دانه در حضور دمای نسبتا بالا (انرژی اکتیواسیون) و به دلیل کاهش انرژی داخلی ماده ناشی از حضور مرزها ست (نیروی محرکه) صورت می گیرد.

رشد دانه مستقل از کار مکانیکی قبلی است و در همه ی مواد رخ می دهد و به همین دلیل است که مهمترین تغییرات ساختاری ناحیه ی HAZ شناخته می شود.

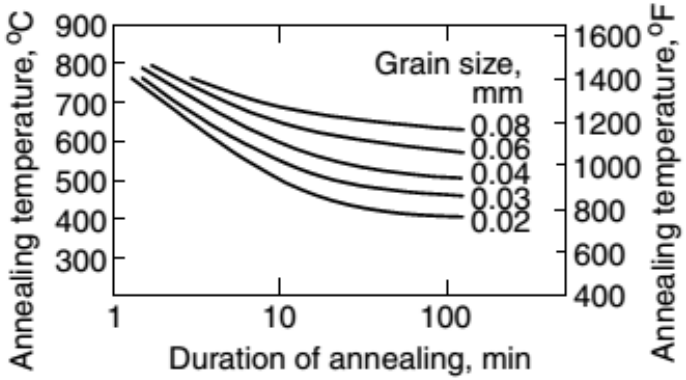


Figure 14.5 Grain growth of Cu–35Zn brass cold rolled to 63% reduction in area. Reprinted from *Metals Handbook* (5).

تصویر ۱۴.۵
تاثیر دمای آنیل و زمان آنیل بر روی رشد دانه

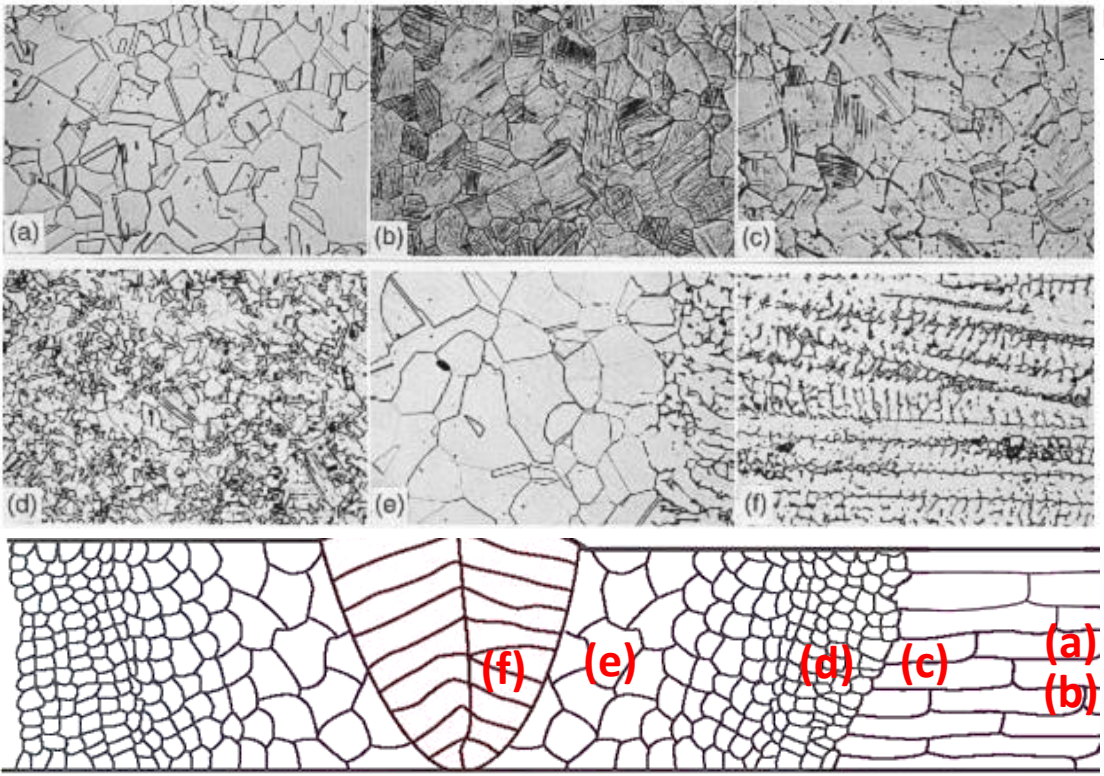
هرچه دمای آنیل افزایش یابد، میزان رشد دانه ها افزایش می یابد. ← کاهش حرارت ورودی (کاهش رش دانه در (HAZ))

هرچه دمای آنیل افزایش یابد، سرعت رشد دانه ها افزایش می یابد. ← افزایش سرعت جوشکاری (کاهش رش دانه در (HAZ))

M. Imani (Moein.imani91@gmail.com)

تغییرات ساختاری در HAZ

رشد دانه (Grain Growth)



تصویر ۱۴.۶

تغییرات ساختاری در جوش فولاد 304 کار سختی شده

- Base metal before work hardening **(a)**
- Base metal after work hardening **(b)**
- Recovery **(c)**
- **Recrystallization (d)**
- **Grain Growth (e)**
- **Fusion zone (f)**

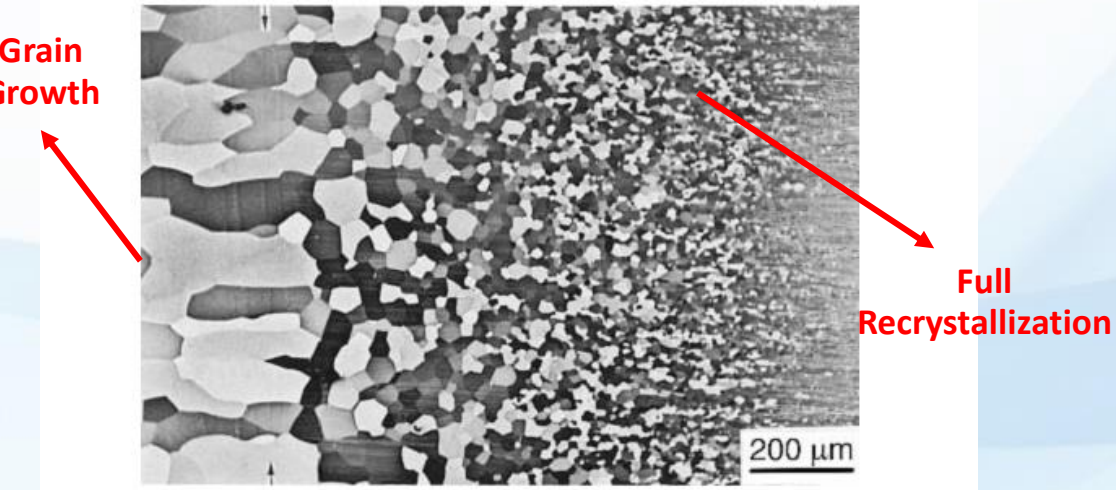


Figure 14.7 Grain growth in electron beam weld of molybdenum, arrows indicating fusion boundary. Reprinted from Wadsworth et al. (9). Copyright 1983 with permission from Elsevier Science.

تصویر ۱۴.۷

رشد دانه در جوش LBW در آلیاژ مولیبیدن

تغییرات ساختاری در HAZ

تاثیر این پدیده ها بر روی خواص

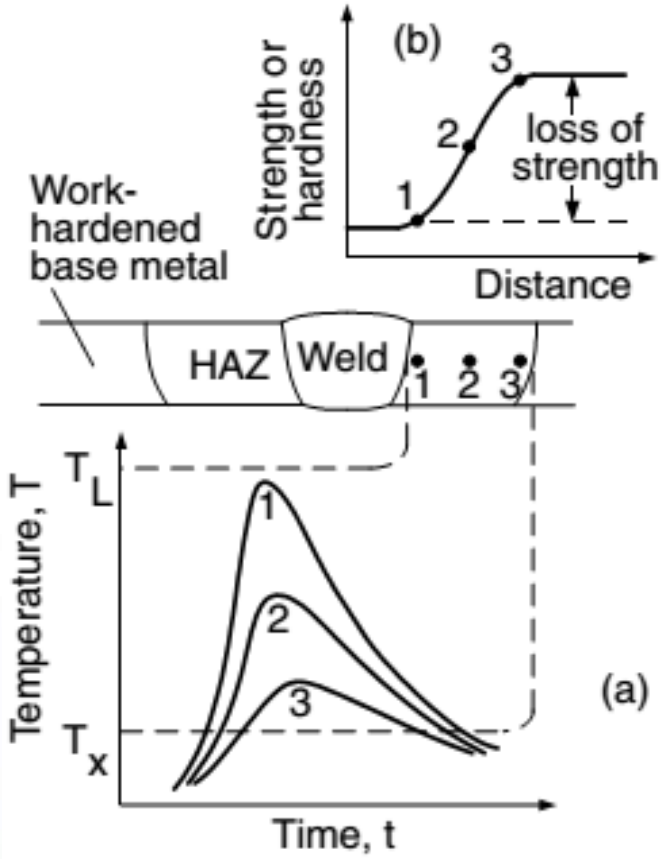


Figure 14.8 Softening of work-hardened material caused by welding: (*a*) thermal cycles; (*b*) strength or hardness profile.

تصویر ۱۴.۸

شماتیکی از یک ماده ی تحت کار مکانیکی قرار گرفته

نواحی (3) , (2) ,(1) همگی در ناحیه ی HAZ هستند اما به دلیل فاصله ای که از منبع حرارت دارند سیکل های گرمایشی متفاوتی را طی می کنند.

ناحیه (1): نزدیک به فلز جوش است و به دلیل حرارت بالا، هم تبلور مجدد و هم رشد دانه در آن رخ می دهد.

ناحیه (2): نسبت به فلز جوش دورتر است و تبلور مجدد و رشد دانه ی کمتری رخ می دهد.

ناحیه (3): دورترین ناحیه از مرکز جوش است و تبلور مجدد کم و یا بازیابی در آن رخ می دهد.

رشد دانه: کاهش استحکام و سختی

تبلور مجدد: کاهش استحکام نسبت به فلز پایه ی کار سرد شده اما استحکام بیشتر از ناحیه ی رشد دانه یافته

بازیابی: عدم تغییر در خواص مکانیکی/ تغییر در خواص فیزیکی

ناحیه ی متاثر از حرارت
(Heat affected zone - HAZ)

مروری بر عوامل موثر بر کنترل HAZ:

۱- روش جوشکاری

هرچه حرارت ورودی متمرکز تر باشد، حجم HAZ کمتر خواهد شد.

EBW > LBW > PAW > GTAW > GMAW > SMAW > SAW > OAW > RW

MORE LOW

۲- جنس فلز پایه

هرچه ضریب انتقال حرارت ماده بیشتر باشد، وسعت HAZ بیشتر خواهد بود.

Ag / Ag-alloy > Cu / Cu-alloy > Au / Au-alloy > Al / Al-alloy > Fe / Fe-alloy

MORE LOW

ناحیه ی متاثر از حرارت
(Heat affected zone - HAZ)

مروری بر عوامل موثر برکنترل HAZ:

۳- سرعت جوشکاری

افزایش سرعت جوشکاری ← حرارت و انتقال حرارت کمتر ← کاهش وسعت HAZ

۴- تعداد پاس

افزایش تعداد پاس ← حرارت ورودی کمتر ← کاهش وسعت HAZ

۵- طرح اتصال

افزایش پیچیدگی طرح اتصال ← افزایش تعدادTSN ← کاهش وسعت HAZ

جلسه آینده : کوییز از مبحث ریزساختارهای جوش
(Slide 44-97)

Residual stresses and distortion in welding

تنش های پس ماند (Residual Stresses)

مقدمه:

با شروع استفاده از جوشکاری قوسی در جنگ جهانی اول، پس از مدتی مشخص شد که جوشکاری روی سازه ها، سبب یک سری تنش هایی می شوذ که از دید طراحان و مهندسان پنهان است.
این تنش ها به راحتی سبب تخریب های فاجعه انگیزی مثل شکست و خوردگی شدید می شد، علیرغم اینکه مهندسان قادر به فهم و پیش بینی این تخریب ها نمی شدند. بنابرین به این تنش های تنش های پس ماند یا تنش های باقی مانده می گویند.
بنابراین، تحقیقات وسیعی صورت گرفت تا تنش پس ماند معرفی شد.

هدف بحث:

- ✓ چگونگی تشکیل تنش پسماند؟
- ✓ چگونگی تشکیل تنش پسماند در جوش؟
- ✓ اثرات تنش پس ماند؟
- ✓ راه های کاهش تنش پس ماند؟

تعریف تنش پس ماند؟

تنش های پس ماند، تنش هایی هستند که در داخل قطعه پس از اینکه بارگذاری خارجی برداشته می شود، به شکل قفل شده و خود تعادلی باقی می مانند.

مفهوم خود تعادلی
Self- equilibrium

م نیروها و ممان های ناشی از تنش های پس ماند در جسم به تعادل خواهد رسید (مجموع نیروها برابر با صفر است).

تنش های پس ماند (Residual Stresses)

تنش های پس ماند از کجا می آید؟

Residual Stress

- **Producing process** → Rolling, Extrusion, Casting
- **Joining Process** → Welding
  - **Solid-state process:** FSW, FW …
  - **Fusion-state process:** SMAW, GTAW, GMAW …
- **Assembling Process**

تنش پس ماند از نظر گستردگی

تنش های پس ماند میکروسکوپی ← **در اثر انواع عیوب متالورژیکی**

جای خالی، جابجایی اتم ها در شبکه، نابجایی ها، مرزدانه ها و...

تنش پس ماند میکروسکوپی به صورت همگن است و در کل ماده (قطعه) پخش می شود.

تنش های پس ماند ماکروسکوپی ← **گروهی از دانه ها و یا بخشی از قطعه**

تنش پس ماند ماکروسکوپی به صورت غیر همگن است و فقط ممکن است در بخشی از ماده به شکل موضعی وجود داشته باشد.

خطرناک!

تنش های پس ماند ناشی از جوش از کدام نوع تنش پس ماند است؟

تنش های پس ماند (Residual Stresses)

منابع ایجاد تشکیل تنش های پس ماند

منابع مکانیکی

- حضور بارگذاری مکانیکی
- تغییر شکل پلاستیک های دما پایین: نورد، کشش، اکستروژن، خمش، فورج، ساچمه زنی
- تشکیل تنش های پس ماند ماکروسکوپی (غالبا)

منابع حرارتی

- گرم و سرد کردن غیر یکنواخت
  - عملیات حرارتی، جوشکاری های ذوبی(... SMAW, GTAW, GMAW)
- تشکیل تنش های پس ماند ماکروسکوپی (غالبا)

منابع متالورژیکی

- تغییر ساختار کریستالی، تغییر فاز، آلیاژسازی (محلول های جامد) ...
  - محلول جامد بین نشینی و جانشینی، فاز مارتنزیت
- تشکیل تنش های پس ماند میکروسکوپی (غالبا)

منابع تشکیل تنش پس ماند می تواند یکی از این موارد و یا ترکیبی از این موارد باشد.
مثل تغییر شکل پلاستیم دما بالا: نورد گرم و ...، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی(FSW) که ناشی از منابع مکانیکی و حرارتی است.

تنش های پس ماند (Residual Stresses)

$\sigma_{(T,M,M)}$

فرض کنیم در ماده ای تنش های درونی بوجود آمد است.
(مستقل از فرایند و منابع)

I- $\sigma_{(T,M,M)} > \sigma_{(UTS)}$ ➡ FRACTUER

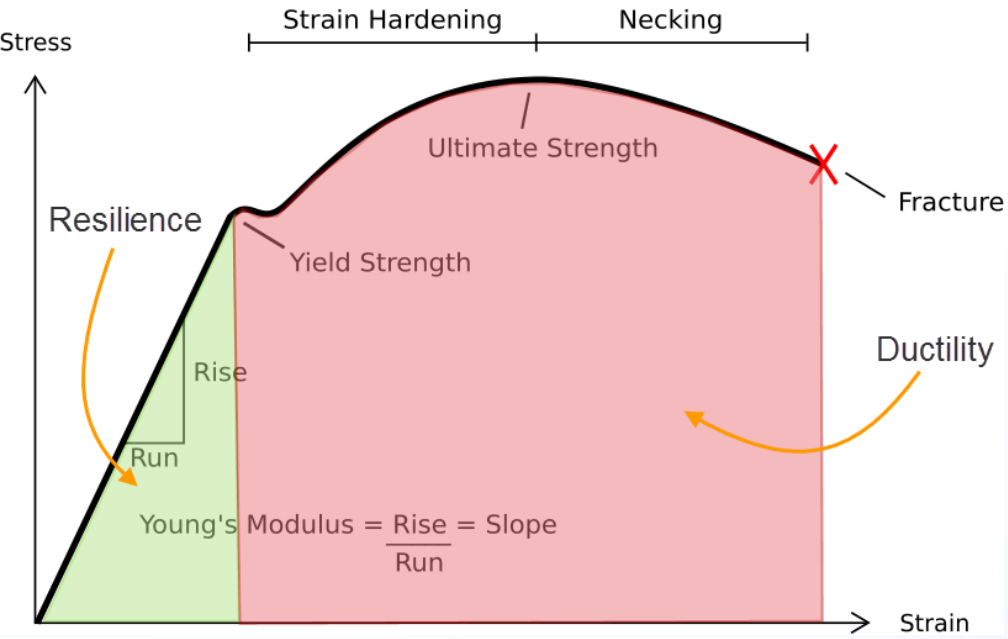
II- $\sigma_{(YS)} < \sigma_{(T,M,M)} < \sigma_{(UTS)}$ ➡ DISTORTION

III- $\sigma_{(T,M,M)} < \sigma_{(YS)}$ ➡ NOTHING
RESIDUAL STRESS

کدام حالت خطرناک تر است؟ حالت سوم به دلیل اینکه قابل پیش بینی نیست (رو بازی نمی کند) از بقیه ی حالت ها خطرناک تر است.

یادآوری

تاثیر دما بر مشخصه های رفتار مکانیکی



مدول الاستیسیته
E

تنش تسلیم
σy

تنش نهایی
σUTS

تنش شکست
σF

چقرمگی
Toughness

انعطاف پذیری
Ductility

با افزایش دما

به عنوان مثال: در فولادها، تنش تسلیم در دمای ۶۰۰ درجه ی سانتیگراد، ۷۵-۹۰٪ کاهش می یابد.

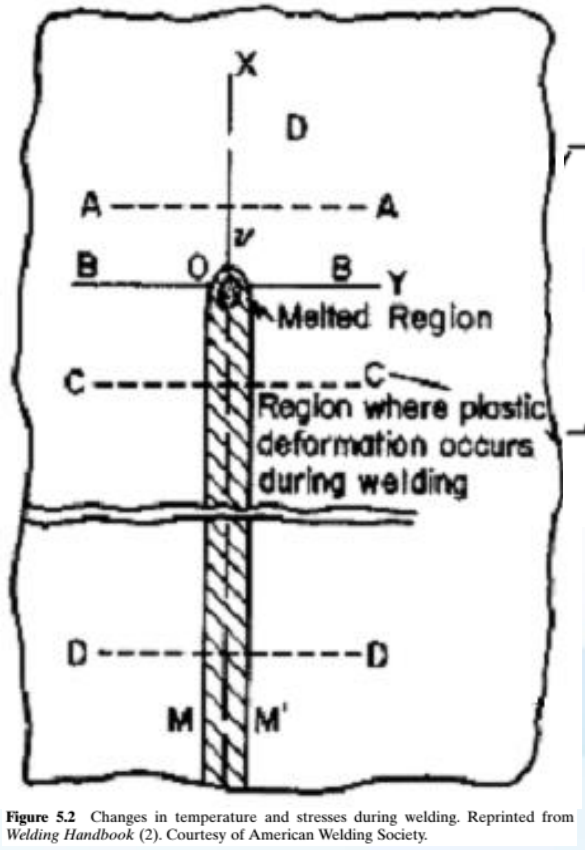
σ_y (25° C) = 300 MPa

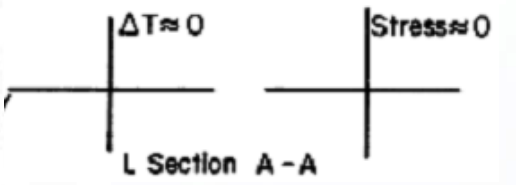
σ_y (600° C) = 30 - 70 MPa

اعوجاج و تنش های پس ماند در جوش
(Distortion and Residual Stresses In weldment)

منابع ایجاد اعوجاج و تنش پس ماند در جوش های ذوبی، تنش های حرارتی ناشی از سیکل های گرمایشی و سرمایشی است و سبب تشکیل تنش های پس ماند ماکروسکوپی می گردد..

مکانیزم ایجاد اعوجاج و تنش های پس ماند و تعیین نوع تنش





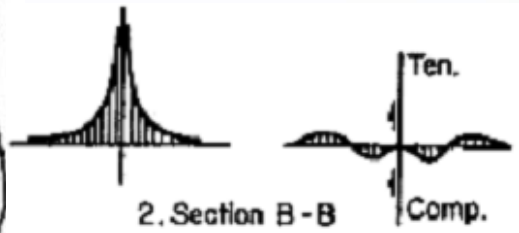


Figure 5.2 Changes in temperature and stresses during welding. Reprinted from *Welding Handbook* (2). Courtesy of American Welding Society.

تصویر ۵.۲ – اعوجاج و تنش پس ماند

A-A

ناحیه ی دور از جوش

تغییرات حرارتی (شیب حرارتی) تقریبا صفر

تغییرات تنش تقریبا صفر

ناحیه مذاب (Melted Region)

شیب حرارتی بسیار زیاد

فلز جوش مذاب تمایل به انبساط دارد (تنش کششی) اما با محیط (قطعه) روبرو می شود که جامد است و از انبساط فلز جوش جلوگیری می کند (با اعمال تنش فشاری).

B-B

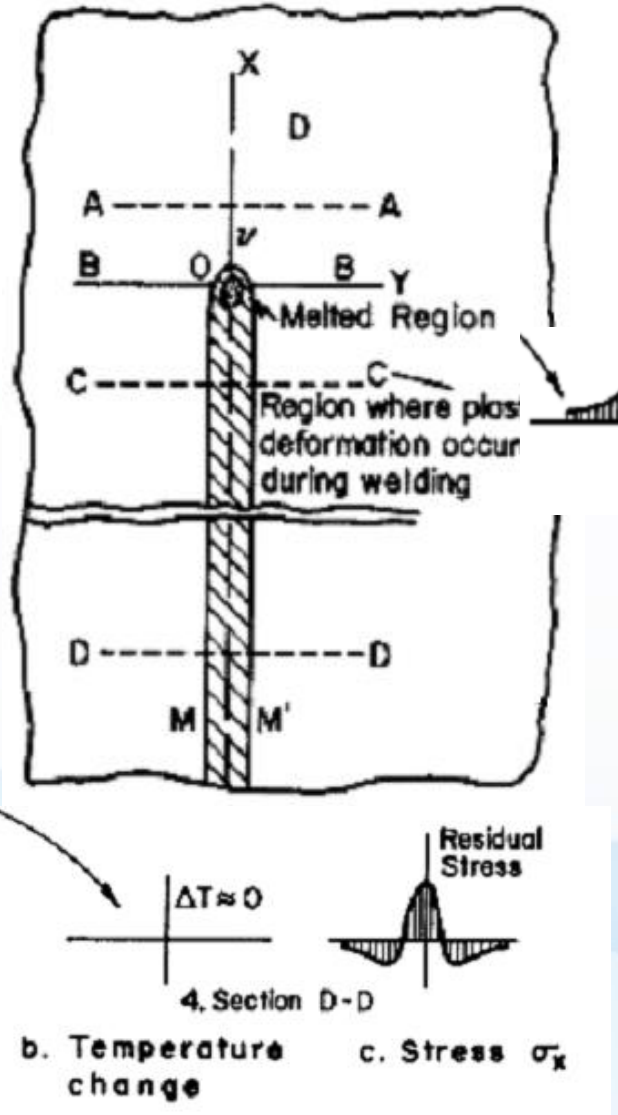
چرا تنش در مرکز جوش صفر است؟

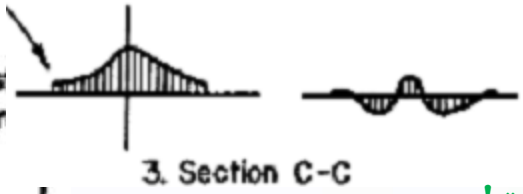
چون مذاب است و مذاب قابلیت ذخیره تنش ندارد.

تنش های کششی اطراف چرا بوجود آمده است؟

به دلیل خود تعادلی (حفظ یکنواختی ماده)

اعوجاج و تنش های پس ماند در جوش
(Distortion and Residual Stresses In weldment)





فلز جوش منجمد شده است و تمایل به انقباض (تنش فشاری) دارد. اما فلز اطراف تنش کششی وارد می کند تا انقباض رخ ندهد.

به دلیل بالا بودن دما، تنش تسلیم کاهش یافته است و بنابراین در اثر تنش کششی، تغییر شکل پلاستیک رخ می دهد. (Distortion)

Region where plastic deformation occurs during welding

C-C

اعوجاج در این منطقه رخ می دهد.

تنش های فشاری اطراف؟

به دلیل خود تعادلی (حفظ یکنواختی ماده)

زمان پیشگیری از وقوع اعوجاج همین جاست!

دما بسیار پایین است و تغییرات شیب حرارتی تقریبا صفر است.

فلز جوش می خواهد منقبض گردد اما به دلیل حضور محیط نمی تواند منقبض گردد، و چون دما پایین است تغییر شکلی رخ نمی دهد.

D-D

دما بسیار پایین است و به دلیل استحکام بالای ماده، اعوجاجی رخ نمی دهد. پس همه ی تنش ناشی از عدم انقباض به تنش پس ماند کششی در مرکز جوش و تنش فشاری در اطراف جوش بوجود می آید.

بیشترین تنش پس ماند کششی و فشاری در این ناحیه رخ می دهد.

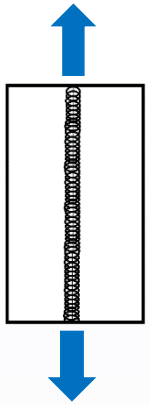
تنش پس ماند در این ناحیه رخ می دهد.

زمان پیشگیری و کاهش تنش پس ماند همین جاست!

اعوجاج و تنش های پس ماند در جوش
(Distortion and Residual Stresses In weldment)

سوال ۱

چنان چه جوش کاری ذوبی انجام داده باشیم و مطابق با حالتی که بررسی کردیم تنش پس ماند در قطعه بوجود بیاید، تحت بارگذاری کششی و فشاری قرار گیرد به ترتیب چه اتفاقاتی رخ می دهد؟



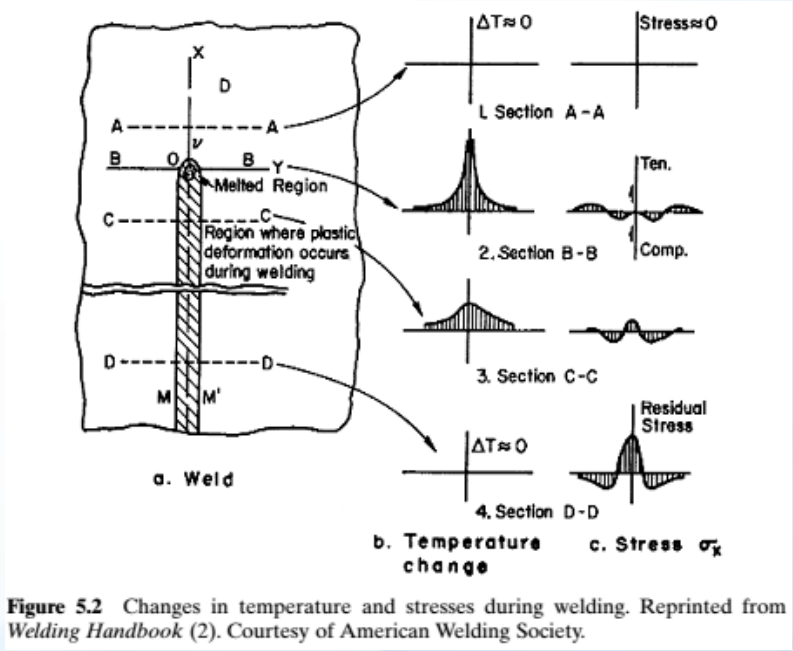
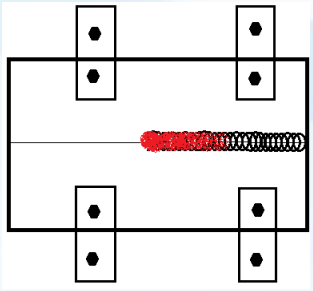


Figure 5.2 Changes in temperature and stresses during welding. Reprinted from *Welding Handbook* (2). Courtesy of American Welding Society.

سوال ۲

چنان چه قطعه تحت جوشکاری را با قید و بند از دو طرف مهار کنیم، چه اتفاقی برای تنش پس ماند رخ می دهد؟



اعوجاج و تنش های پس ماند در جوش
(Distortion and Residual Stresses In weldment)

آیا تنش پس ماند فقط در راستای طولی رخ می دهد؟

تنش پسماند در سه بعد رخ می دهد.

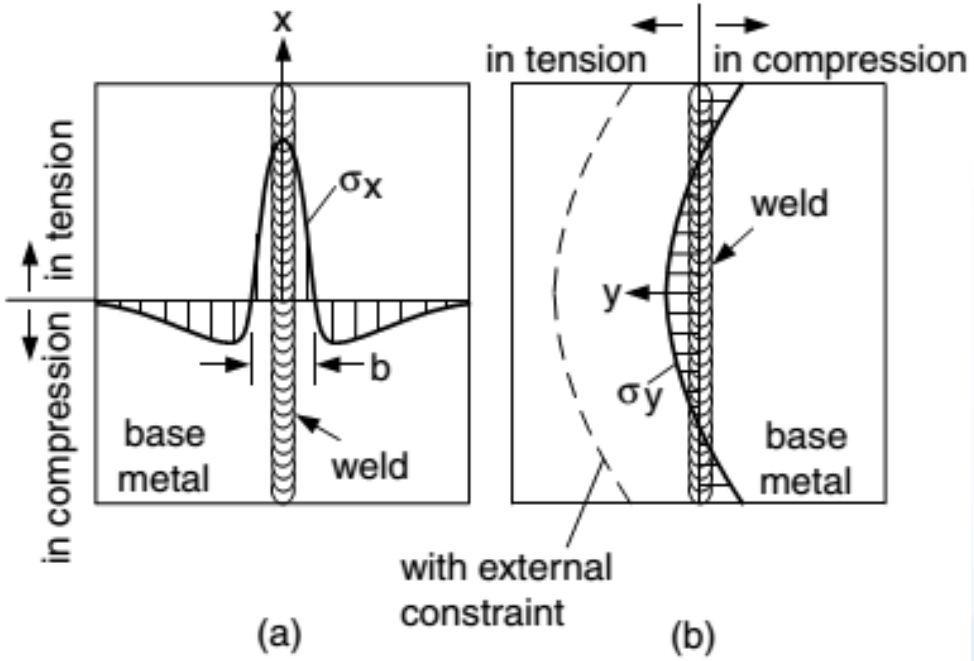


Figure 5.3 Typical distributions of longitudinal (σ_x) and transverse (σ_y) residual stresses in butt weld. Modified from *Welding Handbook* (2).

شکل ۵.۳

توزیع تنش های پس ماند طولی و عرضی (به دلیل کم بودن ضخامت از تنش های در راستای Z صرف نظر شده است اما اگر قطعه ضخیم باشد، در راستای ضخانت هم تنش پس ماند خواهیم داشت.

شکل (b)، مهار جوش از سمت چپ صورت گرفته و به همین دلیل تنش پس ماند عرضی و کششی رخ داده است. (منحنی خط چین مربوط به استفاده از قید و بست است).

دلیل خطرناکی تنش پس ماند به دلیل سه بعدی بودن آن است. این به این معنی است که در همه جا و در هر جهتی تنشیدر ماده نهفته است و اگر از هر طرف به آن نیرو وارد شود، احتمال شکست وجود دارد. به علاوه اینکه به دلیل قانون خود تعادلی، در اطراف جوش هم تنش پس ماند وجود دارد.

اعوجاج و تنش های پس ماند در جوش
(Distortion and Residual Stresses In weldment)

اثرات متالورژیکی حضور تنش های پس ماند:

ساختار متالورژیکی و تنش های پس ماند به شکل متقابل روی یکدیگر اثر دارند.

اثرات متالورژیکی تنش پسماند

اثرات مفید!

ایجاد تنش های فشاری در سطح توسط ... , shot pinning

اثرات مخرب

- **ترک هیدروژنی (HIC)**
- **پارگی لایه ای (Lamellar tearing)**
- **ترک بازگرمی (Reheat cracking)**
- **تسریع پدیده ی خستگی در اثر حضور تنش های پس ماند کششی (Fatigue fracture)**
- **تسهیل خوردگی SCC در محیط های خورنده (Stress-corrosion cracking)**
- **تسهیل خستگی خوردگی در محیط های خورنده (Corrosion fatigue phenomenon)**

اعوجاج و تنش های پس ماند در جوش
(Distortion and Residual Stresses In weldment)

پارامترهای موثر در توزیع و مقدار تنش پس ماند در جوشکاری:

۱- اثر ابعادی قطعه جوشکاری

ابعاد بزرگتر

↓

اختلاف دمایی بزرگتر

- افزایش مقدار اعوجاج
- افزایش مقدار و توزیع تنش پس ماند

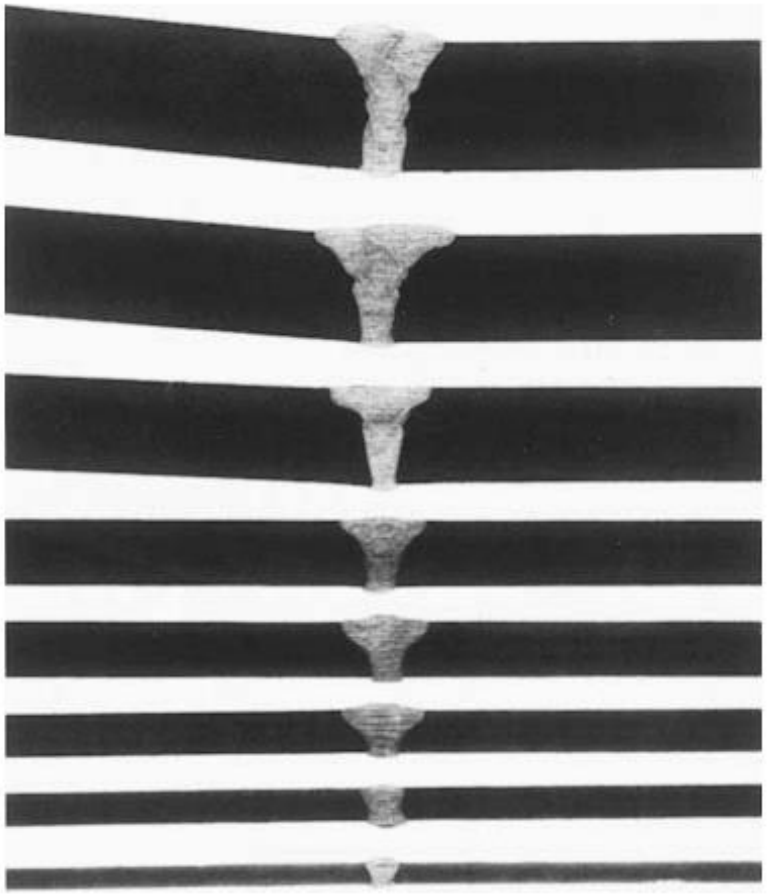


Figure 5.7 Distortion in butt welds of 5083 aluminum with thicknesses of 6.4–38 mm. Reprinted from Gibbs (6). Courtesy of American Welding Society.

شکل ۵.۷

اعوجاج در جوش Al-5083 در ضخامت های متفاوت

اعوجاج و تنش های پس ماند در جوش
(Distortion and Residual Stresses In weldment)

پارامترهای موثر در توزیع و مقدار تنش پس ماند در جوشکاری:

۲- قید و بند (درجه ی مهار)

افزایش درجه ی مهار ← عدم کرنش یا اعوجاج ← افزایش تنش های پس ماند

مهار لزوما قید و بند نیست، پیچیدگی یا بزرگی قطعه می تواند در نقش قید بند باشد.

۳- انرژی جوش

افزایش انرژی جوش ← افزایش تمایل به انبساط ← افزایش تنش های پس ماند کششی

۴- جنس ماده

- مدول الاستیسیته ← افزایش مدول الاستیسیته ← کاهش اعوجاج و افزایش تنش پس ماند
- تنش تسلیم ← افزایش تنش تسلیم ← کاهش اعوجاج و افزایش تنش پس ماند
- ضریب انبساط حرارتی
- هدایت حرارتی
- ظرفیت گرمایی ویژه

به شکل پیچیده ای تاثیر گذارند و به شکل جداگانه نمی توان آن ها را تحلیل کرد.

اعوجاج و تنش های پس ماند در جوش
(Distortion and Residual Stresses In weldment)

روش های کاهش تنش پس ماند و اعوجاج

روش ها یا به صورت پیش گیری هستند یا به صورت درمانی!

- **روش های پیش گیری**
  - **روش های مبتنی بر طراحی (مکانیکی)**
  - **روش های متالورژیکی**
- **روش های درمانی** ← **روش های متالورژیکی**

روش پیش گیری متالورژیکی

از روابط خواص مکانیکی (در ناحیه الاستیک) و فیزیک حرارت

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \rightarrow \varepsilon = \frac{L_o \gamma \Delta T}{L_o} \qquad \varepsilon = \gamma \Delta T \qquad \sigma = E\gamma\Delta T$$

$$\Delta L = L_o \gamma \Delta T$$

$$\Delta T = (Tw - To)$$

σ: تنش
ε: کرنش
γ: ضریب انبساط حرارتی طولی

بنابراین چنانچه To را افزایش دهیم، تنش پس ماند کم خواهد شد. (پیش گرم)

اعوجاج و تنش های پس ماند در جوش
(Distortion and Residual Stresses In weldment)

روش های پیش گیری متالورژیکی

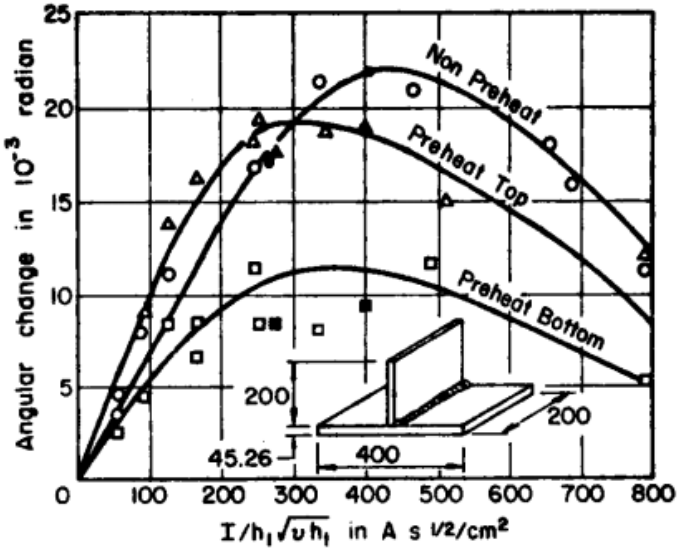
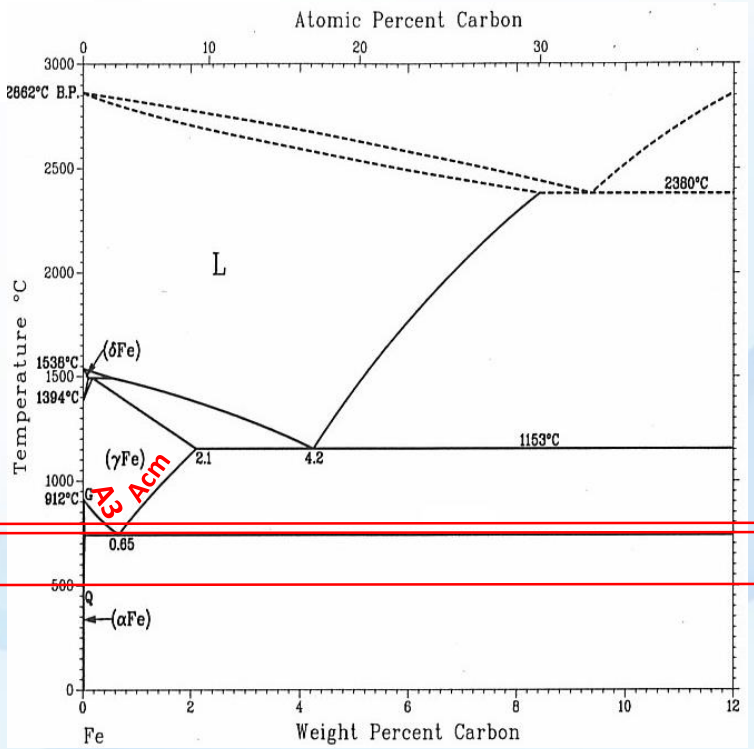


Figure 5.11 Methods for controlling weld distortion:

شکل ۵.۱۱

کاهش اعوجاج در اثر عملیات پیش گرم



رنج دمایی چقدر است؟

رنج دمایی پیش گرم در فولادها، زیر خط A1 است.

اعوجاج و تنش های پس ماند در جوش
(Distortion and Residual Stresses In weldment)

روش های پیش گیری مبتنی بر طراحی (مکانیکی)

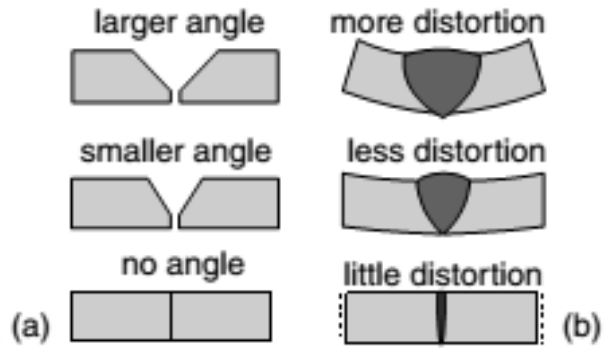


Figure 5.8 Reducing angular distortion by reducing volume of weld metal and by using single-pass deep-penetration welding. Modified from TWI (7).

۱- طرح اتصال

هرچه حجم جوش کمتر ← تنش پس ماند و اعوجاج کمتر

جوش های LBW و EBW به همین دلیل کمترین میزان اعوجام و تنش پس ماند را دارند.

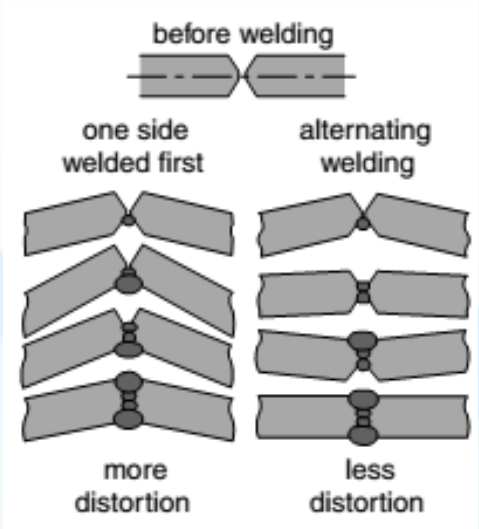


Figure 5.9 Reducing angular distortion by using double-V joint and welding alternately on either side of joint. Modified from TWI (7).

۲- ایجاد بالانس حرارتی

در ضخامت های بالاتر از 16 mm از پخ دو طرفه V و U شکل استفاده می شود.

جوشکاری به شکل یک در میان از طرفین یا به صورت همزمان انجام می شود.

اعوجاج و تنش های پس ماند در جوش
(Distortion and Residual Stresses In weldment)

روش های پیش گیری مبتنی بر طراحی (مکانیکی)

۳- انقباض مجاز (Shrinkage allowance)

قبل از جوشکاری، خودمانیک انقباض ایجاد می کنیم تا بعد از جوشکاری قطعه صاف شود! (تجربی – محاسباتی)

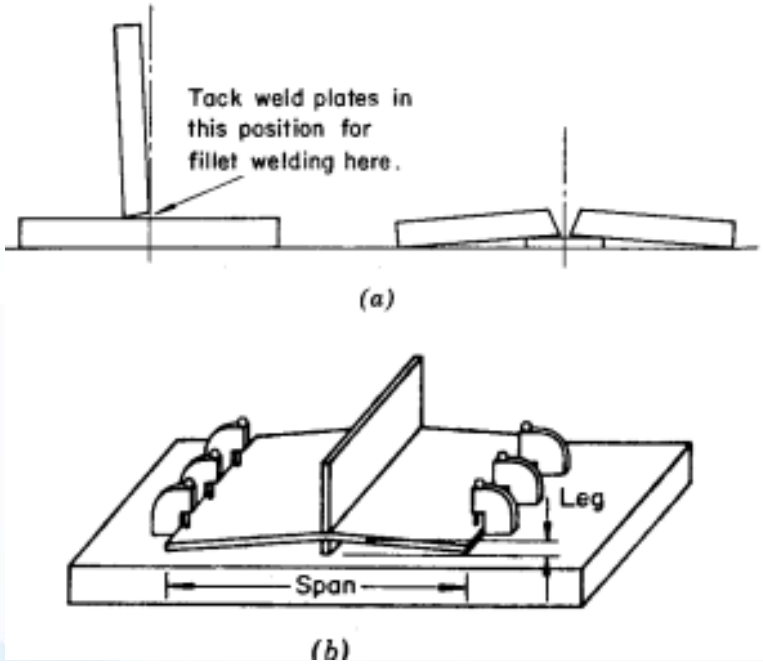


Figure 5.11 Methods for controlling weld distortion: (*a*) presetting; (*b*) prespringing

اعوجاج و تنش های پس ماند در جوش
(Distortion and Residual Stresses In weldment)

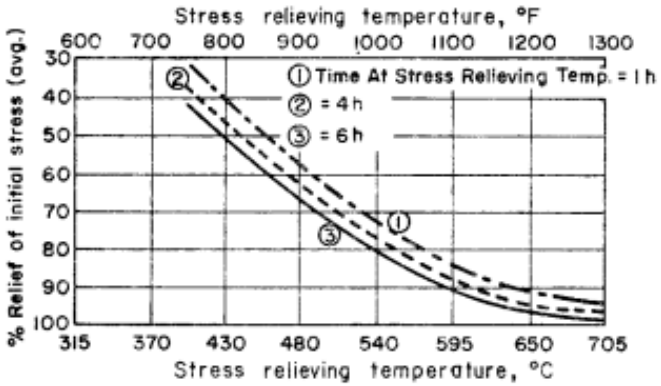


Figure 5.5 Effect of temperature and time on stress relief of steel welds. Reprinted from *Welding Handbook* (2). Courtesy of American Welding Society.

TABLE 5.1 Typical Thermal Treatments for Stress Relieving Weldments

Material	Soaking Temperature (°C)
Carbon steel	595–680
Carbon–½% Mo steel	595–720
½% Cr–½% Mo steel	595–720
1% Cr–½% Mo steel	620–730
1¼% Cr–½% Mo steel	705–760
2% Cr–½% Mo steel	705–760
2¼% Cr–1% Mo steel	705–770
5% Cr–½% Mo (Type 502) steel	705–770
7% Cr–½% Mo steel	705–760
9% Cr–1% Mo steel	705–760
12% Cr (Type 410) steel	760–815
16% Cr (Type 430) steel	760–815
1¼% Mn–½% Mo steel	605–680
Low-alloy Cr–Ni–Mo steels	595–680
2–5% Ni steels	595–650
9% Ni steels	550–585
Quenched and tempered steels	540–550

Source: *Welding Handbook* (2).

روش درمانی

۱- عملیات حرارتی پس از جوشکاری (PWHT)

جوشکاری انجام شده است. حالا می خواهیم تنش های پس ماند و اعوجاج را کاهش دهیم.

آزاد سازی منابع متالورژیکی تنش های پس ماند

شکل ۵.۵

کاهش تنش های پس ماند در اثر PWHT در فولاد

جدول ۵.۱

نرخ دمایی PWHT در آلیاژهای متفاوت

۲- تنش زدایی با چکش کاری پس از جوشکاری

ایجاد تنش فشاری به جهت تعدیل تنش پس ماند کششی جوش (جوش چدن)

توضیحاتی در خصوص پروژه، گزارش علمی و ارائه

هدف از طرح پروژه:

- یادگیری و توانایی تحقیق در مورد یه موضوع جدید
- یادگیری و توانایی نوشتن یک گزارش علمی
- یادگیری و توانایی ارائه ی علمی شفاهی (سخنرانی علمی)

توضیحاتی در خصوص پروژه، گزارش علمی و ارائه

اصول تحقیق

بررسی و تفکیک موضوع

«آلیاژهای آنتروپی بالا و قابلیت جوشکاری آن ها»

آلیاژ؟ آنتروپی؟ تعریف مواد آنتروپی بالا؟ روش تولید؟

خواص؟ کاربرد؟ روش های جوشکاری؟ قابلیت جوشکاری؟

تحقیق در مورد هر یک از المان های تحقیق
(اصول تحقیق در اینترنت)

کتاب های مرجع
پایان نامه ها
مقالات مروری
مقالات

ارتباط دهی و جهت دهی اطلاعات به دست آمده

توضیحاتی در خصوص پروژه، گزارش علمی و ارائه

اصول تدوین گزارش علمی:

صفحه اول: نام و نام خانوادگی، شماره دانشجویی، موضوع، درس، استاد مربوطه، ترم و سال مربوطه

چکیده: توضیحی کوتاه از آنچه در گزارش علمی شما آمده است.

فهرست مطالب

شروع مطالب: مطالب بایستی با یک روند منطقی نوشته شده باشد.
مثلا در مورد موضوع: «آشنایی با مواد آنتروپی بالا و جوشکاری آن ها»، بایستی تاریخچه ای از این مواد عنوان شود، تعریف این مواد چیست؟ خواص این مواد؟ کاربردهای این مواد؟ روش های جوشکاری که معمولا به کار می رود؟ و سپس یک مورد از مقالات، پایان نامه و ... را که مطالعه کرده اید با جزییات بیشتری بیان کنید.

جمع بندی

مراجع

حدودا ۱۵-۲۵ صفحه باشد.

در نرم افزار word نوشته شود.

از تصاویر و نمودار تا جایی که می توانید استفاده کنید.

توضیحاتی در خصوص پروژه، گزارش علمی و ارائه

اصول سخنرانی علمی:

ابتدا خودتان را معرفی کنید.

موضوعتان را مطرح کنید.

اهمیت موضوعتان را اشاره کنید.

از نوشتن متن زیاد در اسلاید پاورپوینت خودداری کنید.

در حین طاحی سخنرانی، سوالات احتمالی را پیش بینی کنید و جوابی برای آن در دهن یا اسلایدها داشته باشید.

تا می توانید از عکس، نمودار و فیلم و کلیپ های مرتبط استفاده کنید.

کوتاه صحبت کنید و آرام و همچنین بدون استرس و...

چندین بار تمرین کنید تا بتوانید به بهترین شکل مطالب را ارائه کنید.

حدودا ۱۰-۱۵ دقیقه وقت خواهید داشت.
ارائه در اواخر ترم خواهد بود.
معمولا حدود ۱۵-۲۰ اسلاید کفایت می کند.