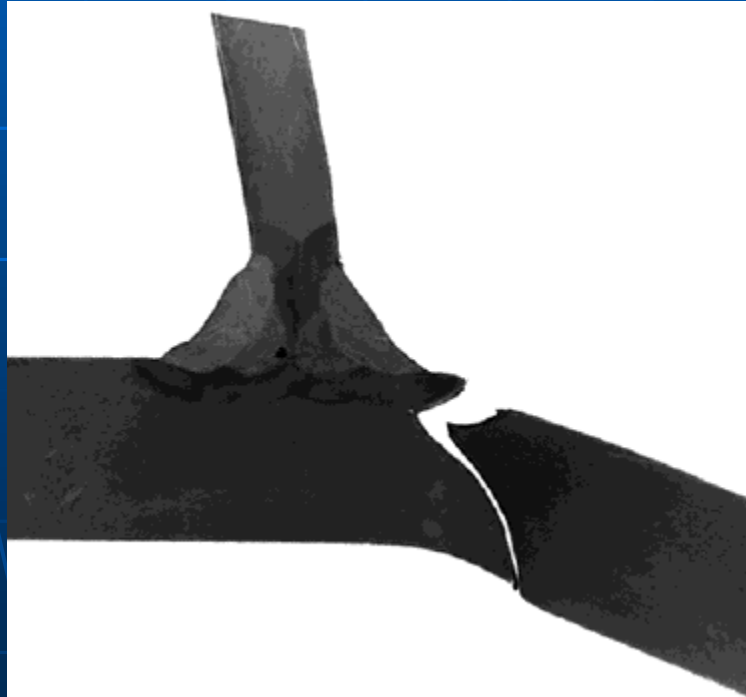
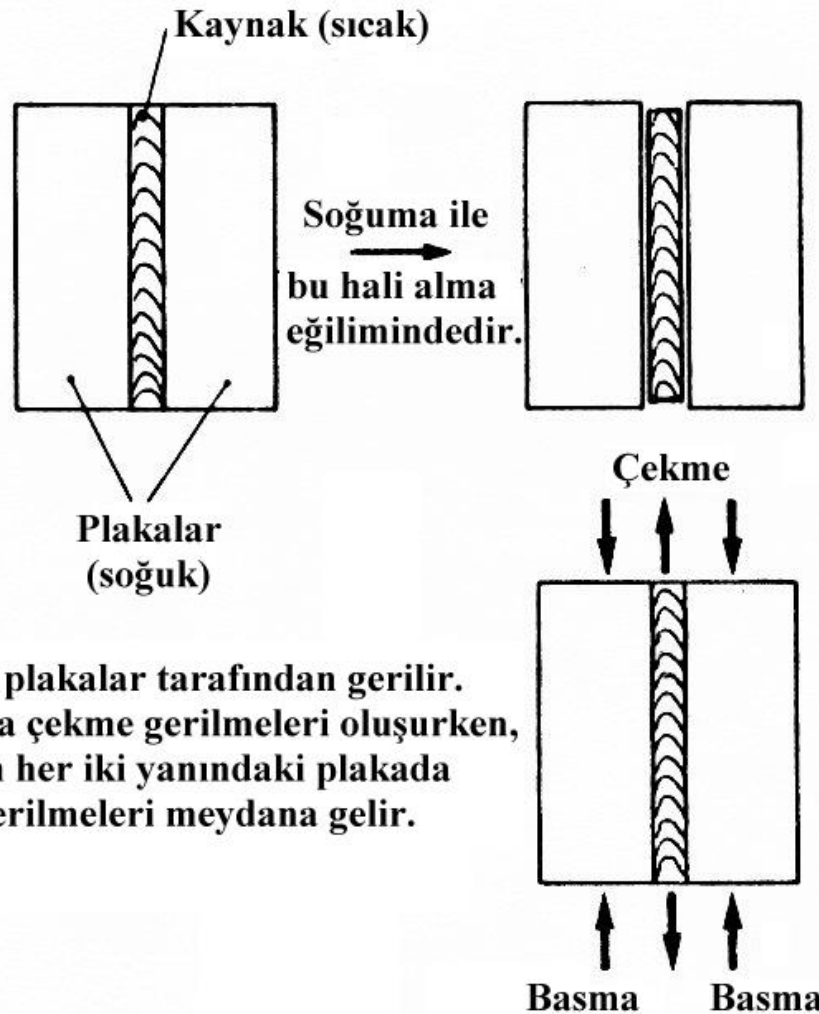


BÖLÜM 5

KAYNAK HATALARI

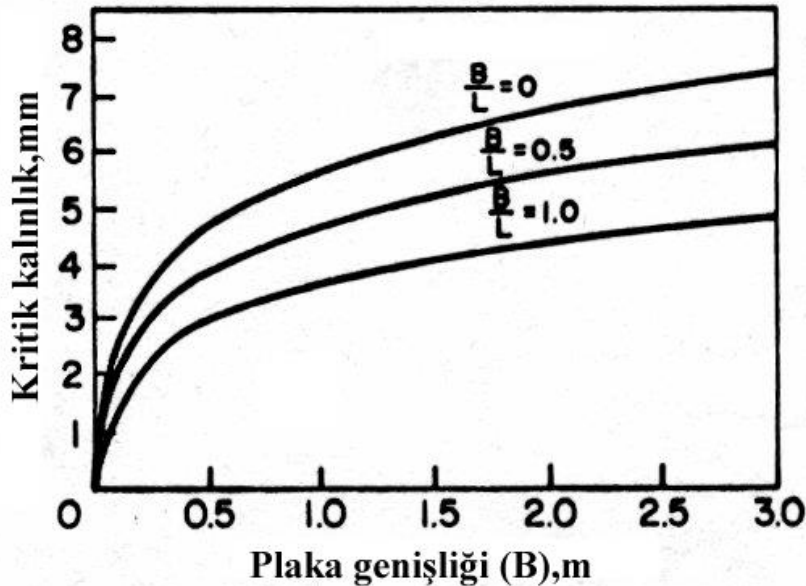
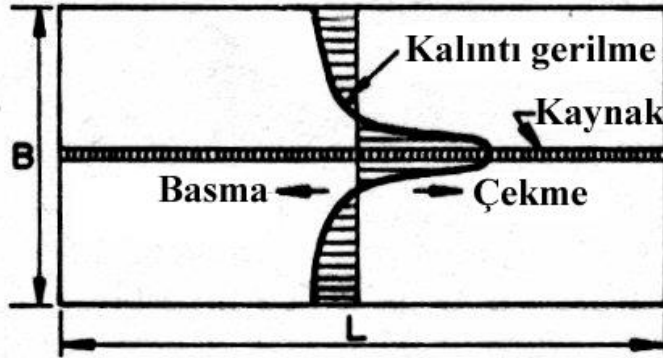


Kaynaklı parçalarda kalıntı gerilme (iç gerilme)



Kaynak, plakalar tarafından gerilir.
Kaynakta çekme gerilmeleri oluşurken,
kaynağın her iki yanındaki plakada
basma gerilmeleri meydana gelir.

Kaynaklı parçalarda kalıntı gerilme (iç gerilme)

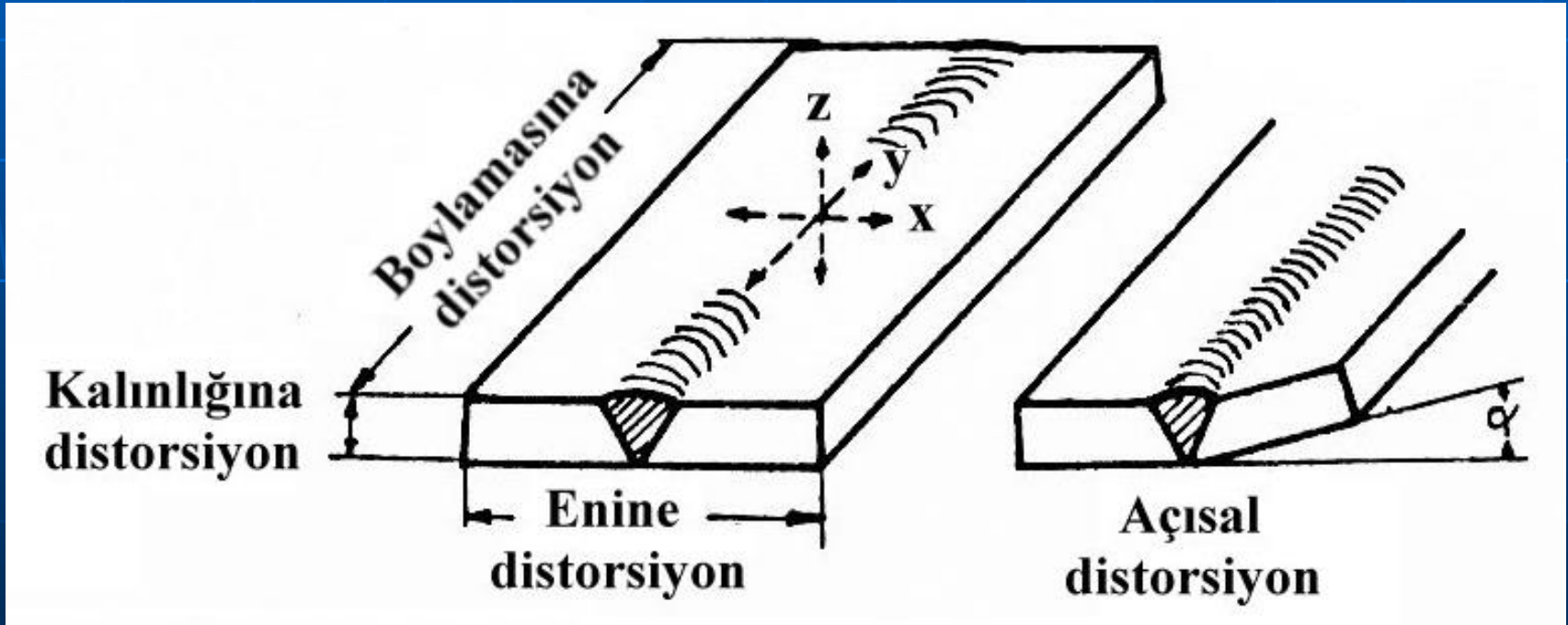


Kaynaklı parçalarda kalıntı gerilmenin etkisi:

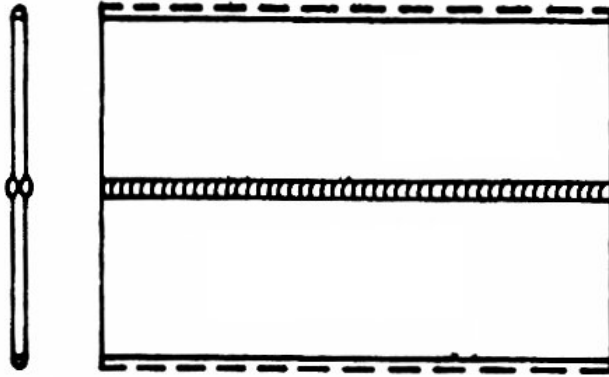
- 1- Gevrek kırılma
- 2- Gerilmeli korozyon
- 3- Distorsiyon

Kaynaklı parçalarda meydana gelen distorsiyonlar

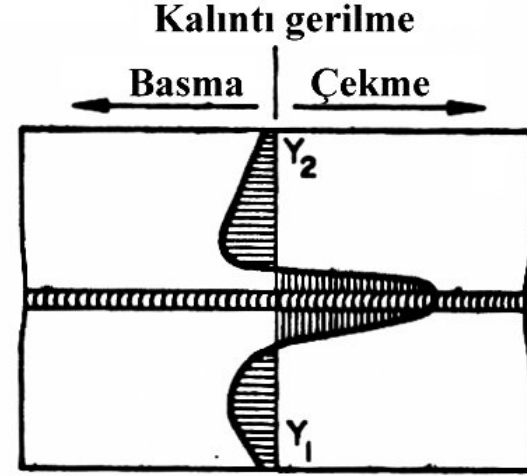
Kaynak nedeniyle oluşan iç gerilmelerin etkisiyle oluşan ve üniform olmayan deformasyon distorsiyon olarak adlandırılır. Distorsiyon kaynaklı malzemede dört şekilde gelişir.



Kaynaklı parçalarda meydana gelen distorsiyonlar



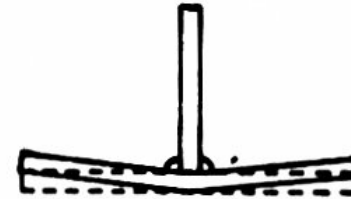
a. Bir alın kaynağında enine distorsiyon.



b. Bir alın kaynağında boyuna distorsiyon.



c. Bir alın kaynağında açısıl distorsiyon.



d. T kaynağı yapılmış bir parçada açısıl distorsiyon.

Kaynaklı parçalarda meydana gelen distorsiyonlar

Enine distorsiyon: Soğuma sırasında kaynak metalinin büzülmesi nedeniyle oluşan enine gerilmelerin neden olduğu parçada kaynak dikişine dik yönde meydana gelen çekmedir. Sıcak kaynak metali soğuk plakalardan daha düşük akma mukavemetine sahip olduğundan deformasyon öncelikle kaynakta gerçekleşir. Ancak soğumanın sonlarına doğru ana metalde de deformasyon gerçekleşebilir. Bu deformasyon ana metalin genişliğinin azalmasına neden olur.

Boyuna distorsiyon: Sıcak kaynak metalinin soğuma esnasında boyunu kısaltmak istemesi sonucu boylamasına gerilmelerin etkisiyle parçanın kaynak dikişi yönünde kendini çekmesidir. Pratikte boyuna distorsiyon miktarı çok düşüktür. Örneğin 1 m uzunluğundaki bir kaynakta 1 mm mertebesinde.

Kaynaklı parçalarda meydana gelen distorsiyonlar

Kalınlaşmasına distorsiyon: Parçanın kendisini kalınlığı boyunca çekmesidir. Kalınlığına distorsiyon çok küçük değerdedir.

Açısal distorsiyon: Enine distorsiyonun özel şekli olup parçanın ilk başlangıç durumuna göre kendisini α açısı kadar çekmesidir. Örneğin V kaynak ağzında ağız üst kısmının genişliği alt kısmından daha fazladır. Kendini çekme, soğuyan metalin uzunluğuna bağlı olduğundan kaynak ağzının üst kısmında daha fazla kendini çekme meydana gelir. Eğer ana metal plakaları tesbit edilmemişse açısal distorsiyon oluşur.

Kaynaklı parçalarda meydana gelen distorsiyonların önlenmesi

- 1- Dizayn mümkün olduğunca az kaynak gerektirecek şekilde yapılmalıdır.
- 2- X kaynak ağzında görülen çekilme miktarı nötr eksenin altında ve üstünde aşağı yukarı aynıdır. Bu, V kaynak ağzına göre daha az distorsiyona neden olur.
- 3- Parçalar, kaynak sırasında meydana gelecek distorsiyonlar gözönüne alınarak hazırlanmalıdır. Örneğin T kaynağı belirli bir açı verilerek yapılmalıdır.
- 4- Parçalar kaynak öncesi tavlanarak açısal distorsiyon azaltılabilir veya önlenabilir.
- 5- Kaynak sonrasında oluşacak distorsiyonu önleyecek şekilde parçaların önceden tesbit edilmesi. Bu metodda distorsiyon önlenbilmesine rağmen kaynak iç gerilmeleri yüksek olur. Bu nedenle işlem sonunda gerilme giderme ısıtma işlemi uygulanmalıdır.

Kaynaklı parçalarda meydana gelen distorsiyonların önlenmesi

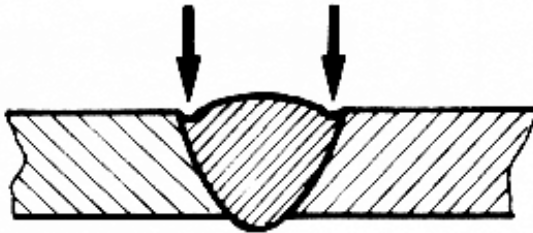
6- Distorsiyonun düzeltilmesi: Distorsiyon, kaynak sonrasında distorsiyona uğramış parça deforme edilerek önlenabilir. Bu deformasyon termal veya mekanik olarak yapılır:

a-) Termal olarak deformasyon özellikle gemi yapımında kullanılır.

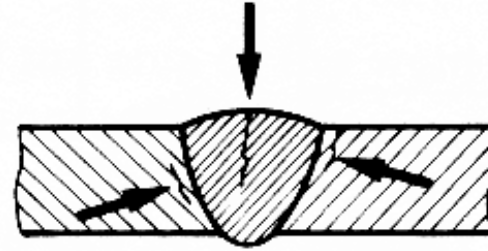
Bu yöntemde düzeltilecek kısım 595-690 °C arasına ısıtılır ve hızla su spreyi ile soğutulur. Gerekirse bu işlem bir kaç defa tekrarlanır. Bu metot en kolay ve yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Ancak yüksek mukavemetli çeliklerde olumsuz etkisi görülebilir.

b-) Mekanik yöntemde parça bütünüyle preslenir veya düzeltilecek bölge dövülür.

Kaynak Hataları



(a) Yanma olukları



(b) Çatlaklar



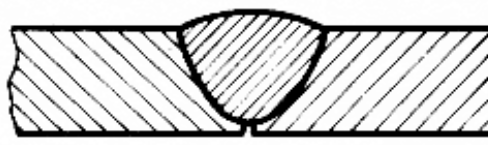
(c) Poroziteler



(d) Curuf inklüzyonları



(e) Erime yetersizliği



(f) Penetrasyon yetersizliği

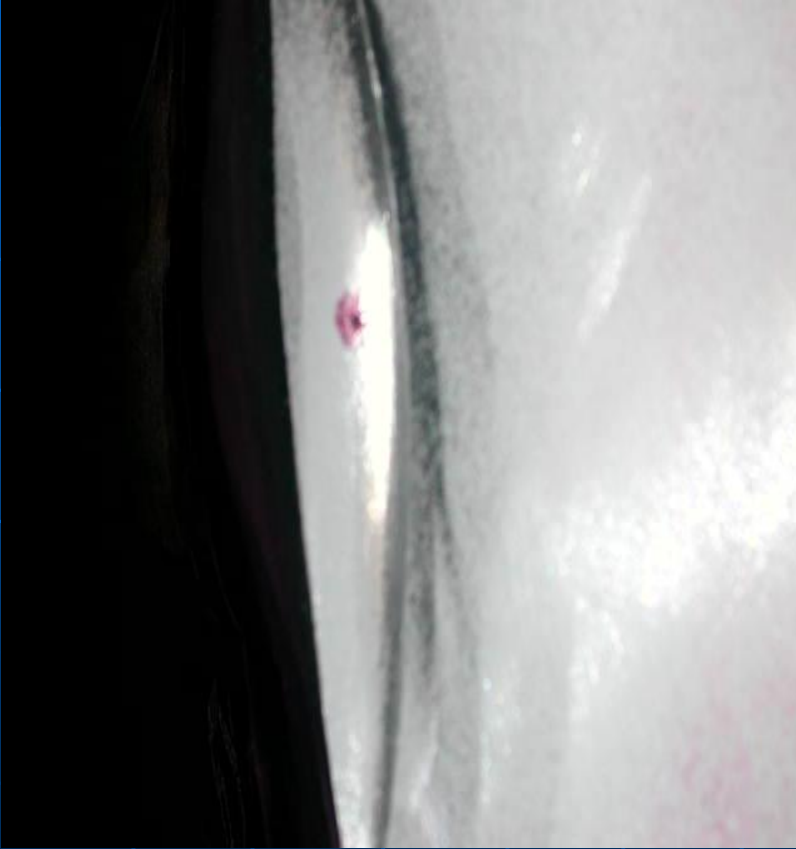
Kaynak Hataları

1- Poroziteler:



Katılaşma sırasında bazı gazların (özellikle oksijen, azot ve hidrojen) kaynak metaline hapsolması sonucu ortaya çıkan bir kaynak hatasıdır. Bu gazların sıvı metaldeki çözünürlükleri katı metalden çok fazladır ve katılaşma sırasında kaynak metalinden kaçma fırsatı bulamamaları halinde kaynak bölgesinde porozite oluşur. Porozite kaynakları temel olarak, malzeme yüzeyindeki nem, yağ, boya, oksit ve havadaki azot ve oksijendir. Porozite oluşturan gazlardan oksijen kaynak banyosuna, oksitlenmiş dolgu metalinden, ana metalden, flakstan, atmosferden veya elektrot örtüsünden ; azot, atmosferden veya koruyucu gazdan; hidrojen ise elektrot örtüsünde selülozun bulunmasından veya ark bölgesini çevreleyen gaz atmosferinden geçebilir.

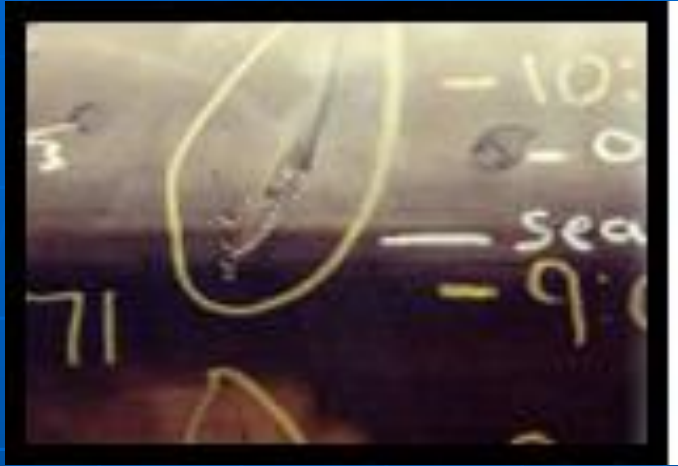
Gözenek



Gaz Gözeneği



Kurt Deliği



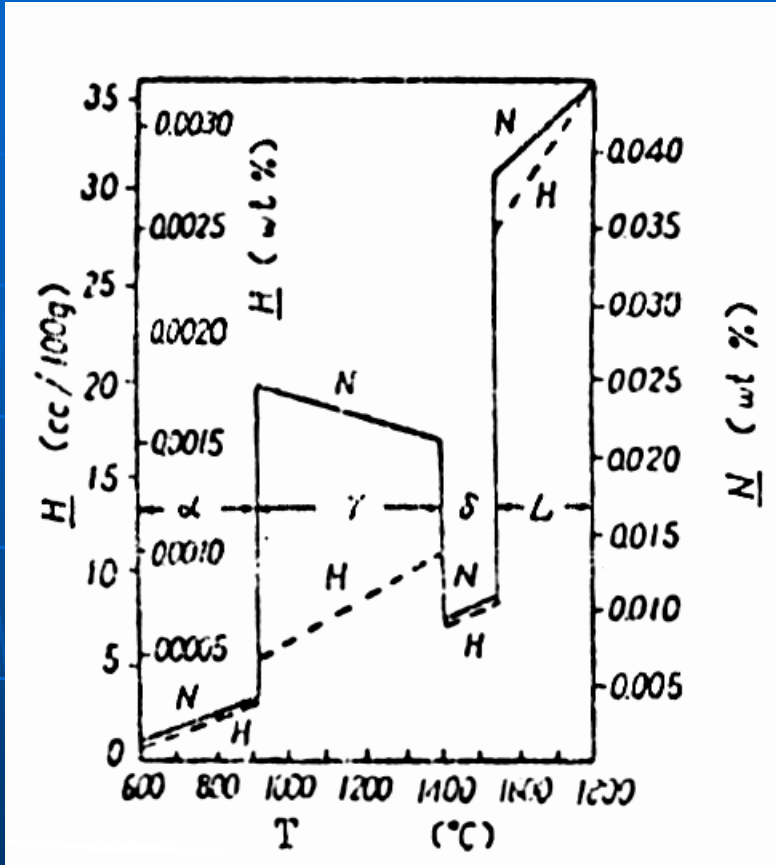
Gouge, Groove:



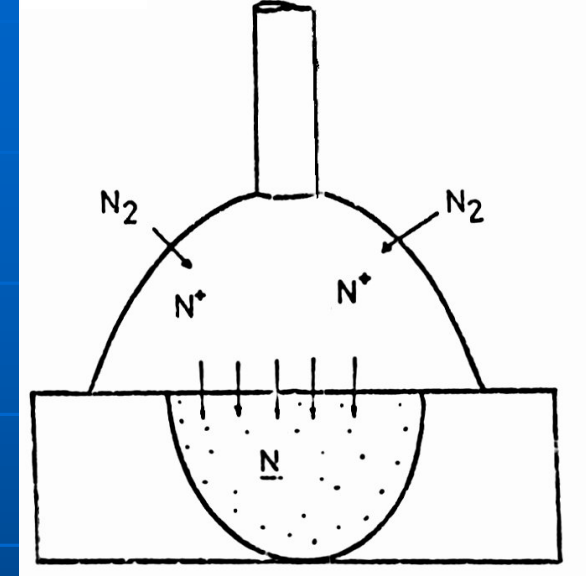
Arc Burns

These defects are caused by either third-party damage or non-acceptable workmanship, and may include stress concentrators such as cracking. Failure occurs by the pipe material containing the defect flexing because of internal pressure variances, which in turn causes cracking. When the crack extensions become critical, rupture occurs.

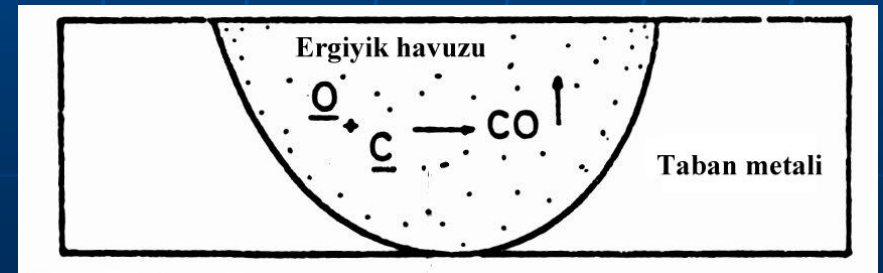
Kaynak Hataları



Azot ve hidrojen çözünebilirliğinin sıcaklığa bağımlılığı.



Azotun havadan kaynak havuzuna doğru hareketi.

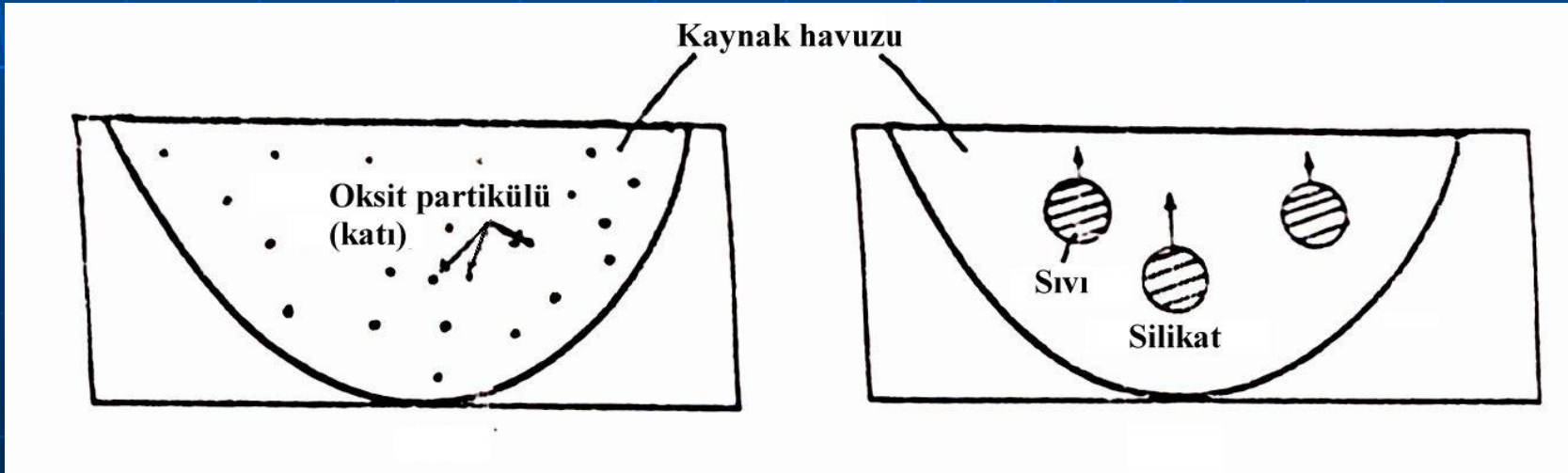


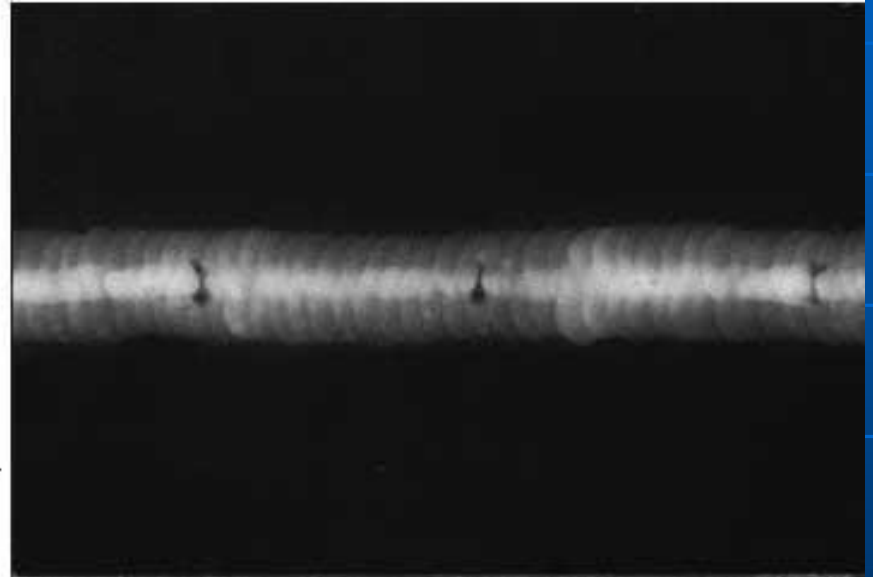
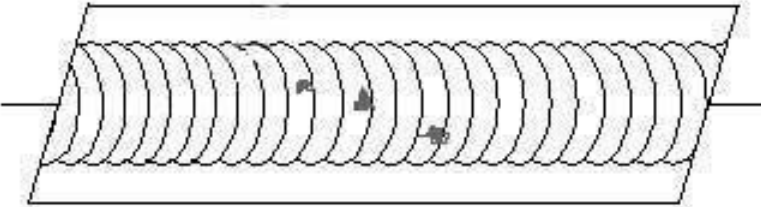
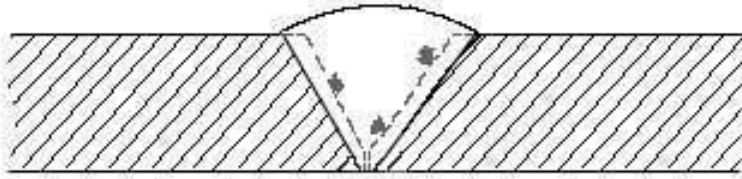
Çözülmüş oksijen ve karbonun karbon monoksit gazı oluşturması.

Kaynak Hataları

2- Curuf İnküzyonları:

Curuf inklüzyonları, kaynak metalinde veya kaynak metal ara yüzeyinde hapsolan ve metalik olmayan katı partiküllerdir. Hapsolan curuf, flaks ile ergiyen kaynak metali reaksiyonunun ürünüdür. Çok pasolu kaynaklarda her pasodan sonra curuf iyice temizlenmelidir. Gazla koruma iyi yapılarak ve uygun elektrot veya flaks seçimi ile curuf inklüzyonları azaltılabilir. Ayrıca kaynak ağzı açısını arttırmak da faydalıdır.





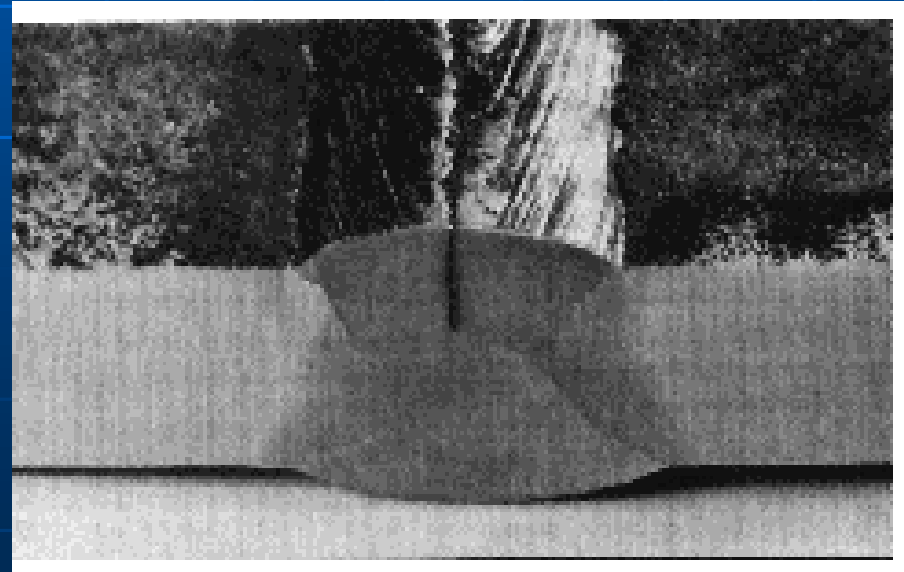
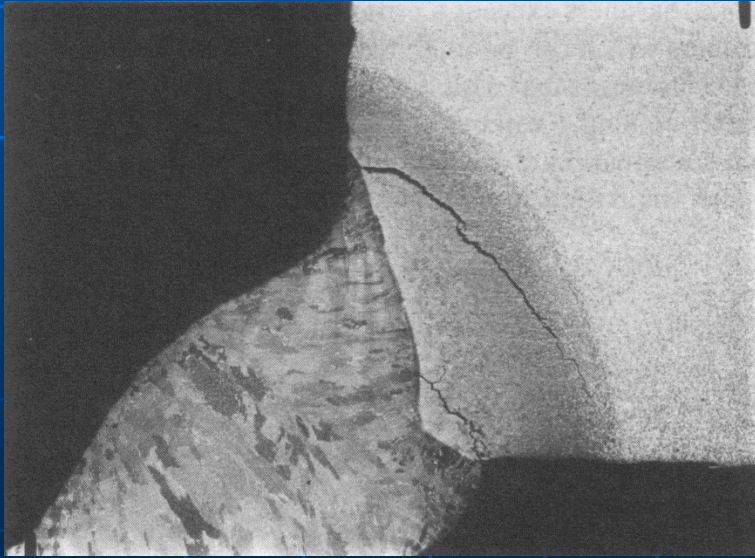
Curuf Kalıntısı

Kaynak Hataları

3- Çatlaklar:

En tehlikeli kaynak hatası olup, Kaynak sonrasında kaynak dikişı veya ITAB oluşabilir.

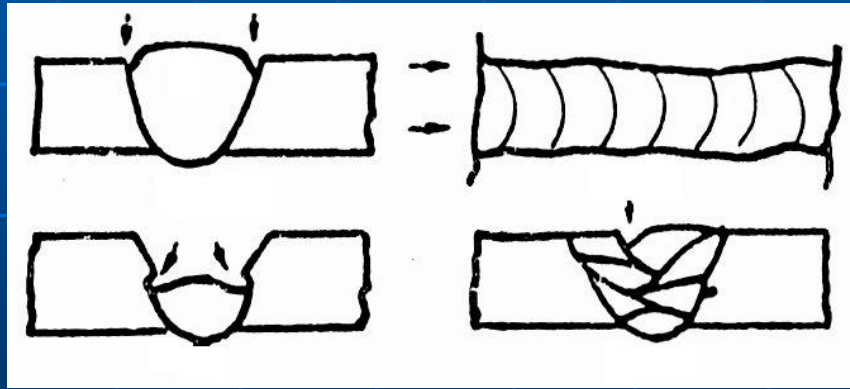
Genellikle; Kaynak dikişinde oluşan çatlaklar sıcak çatlak, ITAB'da oluşan çatlaklar soğuk çatlak olarak isimlendirilir.



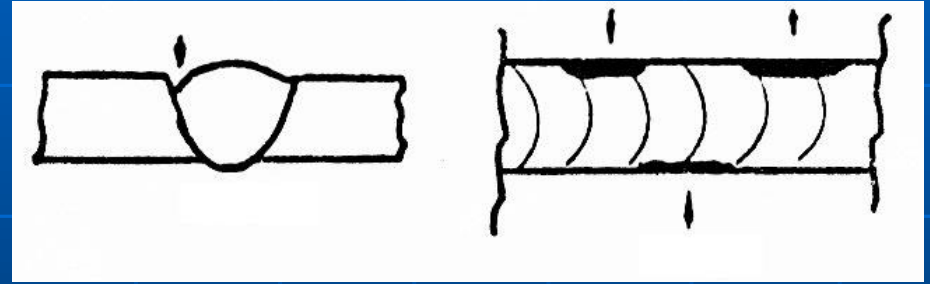
Kaynak Hataları

4- Yanma Olukları:

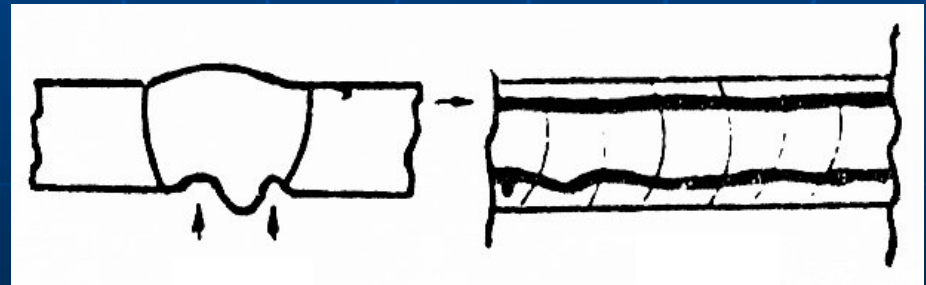
Yanma olukları genellikle kaynak birleşme bölgelerine yakın bölgelerde ve kaynak dikişine paralel olarak meydana gelir. Bu bölgelerin kaynak metali ile doldurulamaması yanma oluğu oluşumuna sebep olur.



Devamlı yanma olukları



Kesikli yanma olukları

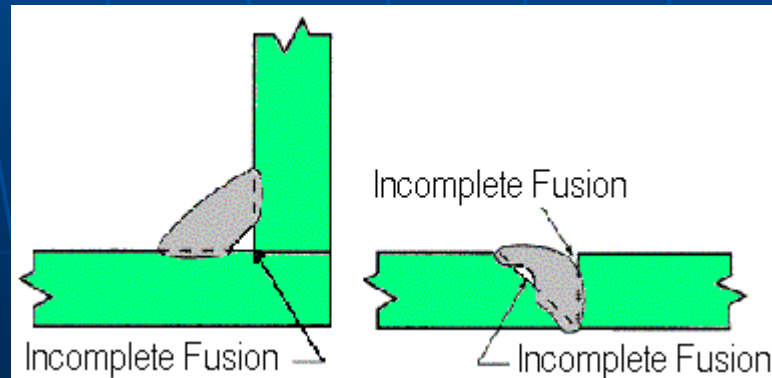


Kökteki yanma olukları

Kaynak Hataları

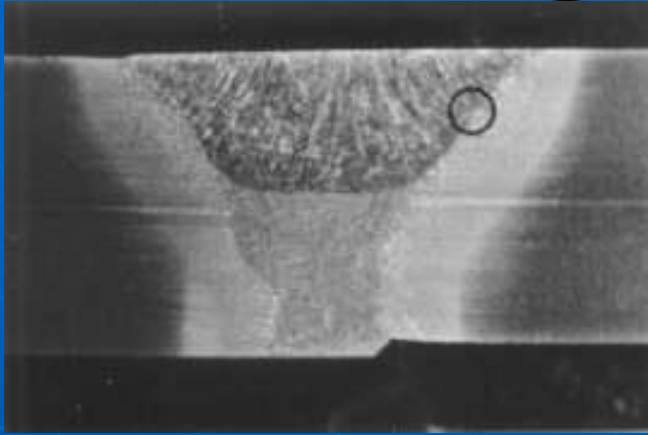
5- Ergime Yetersizliği:

Kaynak metaliyle ana metalin birlikte erimemesi sonucu ortaya çıkan bir kaynak hatasıdır. Bu tip hatalar kaynak yönünde uzamış olup, yuvarlak veya keskin köşeli biçimde olabilirler. Ergime yetersizliğine, ana metal sıcaklığının ergime sıcaklığına çıkmaması veya ana metalin yüzeyinde curuf, oksit gibi yabancı maddelerin bulunması neden olur. Ergimenin tüm malzeme kalınlığı boyunca olmaması neticesinde nüfuziyet azlığı meydana gelebilir.

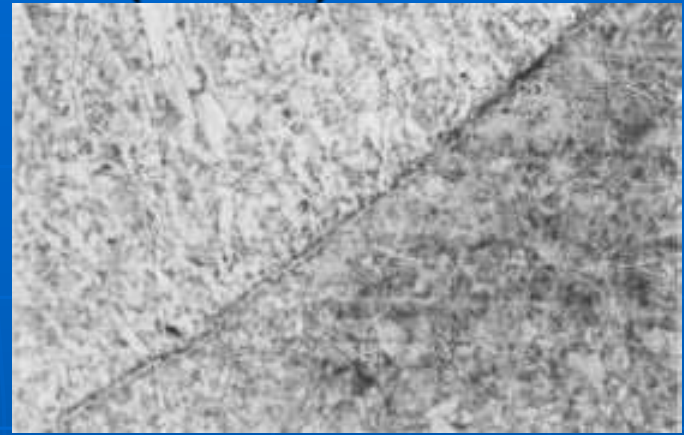


Ergime Hatası(LOF)

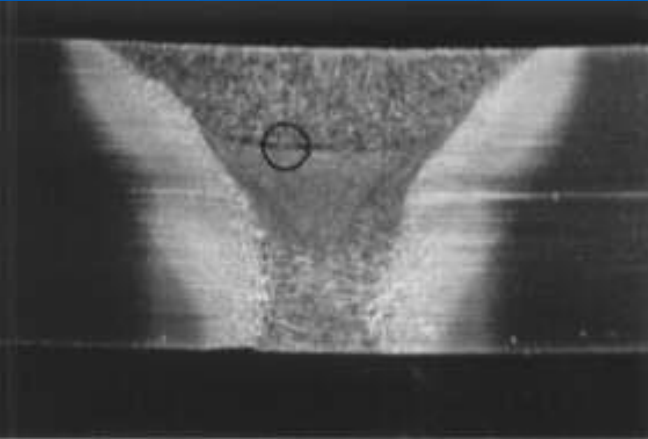
X3,5



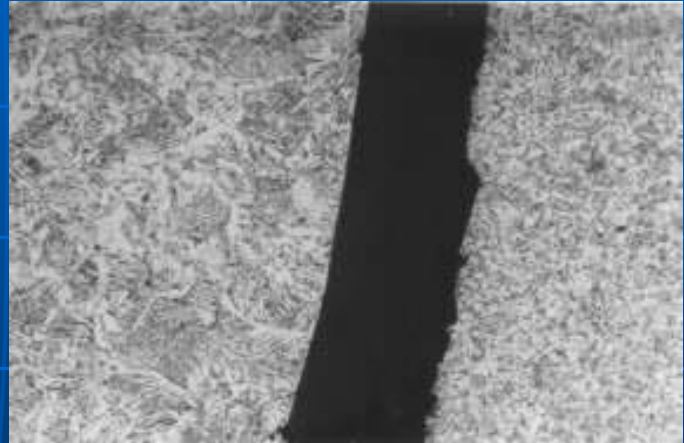
X100



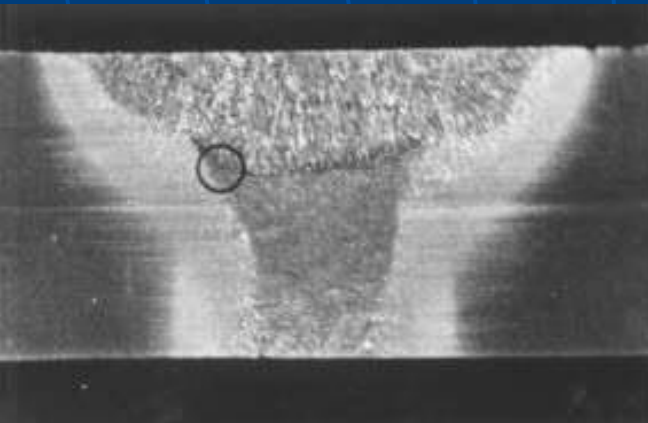
X3,5



X100



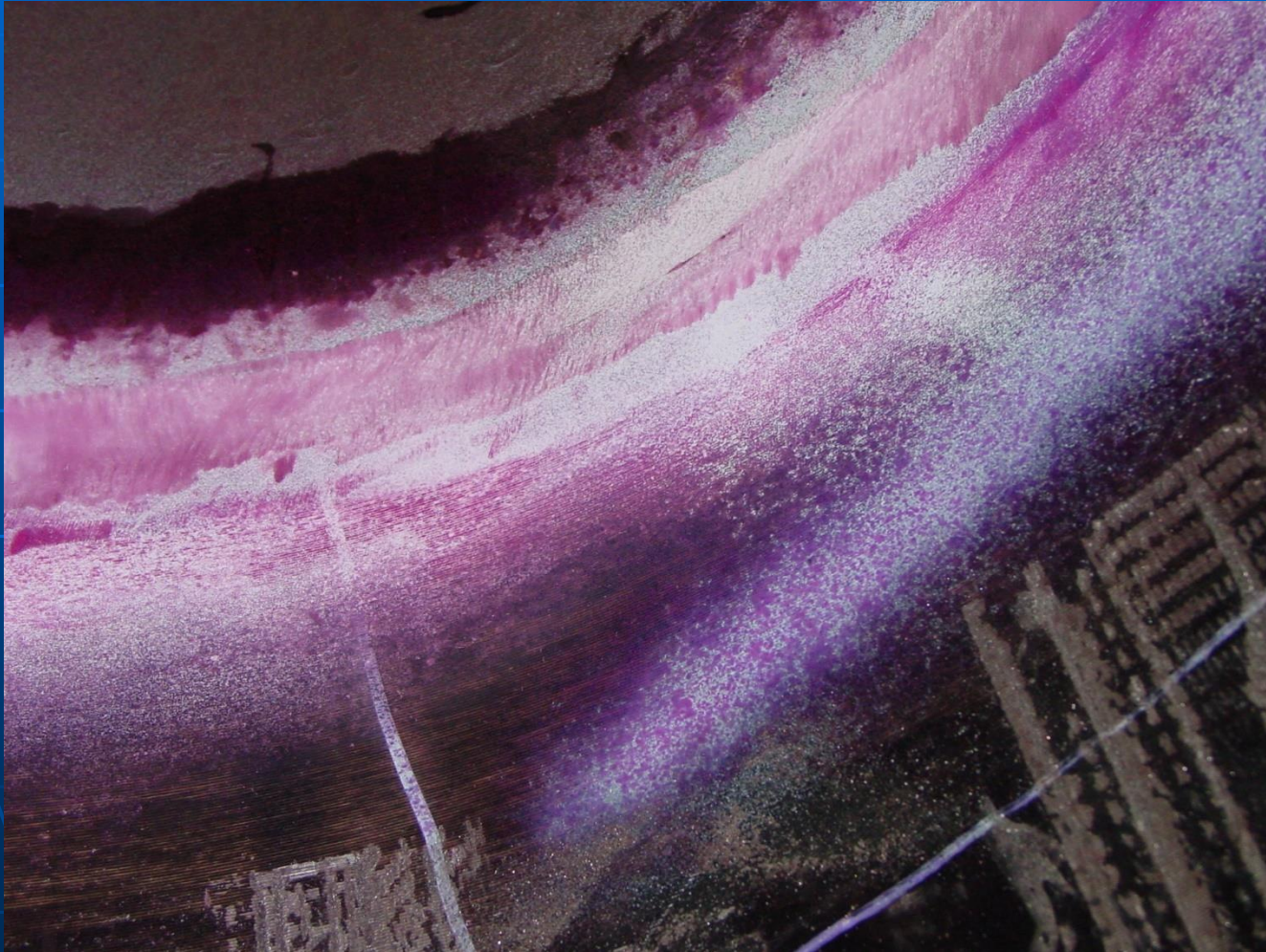
X3,5



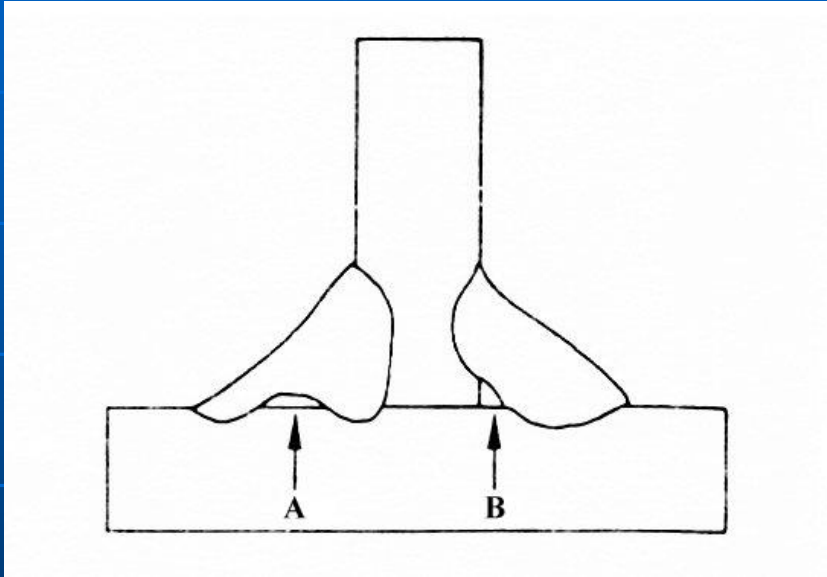
X100



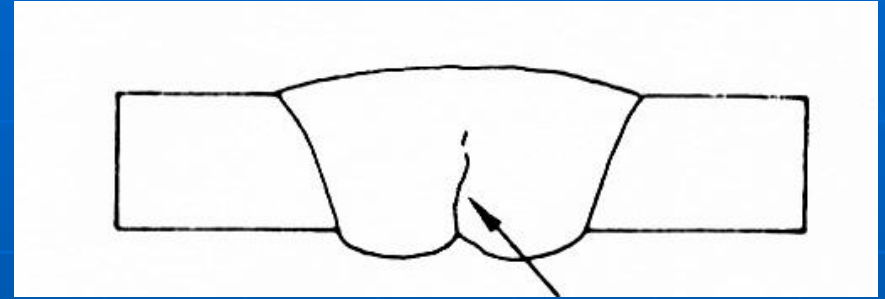
Ergime Hatası(LOF)



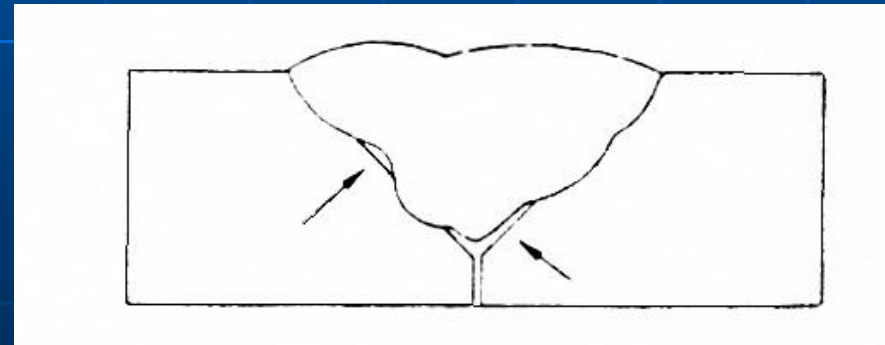
Kaynak Hataları



Kaynakta oluşan ergime yetersizliği.
B genellikle köprülenme olarak
adlandırılır.



Özellikle alüminyumda oluşan ve
bağlantının ortasındaki curuf veya
oksitten kaynaklanan ergime yetersizliği.



V şekilli oluklu kaynakta ergime yetersizliği.



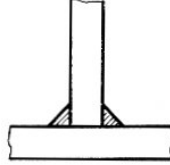
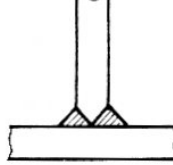
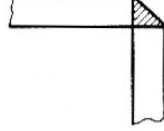
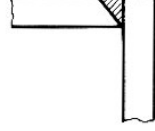
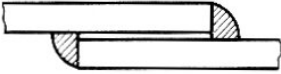
Ergitme kaynağında rastlanan bazı kaynak hataları

Hata	Özellik	Sebep	Çözüm/Önlem
Gözenekler (Porozite)	Kaynak metalinde çeşitli boyut ve şekillerde (genellikle küresel veya uzamış) bulunan gaz boşlukları.	Kaynak banyosunda çözünen gazların kaynak metaline hapsolmesi.	<ul style="list-style-type: none">• Yeteri kadar deoksidan elementler (Mn, Si, Al ve Ti gibi) içeren elektrodlar kullanmak,• Kaynak banyosunun soğuma hızını kontrol etmek,• İlk pasoda oluşan yüzey gözeneklerini kaldırdıktan sonra ikinci paso yapmak,• Elektrodu kurutmak.
Kalıntılar (İnklüzyonlar)	Kaynak metalinde ve/veya kaynak metali ile esas metal arayüzeyinde çeşitli boyut ve şekillerde bulunan metalik olmayan partiküller.	Curufun veya deoksiyasyon ürünlerinin kaynak metaline hapsolmesi.	<ul style="list-style-type: none">• Kaynak ağzının pas, pislik ve yağ gibi yabancı maddelerden temizlemek,• Çok pasolu dikişlerde, bir önceki kaynak pasosunun dikiş yüzeyinde oluşturduğu curufun kaldırılmak,• Kaynak ağzı açısını artırmak,• Uygun çapta elektrod kullanmak..
Yetersiz Ergime	Kaynak bölgesinde eksik birleşme.	Kaynak sırasında tam ergime olmaması.	<ul style="list-style-type: none">• Kaynak ısısının artırmak,• Kaynak ağzını temizlemek,• Uygun çapta elektrod kullanmak,• Kaynak dikişinin hatalı bölgesini veya tamamını söküp tekrar kaynak etmek.
Yetersiz Nüfuziyet	Kaynak bölgesinde eksik birleşme.	Ergimenin istenen derinlikte gerçekleşmemesi.	<ul style="list-style-type: none">• Kaynak ısısının artırmak,• Kaynak ağzının temizlemek,• Uygun çapta elektrod kullanmak,• Kaynak dikişinin hatalı bölgesini veya tamamını söküp tekrar birleştirmek.

Ergitme kaynağında rastlanan bazı kaynak hataları

Hata	Özellik	Sebebi	Çözüm/Önlem
Yanma Olukları	Kaynak dikişi boyunca kaynak metali ile esas metal arayüzeyinde çentik görünümünde oluklar.	Yanlış kaynak uygulaması ve yüksek kaynak ısısı.	<ul style="list-style-type: none">• Ek paso ile olukları onarmak,• Kaynak ısını düşürmek,• Kaynak bölgesini temizlemek,• Uygun kaynak ağız açısı.
Çatlaklar	Kaynak metalinde ve/veya çevresinde çeşitli tür ve şekillerde çatlaklar. Çatlaklar taneler arası karakterli ise sıcak çatlak, taneler içi karakterli ise soğuk çatlak grubundandır. Soğuk çatlaklar kaynaktan bir süre sonra da ortaya çıkabilir.	Kaynak metalinde kükürt gibi kalıntı element segregasyonu (Sıcak çatlaklar).	<ul style="list-style-type: none">• Kaynak metalinde Mn/S oranını artırmak,• S, P, C ve Nb oranını azaltmak,• Kaynak ağızını ve köşesini bir miktar takviye edip kaynak dikişini konveks yapmak,• Kaynak bölgesinde iç gerilmeleri azaltmak amacıyla ön tavlama yapmak.
		Karbon eşdeğeri 0.35'den fazla olan çeliklerde, kaynak banyosuna hidrojen girmesi (Soğuk çatlak, hidrojen çatlama).	<ul style="list-style-type: none">• Birleşme bölgesini, kaynak öncesi nem, yağ v.b'den temizlemek,• Bazik elektrod kullanmak ve kullanımdan önce elektrodları kurutmak,• Kaynak bölgesinde martensit oluşumun engellemek amacıyla ön tavlama yaparak soğuma hızını düşürmek,• Kaynak sonrasında ısı işlem yapmak.
Çarpılma	Kaynak yapılan parçalarda şekil bozukluğu.	Kaynak sırasında iç gerilme oluşması.	<ul style="list-style-type: none">• Uygun dizayn,• Kaynak öncesi ısı işlem yapmak.

Kaynaklanmış bağlantı tipleri

Bağlantı tipi	Örnekler
Alın kaynağı	 
T kaynağı	 
Köşe kaynağı	 
Bindirme kaynağı	

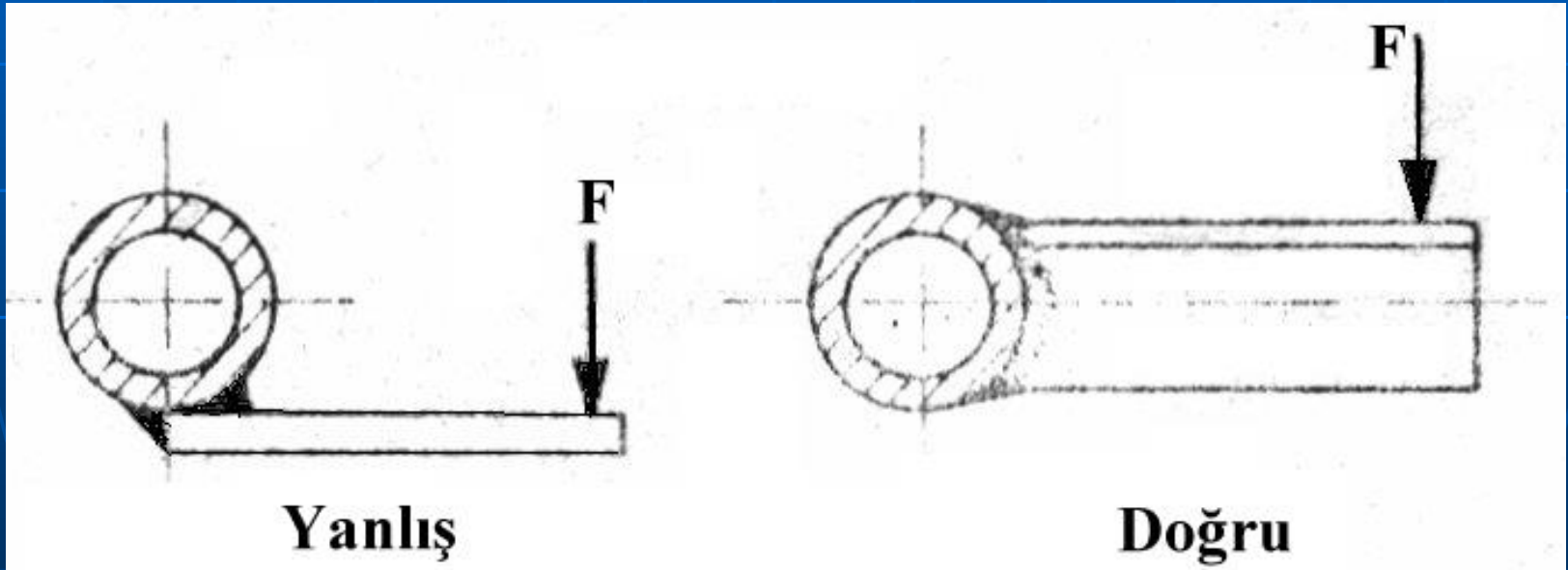
Kaynak konstrüksiyonuna ait esaslar

Kaynak işleminin sorunsuz ve istenilen şekilde yapılabilmesi için kaynak konstrüksiyonuna ait temel esaslar ana hatlarıyla bilinmelidir;

- 1- Kaynak esnasında meydana gelen değişken sıcaklık dağılımından ötürü kaynak bağlantısında meydana gelen ısı gerilmelerin etkisi ile kaynak konstrüksiyonunda oluşan distorsiyonları önlemek için;
 - a-) Kaynak edilecek parçalar şekil bakımından basit (levha, silindir, profil) ve nispeten büyük olmamalıdır.
 - b-) Kalın ve kısa kaynak dikişleri yerine, ince ve uzun dikişler tercih edilmelidir.
 - c-) Nispeten büyük parçalar kaynak işleminden sonra gerilme giderme tavına tabi tutulmalıdır.

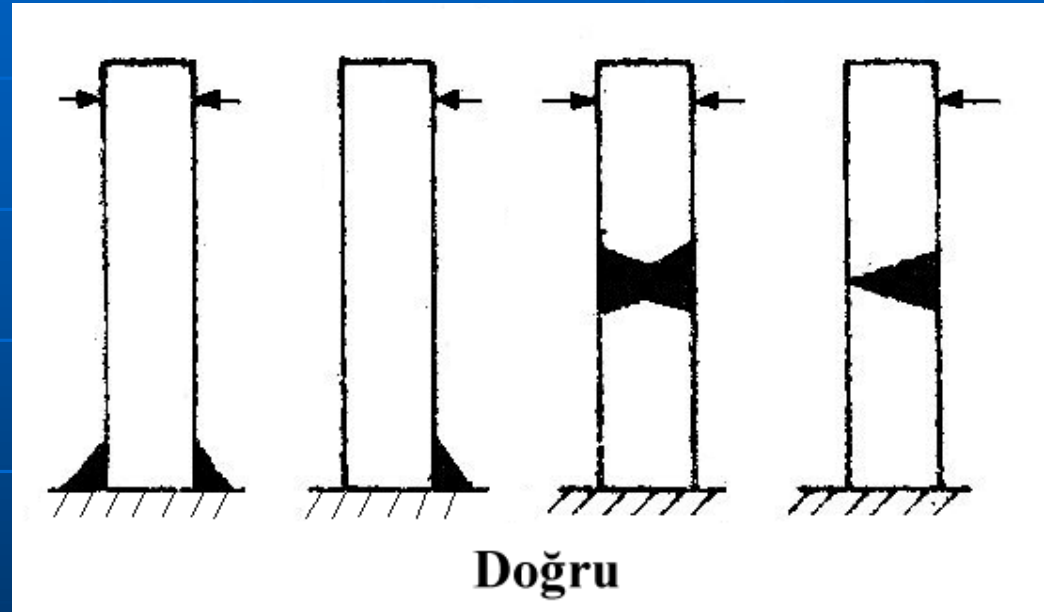
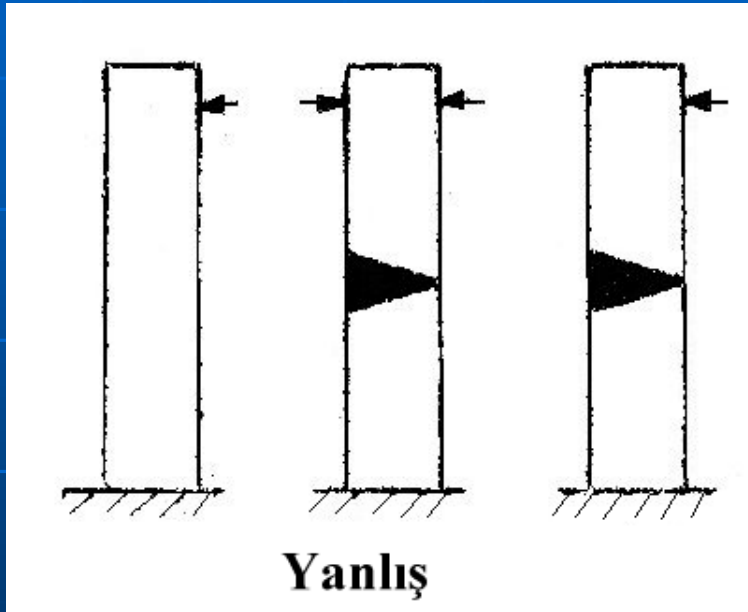
Kaynak konstrüksiyonuna ait esaslar

- 2- Kaynak dikişleri konstrüksiyonun en çok zorlanan bölgelerine konulmamalıdır; ancak zorunluluk halinde mukavemet kurallarına göre uygun tedbirler alınmalıdır.



Kaynak konstrüksiyonuna ait esaslar

3- Dikiş kökü, çekme gerilmesi bulunan yere konulmamalıdır.

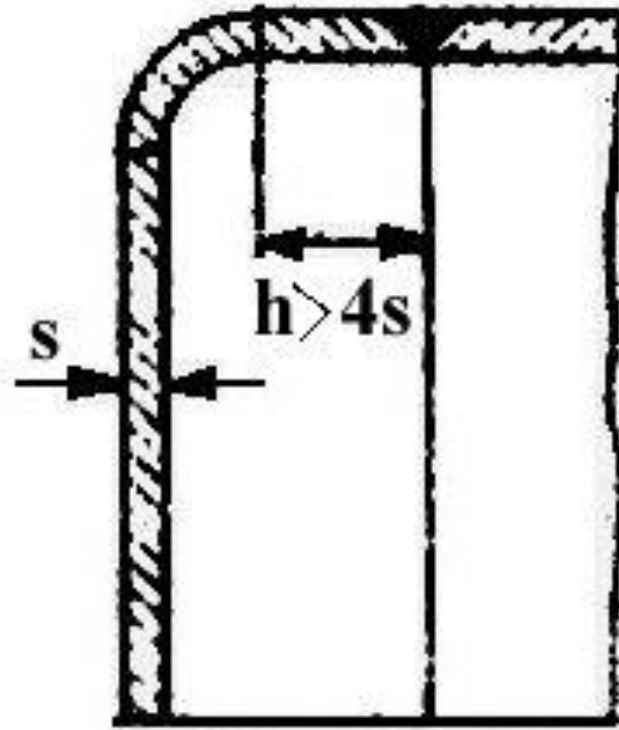


Kaynak konstrüksiyonuna ait esaslar

4- Kaynak dikişı çentik etkisinin bulunduğu bölgelere konulmamalıdır.



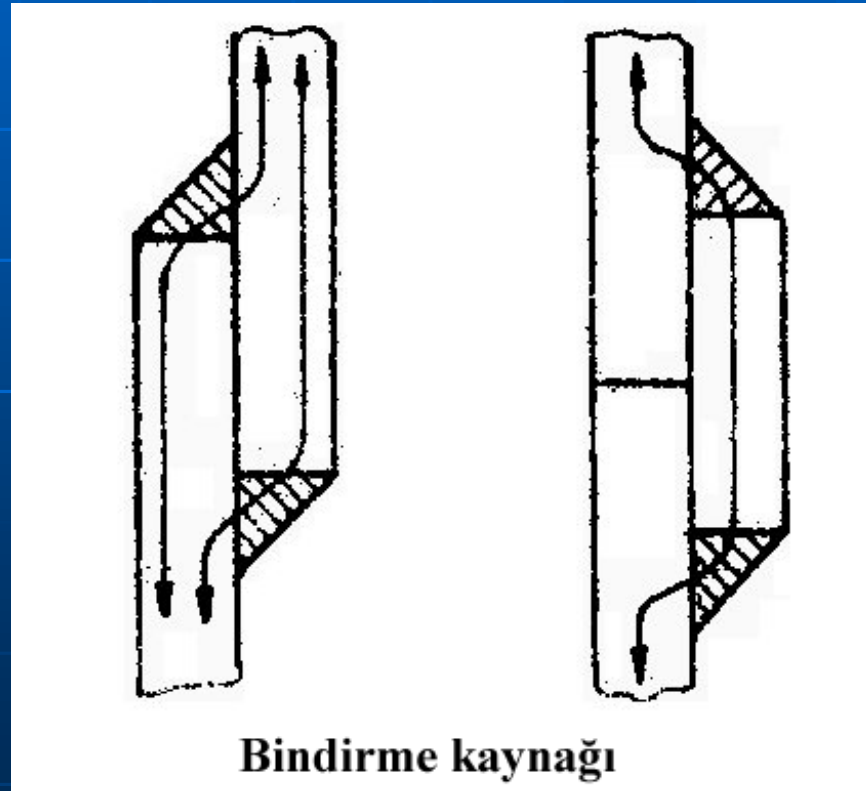
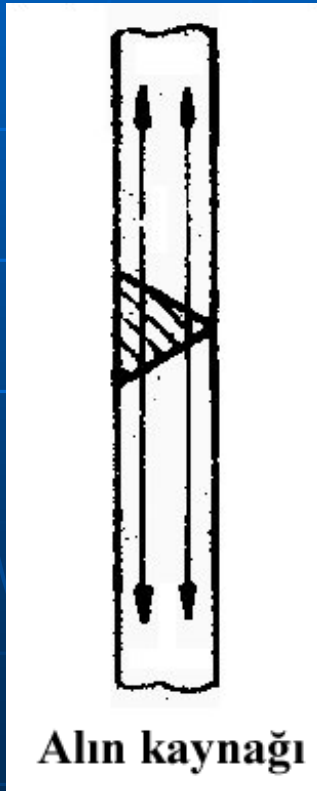
Yanlış



Doğru

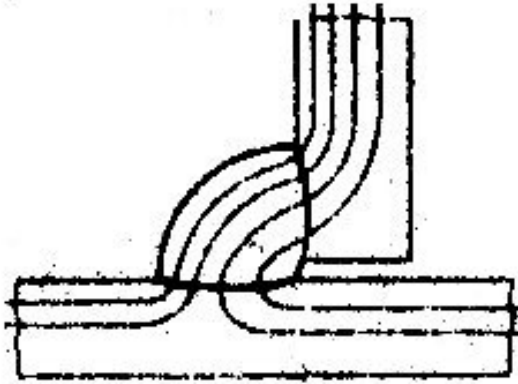
Kaynak konstrüksiyonuna ait esaslar

5- Kaynak dikişlerinde kuvvet akış çizgilerinin düzgün olmasına dikkat edilmelidir. Buna göre alın kaynağı bindirme kaynağına göre daha uygundur.

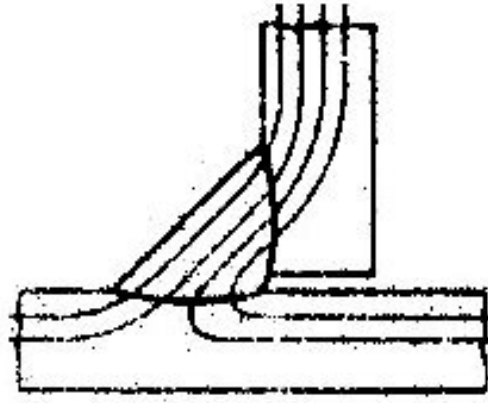


Kaynak konstrüksiyonuna ait esaslar

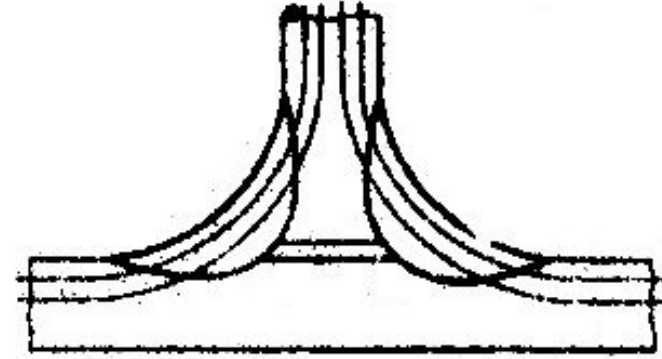
Aynı şekilde oyuk köşe dikişı, düz köşe dikişine ve bu da bombeli köşe dikişine tercih edilmelidir.



Bombeli köşe dikişı



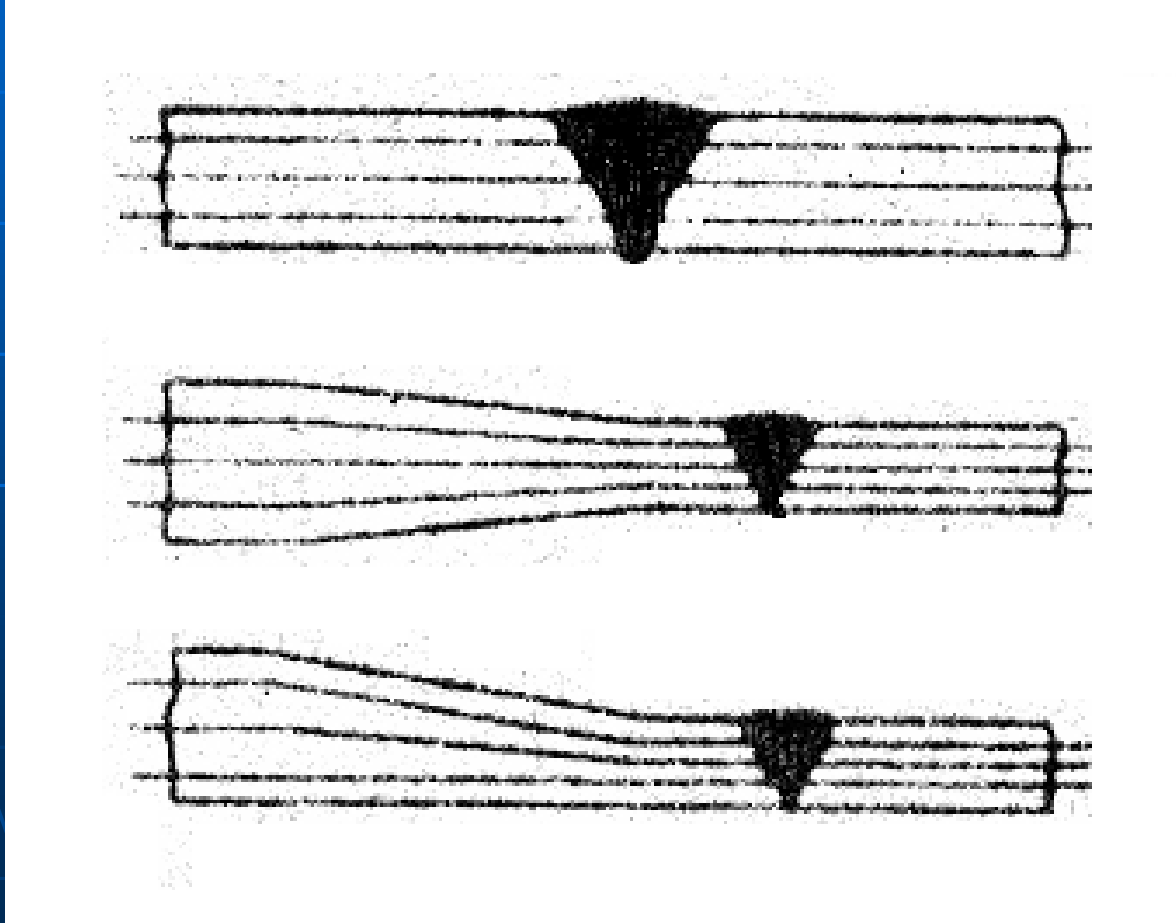
Düz köşe dikişı



Oyuk köşe dikişı

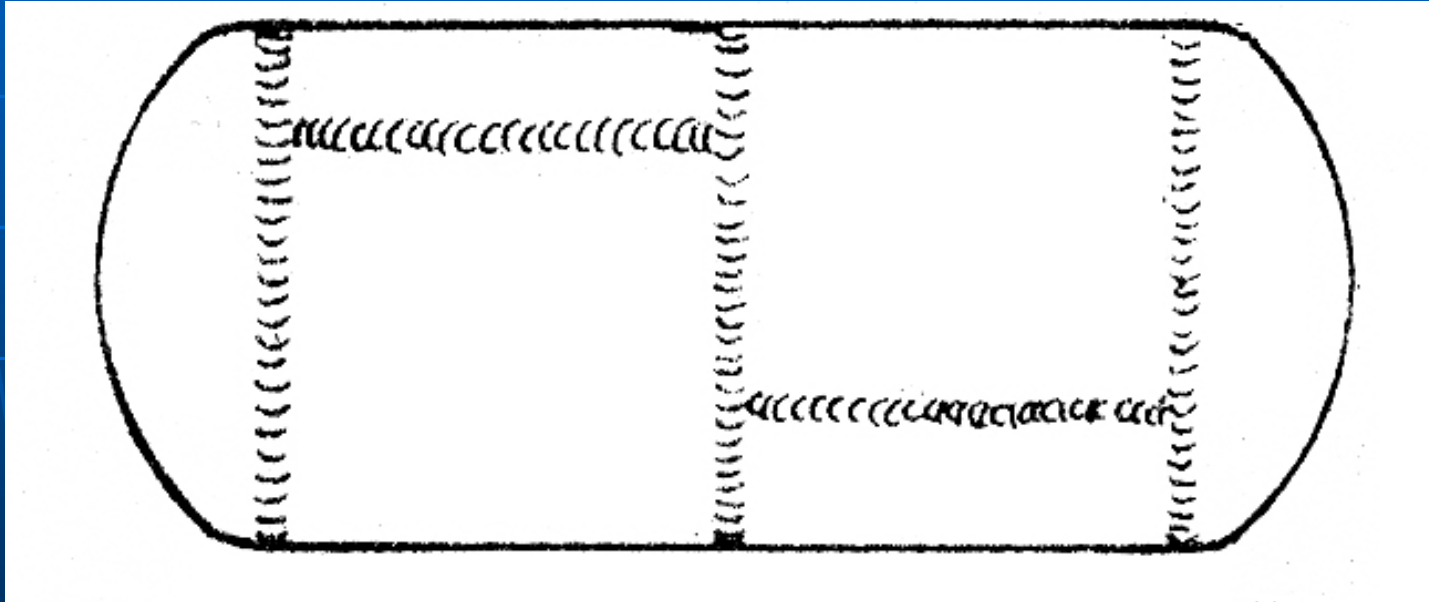
Kaynak konstrüksiyonuna ait esaslar

Bu prensibi uygulamak için kaynak yerinde parçaların kalınlıkları birbirine eşit olmalıdır.



Kaynak konstrüksiyonuna ait esaslar

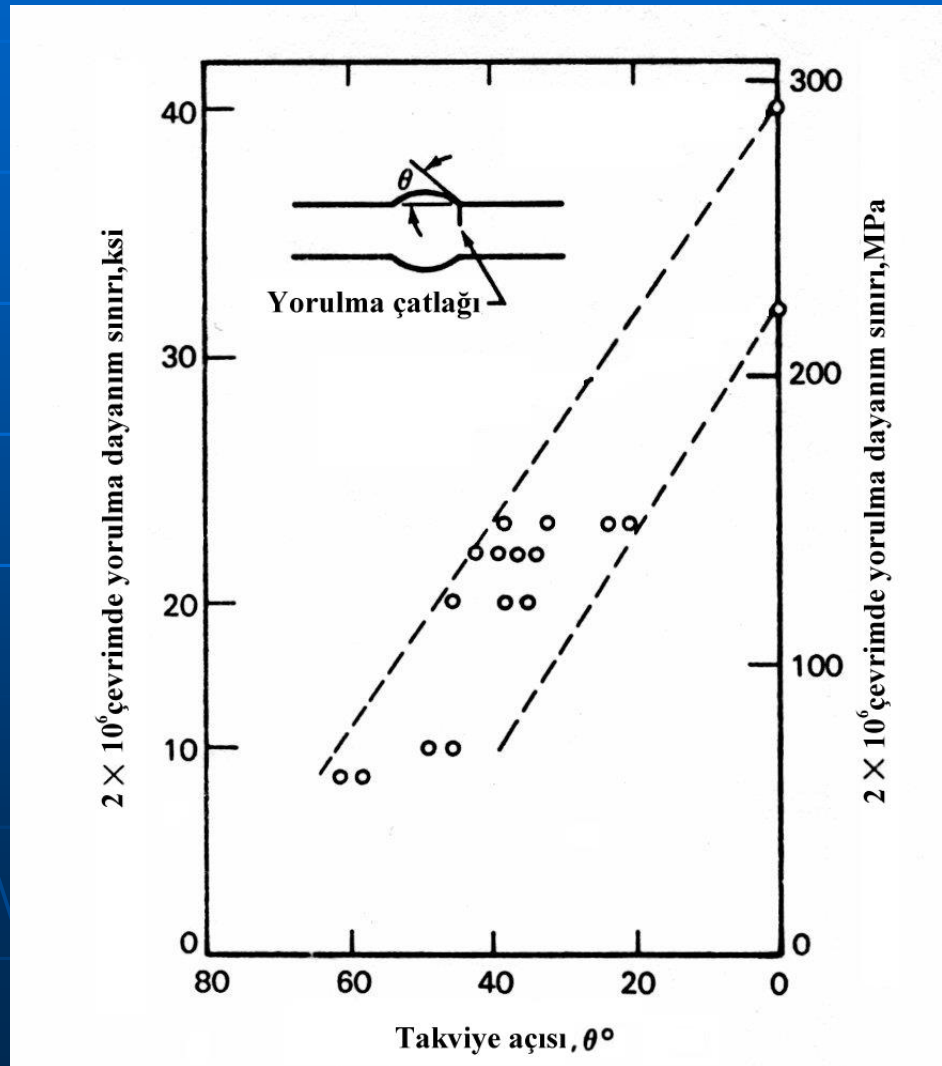
6- Çapraz dikişlerin çakışmaları önlenmelidir. Bu prensibe uygun olarak kazan konstrüksiyonunda dikişler aşağıdaki gibi tertip edilmelidir.



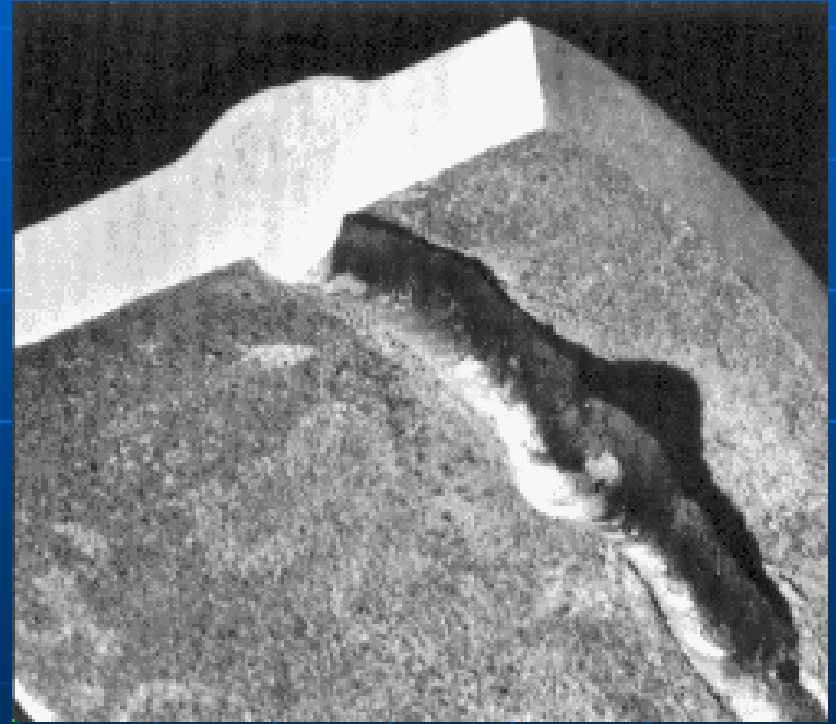
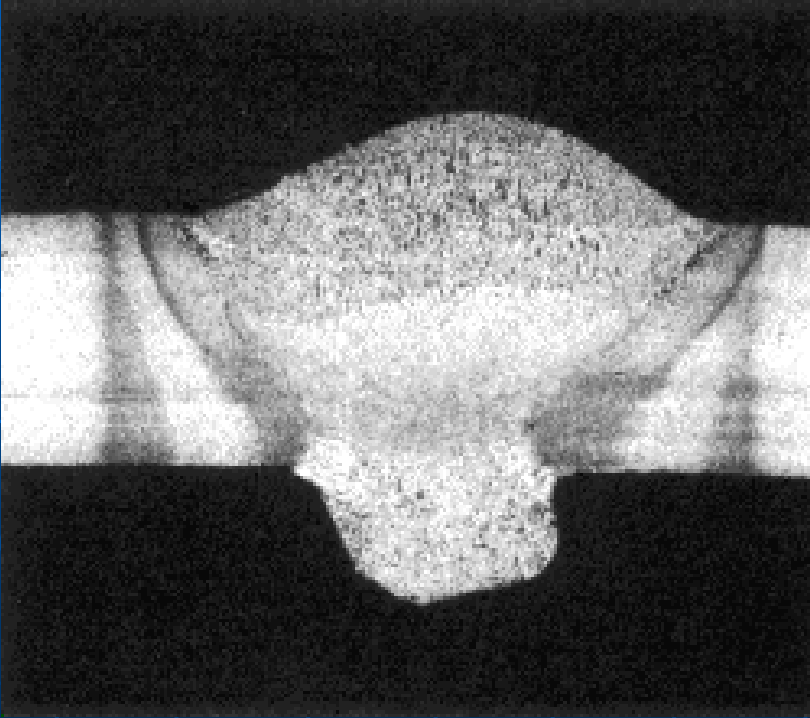
7- Kuvvet taşıyan dikişler en az 4 mm kalınlığında olmalıdır.

Kaynak konstrüksiyonuna ait esaslar

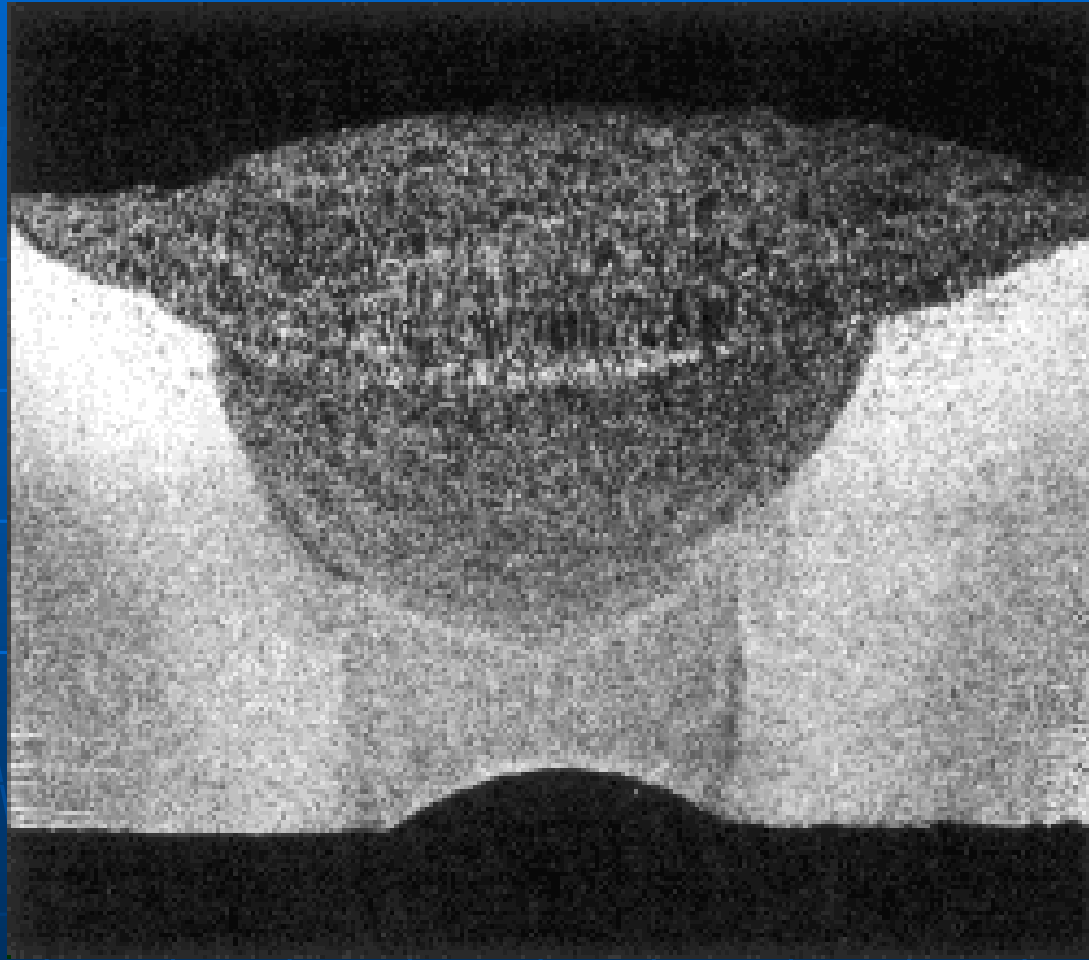
8- Dinamik yüklemeye maruz parçalarda kaynak takviye açısı (θ) küçük olmalıdır.



Fazla Nüfusiyyet

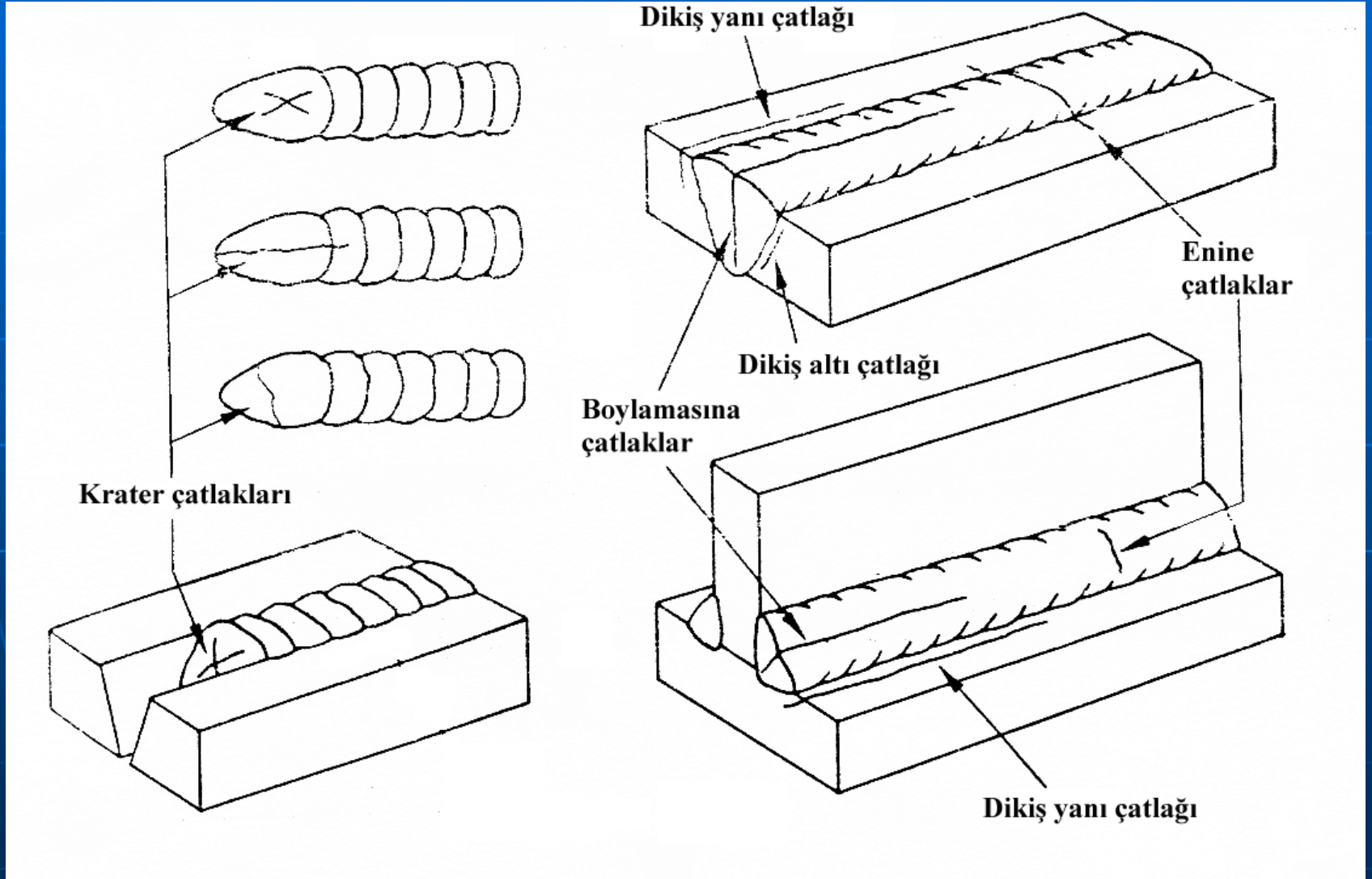


X3.5



Kaynaklı Parçalarda Çatlama Olgusu

Kaynaklı parçalarda oluşan çatlak tipleri



- **Krater Çatlaklar:** Kesintili kaynak yapıldığında kraterde çatlama eğilimi artar. Fazla derin olmayan sıcak çatlak türü olan bu çatlaklar yıldız şeklinde bulunabildiklerinden yıldız çatlaklar olarak da bilinirler. Krater çatlaklar ısı genleşme katsayısı yüksek metallerde örneğin ostenitik paslanmaz çeliklerde görülür. Bu çatlaklar boylamasına çatlakların başlangıcı olabilir.

- **Boylamasına çatlaklar:** Bu çatlaklar genellikle kaynak metalinin ortasında oluşan çatlakların kaynak zonunda ilerlemesi ile ortaya çıkar.

- **Enlemesine çatlaklar:** Bu çatlaklar kaynak eksenine dik olan ve kaynak metalinde bulunan çatlaklardır. Enlemesine çatlaklar ana metale doğru ilerlerler.

- **Dikiş yanı çatlakları:** Bu çatlaklar genellikle soğuk çatlak tipinde olup kaynak iç gerilmelerinin yüksek olduğu bölgelerde bulunur.

- **Dikiş altı çatlakları:** Bu çatlaklar ITAB bölgesinde oluşan soğuk çatlaklar olup oluşumu katı eriyikte hidrojen bulunmasına, mikroyapının çatlmaya duyarlı olmasına ve kalıntı gerilmenin yüksek olmasına bağlıdır. Kaynak dikişinin altında belirli aralıklarla yer aldıklarından ve yüzeye çıkamadıklarından çoğunlukla çıplak gözle görülemezler.

Hidrojen Kırılğanlığı

Atomik hidrojenin metale girmesi neticesinde ortaya çıkar. Hidrojen girişı, iç çatlak ve/veya boşluk oluşumuna, gevrekliğe ve özellikle yüksek sıcaklıklarda dekarbürizasyon ve kimyasal reaksiyon gibi yüzey olaylarına sebep olur.

YMK kristal yapıli metaller hidrojen kırılğanlığına duyarlı değildir.

Özellikle karbon ve az alaşımlı çeliklerde ağırlıkça %0.001 (ppm) mertebesinde hidrojen kırılğanlık için yeterli olabilir. Yüksek mukavemetli martensitik çelikler hidrojen kırılğanlığına çok duyarlıdır. Soğuk işlem hidrojen kırılğanlığı teşvik eder.

Çeliklerin mukavemeti arttıkça hidrojen duyarlılığı da artar.

Hidrojen, çeliğin sünekliğinin azalmasına, çatlamasına ve akma mukavemetinden düşük gerilmelerde gevrek kırılmasına neden olur.

Kaynaklı Parçalarda Çatlak Oluşum Nedenleri

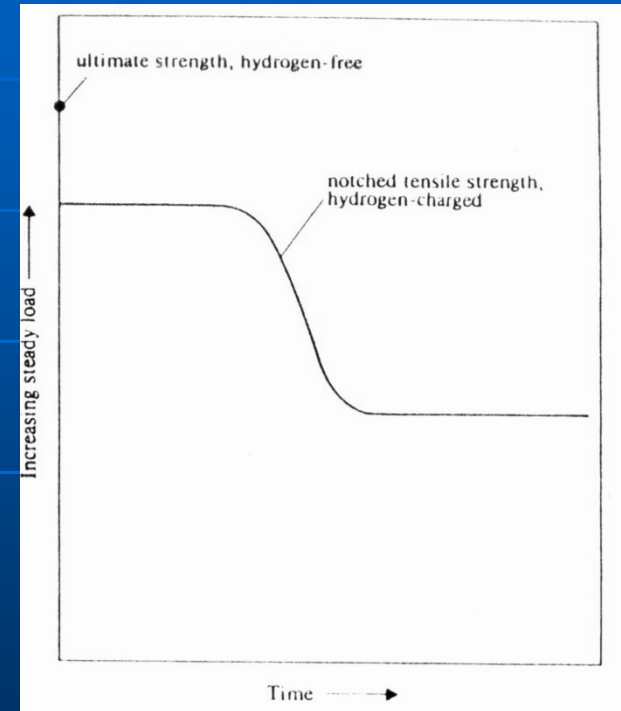


- Deformasyon hızı azaldıkça çeliklerin hidrojen kırılma hızına karşı hassasiyeti artar.
- Darbe deneyi ile hidrojen kırılma hızı ortaya çıkmaz. Düşük hızlı çekme, eğme, ileri-geri eğme deneyleri ile hidrojen kırılma hızına karşı hassasiyeti ölçmede kullanılır.
- Standart çekme deneyi ile % kesit daralması ve/veya % kopma uzaması ölçülerek hidrojen gevrekliği değerlendirilebilir.

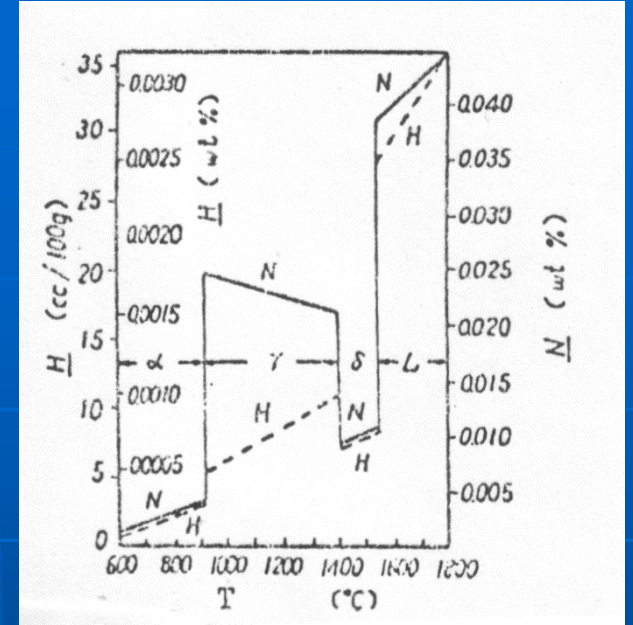
$$\text{Gevreklik Derecesi} = (\delta_o - \delta_h) / \delta_o$$

δ_o ve δ_h hidrojenli ve hidrojenli numunelerin kesit daralması

- Deney numunesinin çevresine V-çentik açıldıktan sonra numuneye farklı gerilmeler uygulayarak, her bir gerilme için çatlama veya kırılma süresi ölçülür.

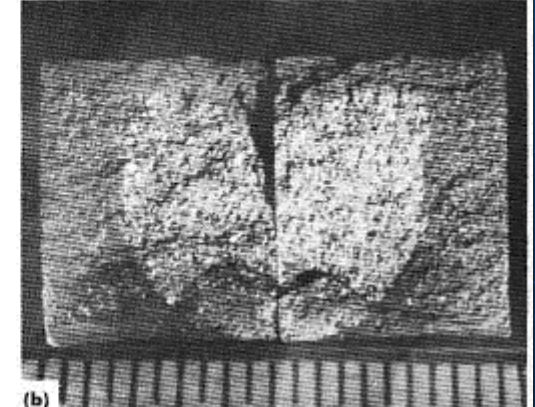
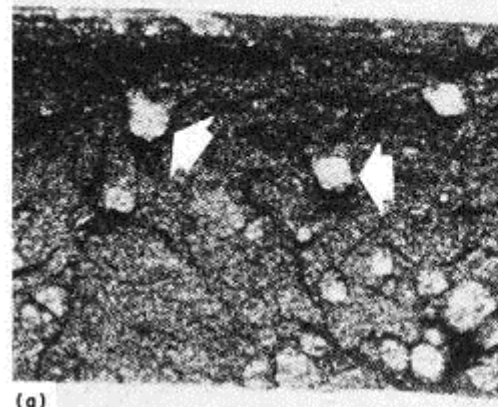


- Hidrojenin olumsuz etkisi orta sıcaklık düzeylerinde çok belirgindir. Çok yüksek sıcaklıklarda ve çok düşük sıcaklıklarda etkili değildir.
- Sıvı demirde ve ostenit içinde hidrojen çözünürlüğü yüksek oda sıcaklığında düşüktür. Hidrojen içeren çelik yüksek sıcaklıklardan hızla soğutulduğunda hidrojen dışarı kaçamaz ve malzeme içinde hapsolür. Bu durumda fazla hidrojen malzeme yüzeyine veya iç kısımlarına yayınarak yüksek basınçlı hidrojen paketleri oluşturur. Bu yüksek basınç çelikte çatlama ve/veya kırılmaya neden olur.



Macroscopic appearance of hydrogen flakes on a fracture surface

(a) Flaking in a 4340 steel. Arrows indicate individual flakes (fisheyes). Actual size. (b) Closeup of fracture surface containing the mating halves of a flake. Note the distinctive shiny appearance of the flake.



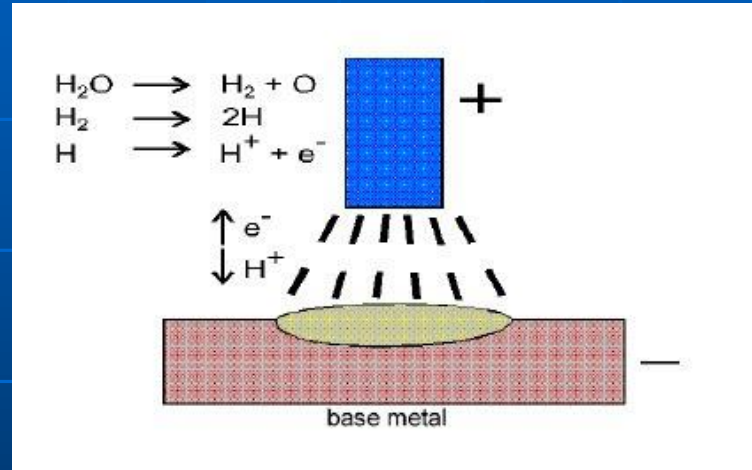
Hidrojen Kırılğanlığının Önlenmesi

1. Hidrojene karşı daha dayanıklı malzeme kullanmak (örneğin yüksek mukavemetli çelik yerine daha düşük mukavemetli çelik kullanmak)
2. Hidrojeni malzemedan uzaklaştırmak (malzemeyi 150-200°C'de tutmak)
3. Malzeme yüzeyinde basma yönünde gerilme oluşturmak (bilya püskürterek yüzeyi dövme)
4. Parça dizaynını değiştirmek (keskin köşeleri elemine etmek, kesit alanı artırmak, kalıntı gerilmeleri azaltmak)
5. Hidrojen girişine engel olmak

Çeliğe hidrojen girişi üretim aşamasında, kaynak sırasında, korozyon etkisi ile veya katodik koruma sırasında girebilir.

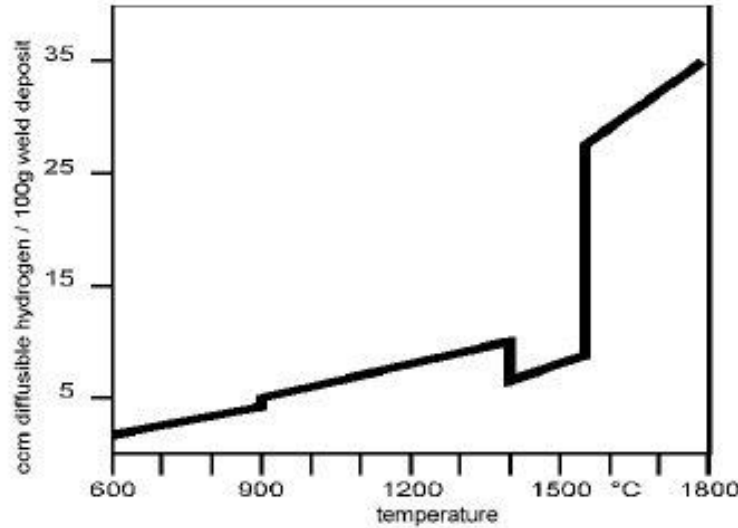
Kaynaklı Parçalarda Hidrojen Kırılğanlığı

- Kaynak işlemi sırasında hidrojenli bileşiklerin (kaynak bölgesindeki kir, yağ ve nem hidrokarbon, vb) kaynak arkı etkisi ile ayrışması sonucu oluşan hidrojenin kaynak banyosuna girmesi soğuk çatlakların temel nedenidir.

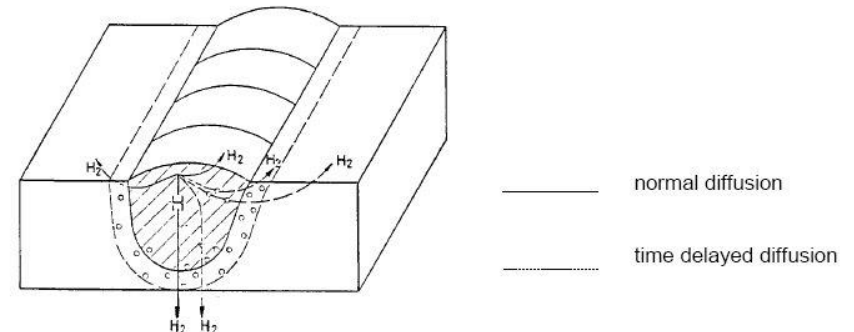
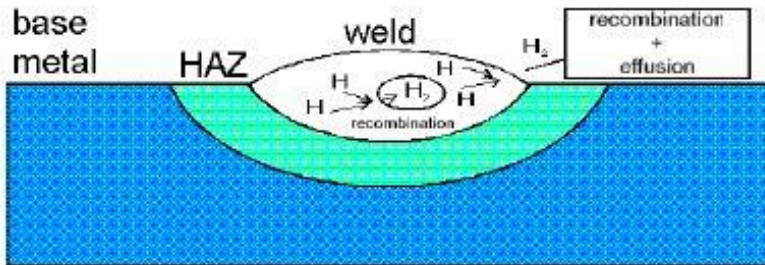


- Kaynak bölgesinin havadan iyi korunamaması da kaynak banyosuna hidrojen girişine sebep olabilir. En önemli hidrojen kaynağı, elektrod örtüsündeki veya flakstaki nemdir. Elektrod örtüsündeki hidrojen "potansiyel hidrojen" olarak adlandırılır. Bu nedenle kaynak işlemi öncesi elektrodlar kurutulmalı ve bazik elektrodlar tercih edilmelidir

- Kaynak metalinde hidrojen çözünürlüğü hidrojen kısmi basıncına ve sıcaklığa bağlıdır. Ark atmosferinde CO, CO₂ ve H₂O bulunması hidrojen kısmi basıncını etkiler. Hidrojen çözünürlüğü 1800°C'de yaklaşık 35 ml/100g olup, sıcaklığın azalması ile azalmaktadır. Katılaşma sonrası kaynak dikişinin hidrojen konsantrasyonu hızlı soğuma etkisi ile çözünürlük sınırını aşabilir. Bu durumda latis aşırı doymuş hale gelir.



- Katılaşılan kaynak metalinde hidrojen, atom çapı çok küçük olduğu için oda sıcaklığında bile yapısal hatalara (boşluklar, dislokasyonlar, tane sınırları gibi) doğru kolayca yayınabilir ve burlarda moleküler hale gelerek yüksek basınç oluşturur.
- Bu proses kaynak işleminden birkaç dakika veya birkaç ay sonra gelişebilir. Proses süresi; ana metalin bileşimi, ana metalin kalınlığı, mikroyapısı, porozite miktarı ve soğuk işlem durumu gibi faktörlere bağlıdır.
- Çatlama riskinin yüksek olması; hidrojen konsantrasyonunun yanı sıra, mikroyapının çatlığa duyarlı olmasına (martensitik), parçaya çekme gerilmelerinin (kalıntı gerilme) etki etmesi ve sıcaklığa da bağlıdır.



- Kaynak metalindeki hidrojen miktarının artması latisin gevrekliğini artırır. Süneklik (kopma uzaması ve kesit daralması) azalırken mukavemette (akma ve çekme) önemli bir değişim olmayabilir.
- Hidrojen etkisi ile kırılan malzemenin yüzeyinde balık gözü (fish eye) oluşumu söz konusudur. Hidrojen içeren kaynak metali yavaşça deforme edildiğinde balık gözü kaynaktan sonraki üç ay içinde oluşabilir.



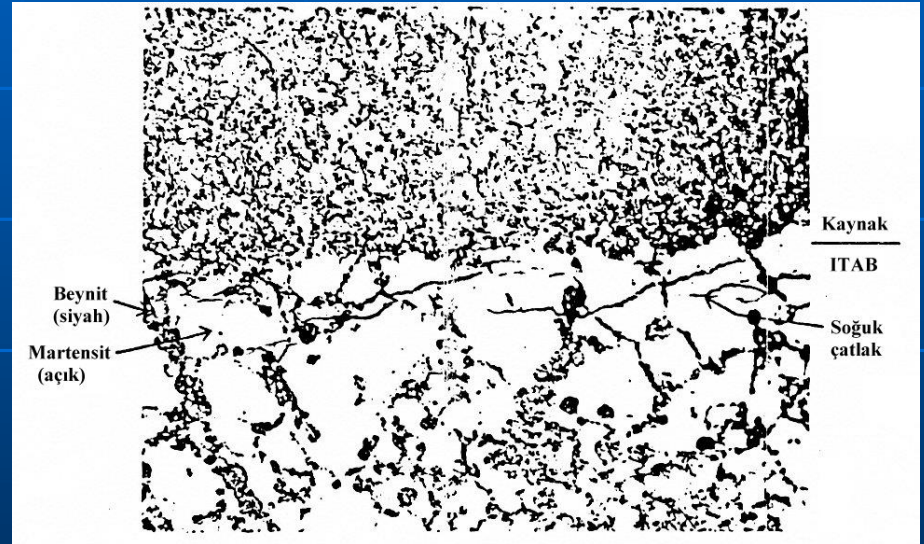
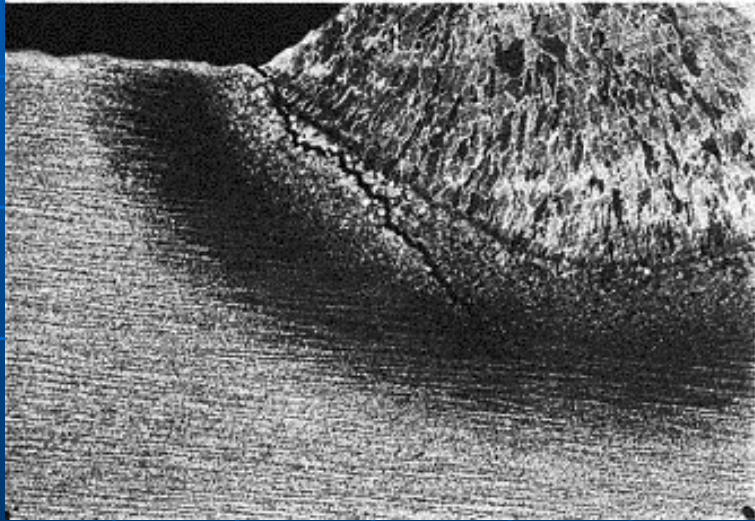
Fig. 101: Fischaugen im Schweißgut (4:1)

Fig. 101: Fish-eyes in weld material (filler) (4:1)

- Çoğu kaynak metalleri iyi kaynaklanabilirlik açısından ana metalden daha düşük karbon içeriğine sahip olduğundan, ITAB hidrojen çatlamasına karşı daha duyarlıdır.

Fig. 6 Hydrogen-induced toe cracking in the HAZ of a shielded metal-arc weld in low-carbon steel

Etched with 2% nital, 18 X. Courtesy of The Welding Institute



Hidrojenin zararlı etkileri

Süneklği (kopma uzaması ve kesit daralması) düşürür,

Mevcut çatlakların ilerleme hızını artırır,

Sabit yük altında gecikmeli çatlamaya neden olur,

Yorulma direncini düşürür,

Bazı durumlarda gerilmeli korozyon çatlamasını teşvik eder.

Cold Cracks

Generally, Tran-granular cracks

Short time cracking: during cooling process

Delayed cracking: after some time lapse at room temperature

Hydrogen is responsible for cold cracks



Root Crack



Heel Crack



Toe Crack



Crack under Bead

HAZ (Heat Affected Zone)

- Çeliklerin bileşiminde bulunan C, Mn, Mo, Cr, V, Nb ve Si gibi elementler ITAB'da martensitik dönüşümü teşvik ederek ve çatlak oluşma ihtimalini arttıırırlar. Alaşım elementlerinin martensit oluşumunu ve çatlama ihtimalini arttırması karbon eşdeğeri (C_{eş}) ile kontrol edilir.;

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6}$$

C_{eş} > 0.45 olan çelikler uygun tedbirler alınarak çatlama olmaksızın kaynaklanabilirler. Örneğin ön ısıtma ve kaynak sonrası tavlama ITAB'da çatlama riskini azaltır.

Ön ısıtma sıcaklığının belirlenmesi:

Yöntem 1

$C_{eş} < 0.45 \Rightarrow$ Ön ısıtmaya gerek yok

$0.45 < C_{eş} < 0.6 \Rightarrow$ Ön ısıtma sıcaklığı 100-200 °C

$C_{eş} > 0.6 \Rightarrow$ Ön ısıtma sıcaklığı 200-300 °C

Yöntem 2

$$T_{ön} = 350 \sqrt{[C] - 0.25}$$

$$[C] = [C_c](1 + 0.005 t)$$

$$360 \times [C_c] = 360C + 40(Mn + Cr) + 20Ni + 28Mo$$

Bu bağıntı karbon oranı % 0.25'e kadar olan çeliklere uygulanmaktadır.

Ön Isıtmanın Etkileri:

Kaynak metali ve ITAB'ın soğuma hızını düşürür,
Distorsiyonun ve artık gerilmelerin azalmasına sebep olur,
Kaynak işlemi için gerekli enerjinin (H_{net}) azalmasına neden olur

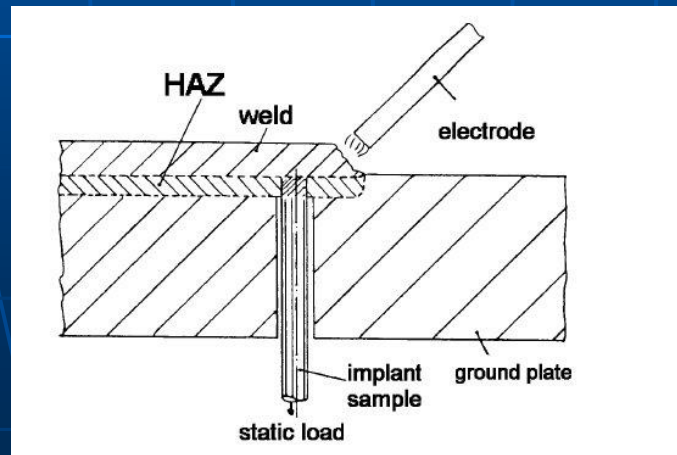
Kaynak sonrası ısıtma;

Gerilme giderme,
Boyutsal kararlılık,
Gerilme korozyon direncini artırmak,
Tokluğu ve mekanik özellikleri geliştirmek
amacıyla yapılır

- Hidrojen kırılganlığı kaynak işleminden günlerce sonra bile genellikle dikiş altı çatlakları, dikiş yanı çatlakları, enine çatlaklara şeklinde ortaya çıkabilir. Geçikmiş hidrojen çatlamaasının belirleme metodları şunlardır:

Akustik emisyon anailizi: Hidrojen etkisi ile oluşan mikro boyuttaki çatlaklar tahribatsız muaye yöntemleri ile belirlenebilir.

Implant test: Hidrojen gecrekliğine karşı duyarlılığı belirlemek amacıyla yapılır. Ana metalden imal edilen çentikli vida ITA'ı gerçek birleşmeye benzeyecek koşullrada kaynaklanır. Kaynak sonrası belirli koşullarda çatlayıncaya kadar sabit çekme gerilmesine maruz bırakılır. Bu metod ana metalin kaynağa uygunluğunu değerlendirme ve farklı malzemelerin hidrojen hassasiyetini karşılaştırma açısından çok uygundur. Dezavantajı çatlak düzleminin ergime sınırına paralel olacak şekilde ITAB'da lokalize olmasıdır.



- IIW'ye göre kaynak metalindeki hidrojen;
0 - 5ml H₂/100 g ise çok düşük seyide
5-10 ml H₂/100 g ise düşük seviyede
' 10-15 ml H₂/100 g ise orta seviyede
> 5 ml H₂/100 g ise yüksek seviyede olarak değerlendirilir.
HSLA çeliklerinin kaynak metalinde 5 ml H₂/100 g'dan daha az hidrojen bulunması istenir.

Hidrojen gevrekliğinin sebepleri özet olarak şunlardır;
Elektroddaki nem miktarı yüksek olması,
Ana metalin yüksek sertlik ve mukavemette
olması,
Ana metalin et kalınlığının 20 mm nin üstünde
olması,
Kaynak öncesi ön ısıtma yapılmaması

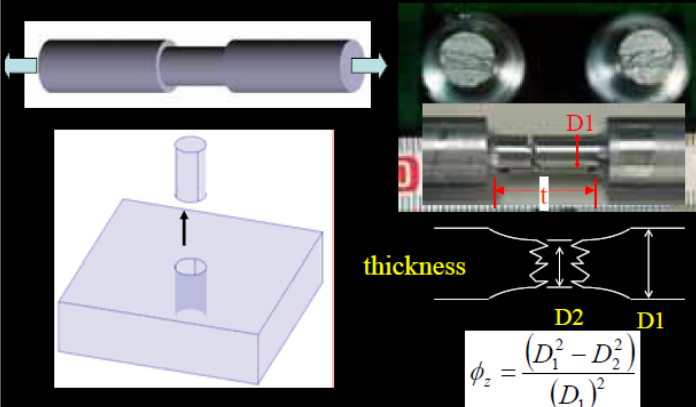
Hidrojen gevrekliği riskini azaltmak için;
Kaynak öncesi parça yağ ve nemden arındırılmalıdır,
Parça ön ısıtmaya tabi tutulmalıdır,
Kaynak işlemi için bazik elektrotlar tercih edilmelidir
Elektrodlar kaynak öncesi kurutulmalıdır.

Lameler Yırılma:

- Yüksek lokalize gerilmeler etkisi ile ve levhanın kalınlık kesitinde sünekliğin düşük olması nedeniyle ana metalde oluşan çatlama değildir.
- Haddelenme sırasında levhanın kalınlık yönündeki sünekliğini olumsuz yönde etkileyecek şekilde anizotropi gelişir. Sıcak haddelenmiş levhada anizotropinin gelişmesine yapıda MnS ve oksit tipi kalıntılar sebep olur. Yırılma inklüzyon ile matris arasında boşluk oluşumu ve birleşmesi ile gelişir.
- Kalınlık yönünde çekme testi yapılarak (Z testi) levhanın lameler yırılma eğilimi belirlenebilir.

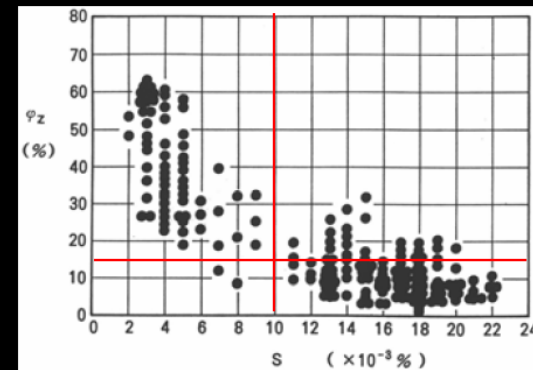
Z-tension tests

- Φ_z : Reduction of Area in Thickness Direction (Z-Direction)
Tension tests



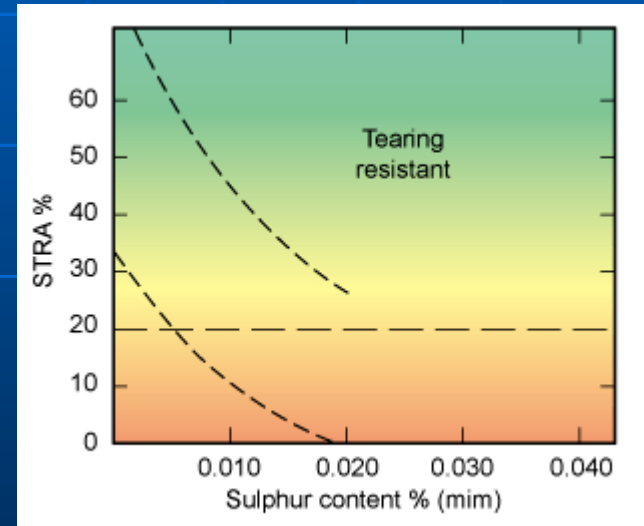
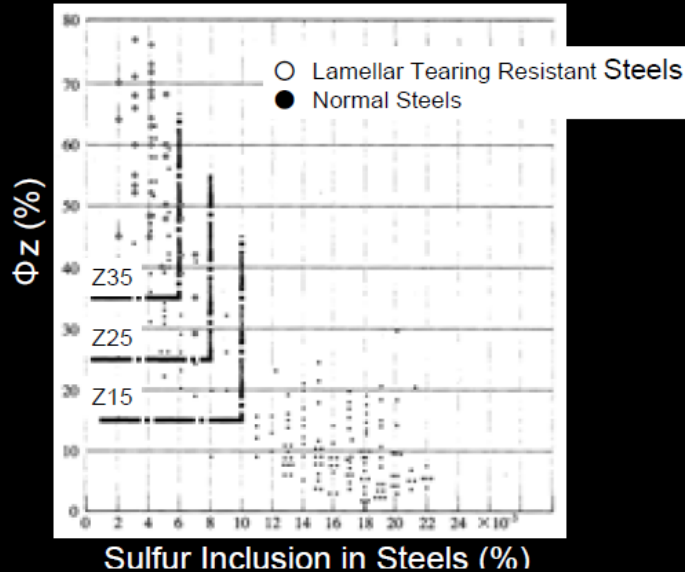
Φ_z and Sulfur Inclusion in Steels

- If $S > 0.01\%$ then many of the z-tension test results are $\phi_z < 15\%$.



- Z testi sonuçlarına göre levhalar DIN EN 10164 normunda Z15, Z25 ve Z35 olmak üzere 3 kaliteye ayrılmıştır. Buradaki rakam ortalama kesit daralmasıdır.
- Çekme mukavemeti 460 N/mm² olan ince taneli bir çeliğin ortalama kesit daralması % 35 ise (Z35 sınıfında ise) S460N-Z35 şeklinde gösterilir.

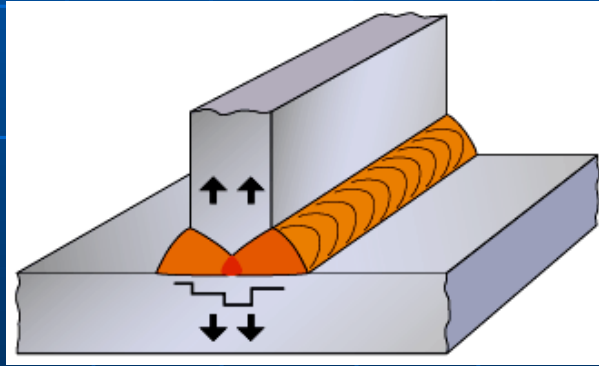
Lamellar Tearing Resistant Steels



- Kaynaklı parçalarda lameler yırtılma çekme gerilmesi etkisi ile ana metalin kalınlık kesitinde, sünekliğin düşük olması nedeniyle ortaya çıkar. Kalınlık yönündeki kesit daralması %15'den düşük olan çelik levhaların lameler yırtılma eğilimi yüksektir.

- Çelik yapısında bulunan uzamış inküzyonların mevcudiyeti lameler yırtılmayı teşvik eder. Kalınlığı 25 mm'den fazla olan yüksek mukavemetli çelik levhaların lameler yırtılma eğilimi yüksektir.

- Lameler yırtılma çoğunlukla ergime sınırının levha yüzeyine paralel olduğu kaynaklarda (köşe, T kaynak) görülür. Genellikle kaynak uzunluğu 20 mmden fazla olduğunda oluşur.

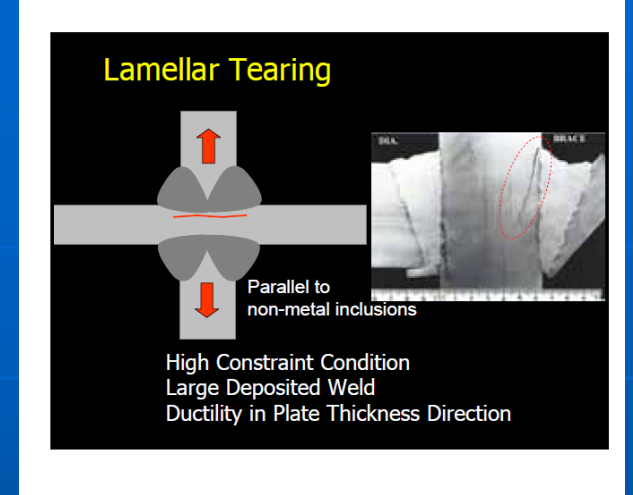


- Lameler yırtılmanın gelişiminde kükürt ve silikat inklüzyonları önemli rol oynar. Düşük karbonlu çeliklerde hidrojen lameler yırtılmayı teşvik eder.

- Kaynak bölgesine, levha yüzeyine dik olacak şekilde yüksek çekme kuvveti uygulanmasıyla lameler yırtılmayı teşvik eder. Çatlama genellikle kaynak sınırına yakın veya birkaç mm mesafede olup, levha yüzeyine paraleldir.

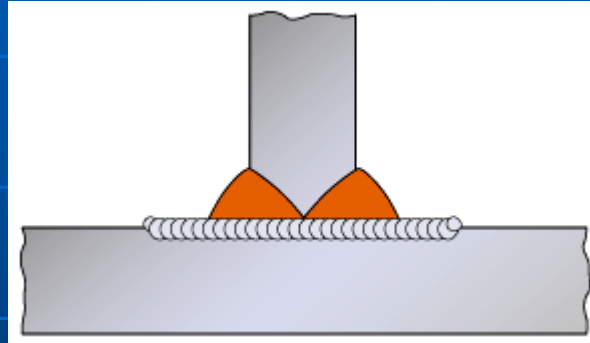
- Kırılma yüzeyi lifi görünümüne sahiptir

- Lameler yırtılma etkisi ile yüzeyde oluşan çatlaklar gözle muayene, sıvı penetran veya manyetik parçaçık yöntemi ile belirlenebilir. İç çatlaklar ultrasonik muayene yöntemi ile belirlenebilirse de bunları incluzyon bantlarından ayırt etmek güçtür. Çatlaklar oryantasyonu nedeni ile radyografik yöntemlerle belirlenemez.



- Lameler yırtılmanın gelişebileceği muhtemel bölgeler taşlama veya talaşlı işleme yöntemleri ile kaldırıldıktan sonra daha düşük mukavemetli kaynak metalı ile doldurulabilir (buttering).

• **Buttering with low strength weld metal**



Lameler yırtılma etkisi ile oluşan çatlaklar keskin köşeli lineer hatalardır. BS EN ISO 5817:2003 standardının B, C ve D kalite seviyeleri bu hatalara müsaade edilmez.

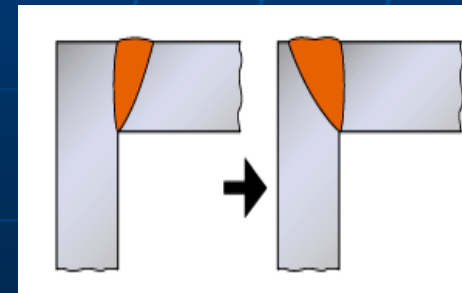
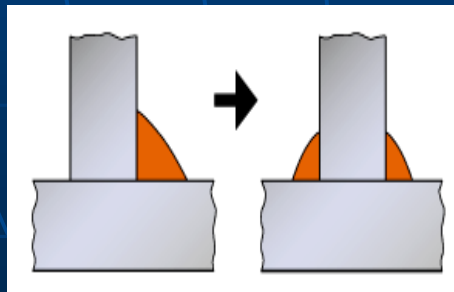
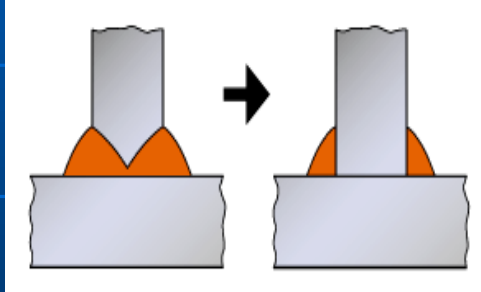
- Lameler yırtılma riski;

Kalınlık yönündeki gerilmeleri azaltacak şekilde dizayn değişikliği yapılarak,

Düşük inklüzyonlu çelik kullanılarak ($S < \% 0,007$)

Döküm/dövme çelik kullanılarak

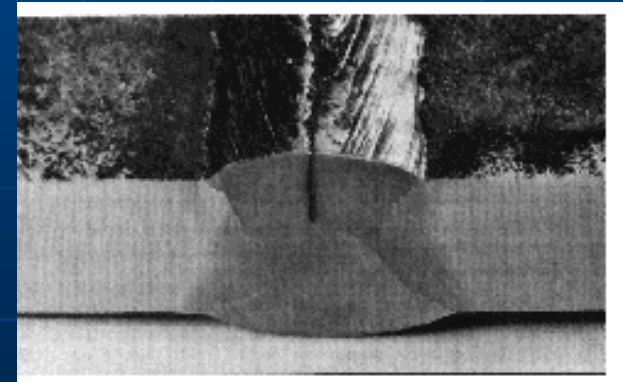
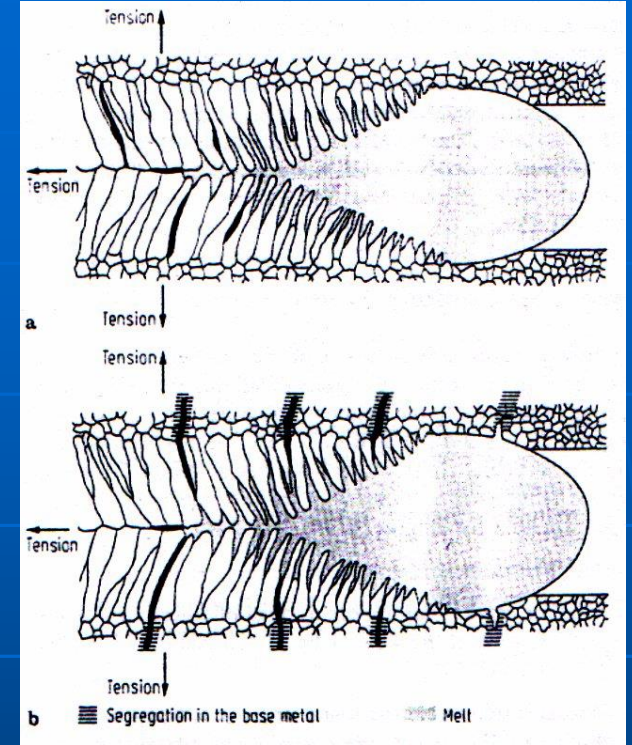
Bazı durumlarda ön ısıtma uygulayarak
azaltılabilir.



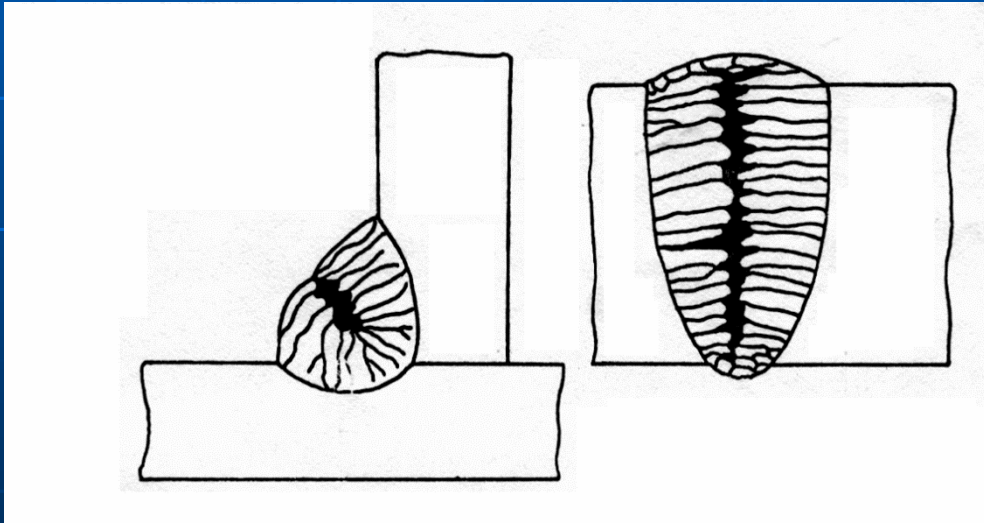
Katılma Çatlakları:

- Kaynak ısı etkisi ile kaynak dikişinde ve ITAB'da çatlama oluşabilir.
- Kaynak dikişindeki çatlama kaynak metali katılma sırasında meydana gelir (**katılma çatlakları**).
- Ana metalin yapısında ergime sıcaklığı düşük fazlar mevcutsa, kaynak ısı etkisi ile bu fazlar ITAB'da çatlama neden olabilir (**ergime çatlakları**).

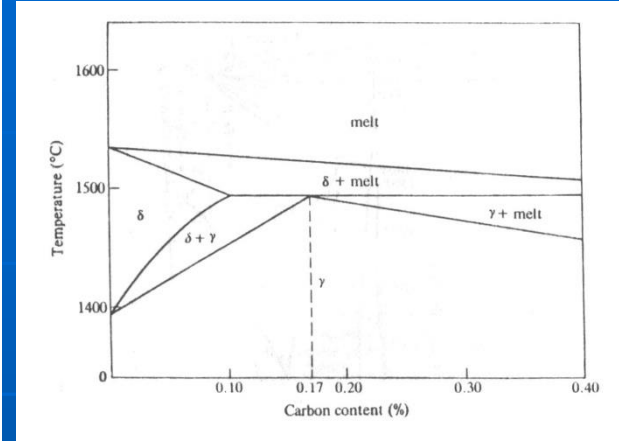
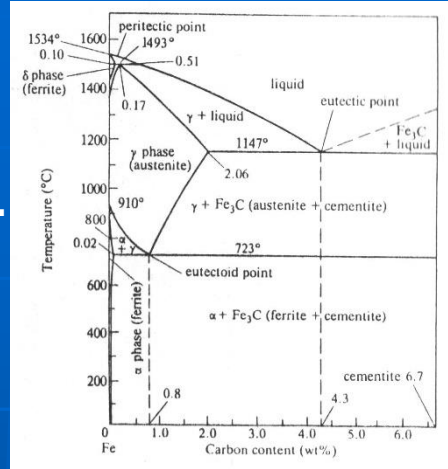
- Katılma sırasında dentritin iç kısmı ile dentritler arasında bileşim farkı mevcut ise dentritler arasında ergime sıcaklığı düşük fazlar oluşur. Katılmanın son aşamasında da katılmış dentritler arasında ergime sıcaklığı düşük sıvı fazlar yer alır. Kaynak, katılma sırasında büzülürken oluşan çekme gerilmeleri dentritler arasında çatlamaya neden olur.
- Kaynak metalinin sıcak çatlaması her zaman tanelerarası karaktere sahiptir.



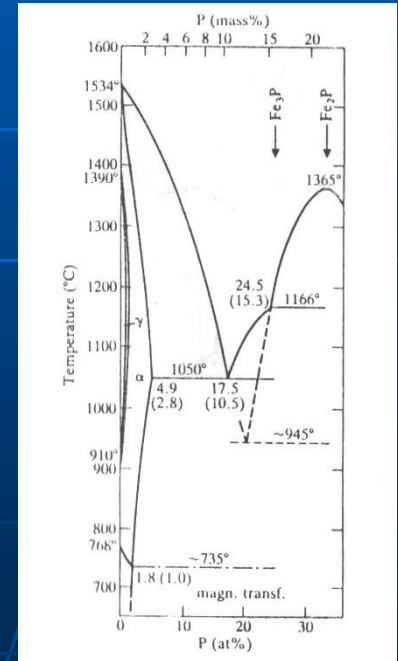
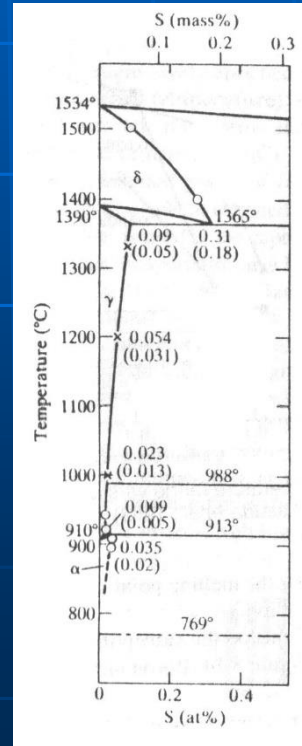
- Çoğunlukla sıcak çatlama çeliklerde, paslanmaz çeliklerde, nikel alaşımlarında düşük ergime sıcaklığına sahip sıvı film nedeniyle oluşur.
- Çeliğin manganez içeriği arttıkça sülfürlerin ergime sıcaklığı artar ve sıcak çatlama ihtimali azalır.

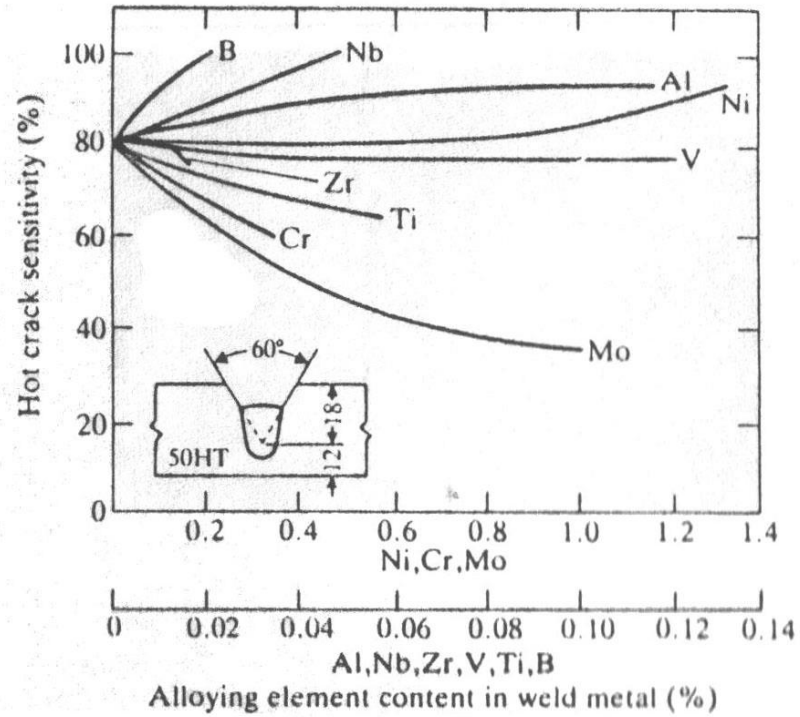


- % 0,1'den daha az karbon içeren çelikte katılaşma δ -Fe fazında olurken, daha yüksek oranda karbon içeren çelikte δ -Fe oluştuğundan sonra 1500°C'de perlitik reaksiyon gerçekleşir ve geri kalan kaynak metali γ -Fe olarak katılaşır.



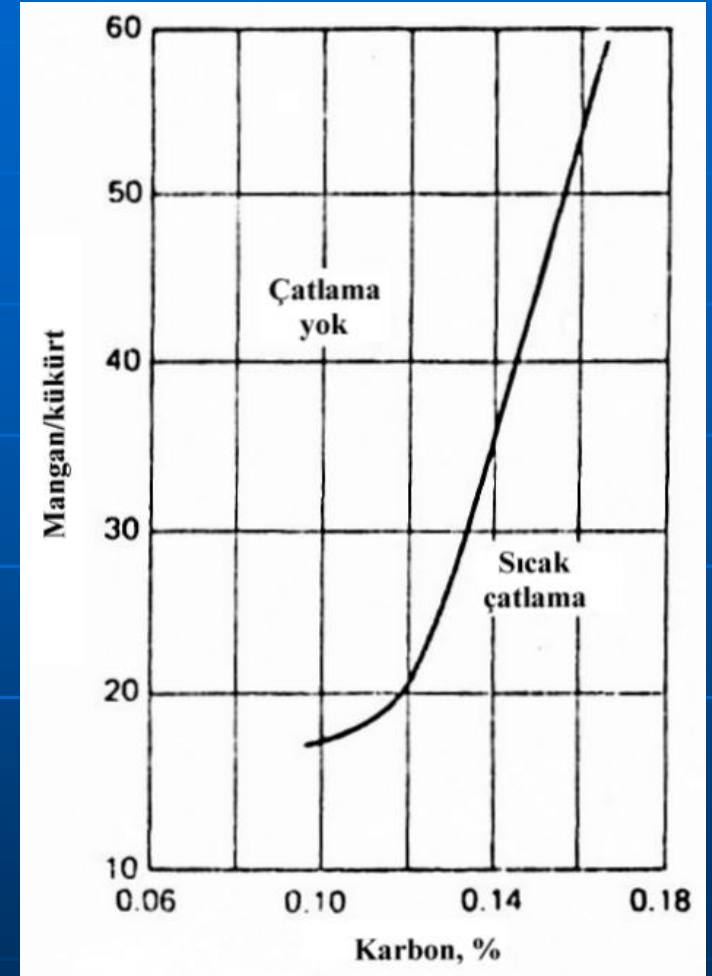
- Kükürtün δ -Fe'de çözünürlüğü yüksek γ -Fe 'de ise düşük olduğundan, fazla kükürt tane sınırlarına doğru itilir ve tane sınırlarının zayıflamasına neden olur.
- Fosfor da benzer etki yapar





- Çeliğe manganez ilavesi ile katılaşma sırasında çatlama riski azalır.
- Katılaşma sırasında çatlama riskini azaltmak için kaynak metalinin:
 - * Karbon, kükürt, fosfor niyobyum içeriği düşük olmalı,
 - * Manganez içeriği Mn/S oranı ayarlanarak belirlenmelidir.

Kaynak dikişinin profili konveks yapılarak ve kaynağa etki eden çekme gerilmeleri azaltılarak sıcak çatlama riski azaltılabilir.



Sıcak çatlama hassasiyet faktörü:

$$UCS = 230 \%C^* + 190 \%S + 75 \%P + 45 \%Nb - 12.3 \%Si - 5.4 \%Mn - 1$$

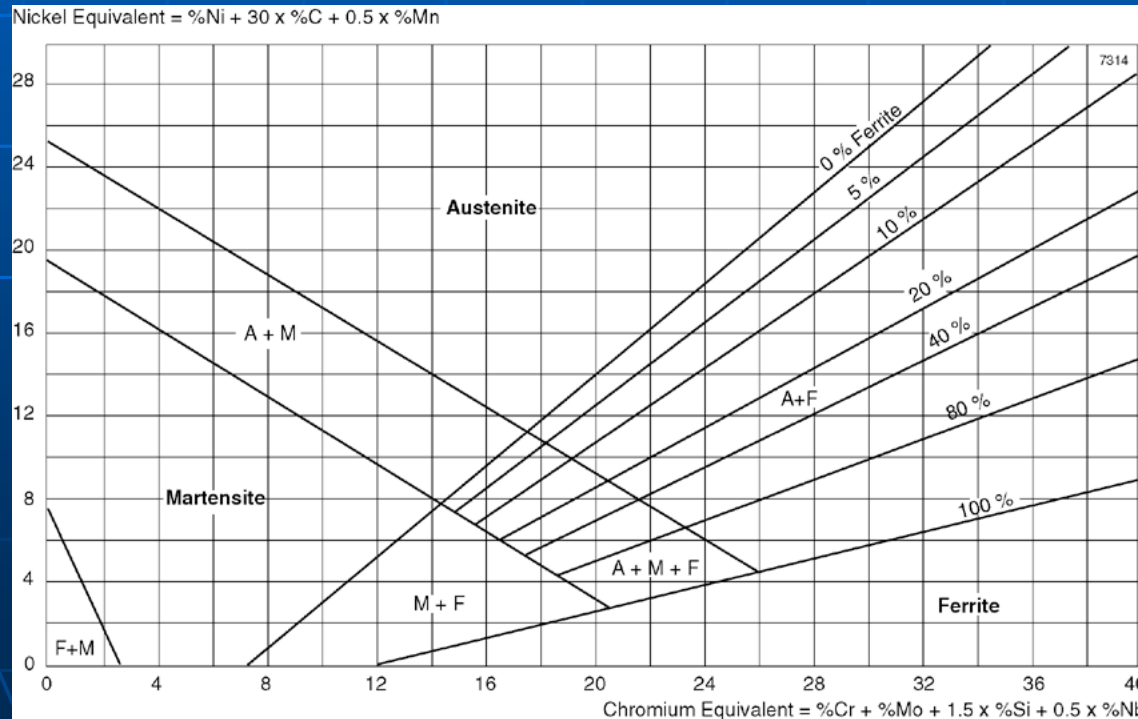
$C < \% 0.08$ ise $C^* = 0.08$ alınır.

T köşe kaynağında $UCS > 19$ ise:
Alın kaynağında $UCS > 25$ ise
sıcak çatlama ihtimali yüksektir.

Ostenitik paslanmaz çeliklerde sıcak çatlak oluşum riski; dolgu metali ve ana metalin kimyasal bileşimi ostenitik matris içinde en az % 4 ferrit bulunacak şekilde ayarlanması ile azaltılabilir. Ferrit tane sınırlarına yerşerek sıcak yırtılmayı engeller.

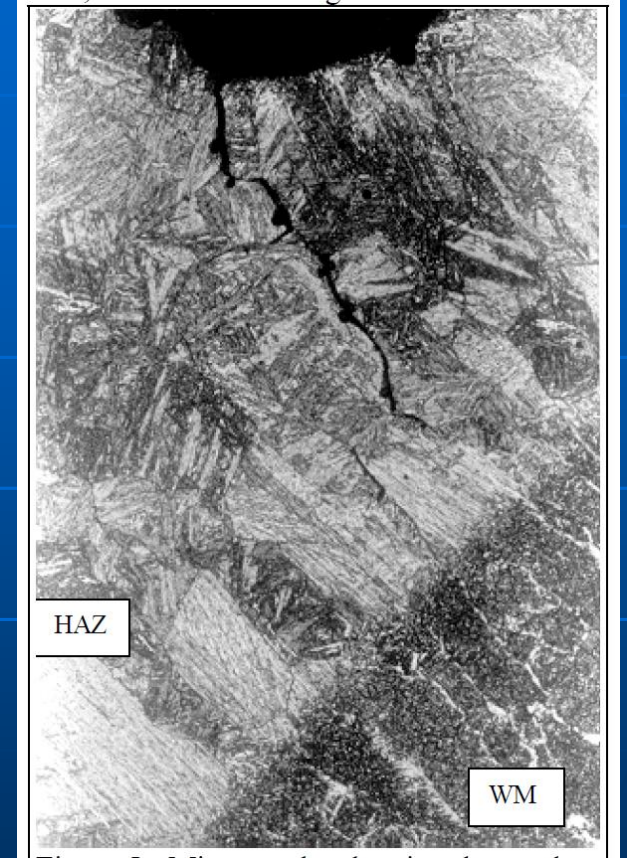
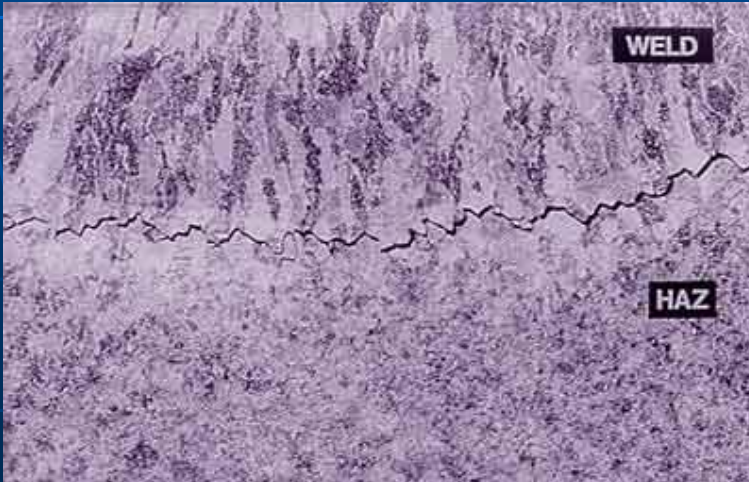
Ferritin daha yüksek olması çeliğin korozyon direncini olumsuz yönde etkiler

Kaynak metalinin S ve P mümkün olduğunca düşük olmalıdır.



Yeniden Isıtma Çatlakları:

- Kaynak işlemi sonrasında yapılan ısıtma işlemi (gerilme giderme tavlama) veya servis sırasında yüksek sıcaklıklara (450-700°C) ısınma sonucunda meydana gelen çatlama, yeniden ısıtma çatlama olarak isimlendirilir.
- Yeniden ısıtma çatlakları genellikle tane sınırları karakterli olup, ITAB'nin iri taneli yerinde, ergime sınırının bir iki tane ötesinde görülür. Bazen kaynak metalinde de oluşabilir.



Yeniden ısıtma çatlakalarının oluşumu; bileşime, mikroyapıya, kalıntı gerilmelerin mevcudiyetine ve sıcaklığa bağlıdır.

Bileşimde Cr, Cu, Mo, B, V, Nb ve Ti gibi elementler bulunan alaşımlı çeliklerin çatlama eğilimi yüksektir.

İki farklı kırılma morfolojisi sergileyebilir.

- i. Taneleri keserek kırılma: 450-600°C sıcaklıklara ısıtma ile ortaya çıkar. Kırılmada gerilme konsatrasyonu, çatlaklar rol oynar.
- ii. Tane sınırı kırılması: 600°C'den yüksek sıcaklıklara ısıtma sonrasında ortaya çıkar. İnklüzyon, karbür gibi ikinci faz partikülleri ile matris arayüzeyinde boşluk oluşumu ile gelişir.

- Düşük sünekliğe sahip mikroyapı (ör. Beynit) yüksek sıcaklık gevrekliğine duyarlıdır.

- İri taneli malzemenin çatlama riski ince taneli malzeden daha yüksektir.

- Yeniden ısıtma çatlakları genellikle 50 mm'den daha kalın kesitlerde ortaya çıkar.

- Çatlama genellikle ısıtma aşamasında olur, ısıtma hızı etkili parametre değildir.

- Molibden, Krom-Molibden, Molibden- Vanadyum ve Molibden – Bor çelikleri özellikle % 0.1’den daha fazla oranda vanadyum içerdiklerinde yeniden ısıtma çatlaması duyarlılığını artırır. Ostenitik krom – nikel çelikleri ve bazı nikel esaslı alaşımlarda da yeniden ısıtma çatlaması görülebilir..
- Çoğunlukla kalın kesitli HSLA çeliklerde kaynak sonrası ısıtma işlem sırasında ortaya çıkar. Çentik ve hataların mevcudiyeti çatlamayı teşvik eder.
- Cr, Mo ve V içeren çelikler çatlamaya çok duyarlıdır. Çeliklerin yeniden ısıtma çatlamasına duyarlılığı
$$P = Cr + 3.3 Mo + 8.1 V - 2$$
$$P = Cr + Cu + 2Mo + 10V + 7Nb + 5Ti - 2$$
bağıntıları ile hesaplanan P değerinin sıfır veya sıfırdan büyük olması halinde yüksektir.

Yeniden ısıtma çatlamasının önüne geçebilmek için;

- Isıl işlem düşük sıcaklıkta yapıldıktan sonra yüksek sıcaklığa çıkılmalıdır,
- Kaynak işleminden sonra taşlama veya peening yapılmalıdır,
- ITABtaki iri taneleri inceltmek için iki pasolu kaynak yapılmalıdır,
- Uygun malzeme seçilmelidir. (P değeri düşük ve vanadum içeriği %0,1'den az),
- Kalıntı gerileme en az olacak şekilde dizayn yapılmalıdır,
- Yüksek ön ısıtma sıcaklığı ve mukavemeti düşük kaynak metali seçilmelidir,
- Kaynak sonrası yapılan ısıl işlem sonrasında tahribatsız muayene yapılmalıdır.