



PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK KABİLİYETİ

- Çeliğin içerdiği krom miktarı % 12'den daha fazla olması durumunda ince bir krom oksit tabakası oluşur ve bu tabaka yüzeyi pasif hale getirir ve dış tesirlere karşı korur.
- Bu durum çeliği atmosferin olumsuz etkilerinden koruduğu gibi, HNO_3 (nitrik asit) gibi oksitleyici asitlere karşı da korur, buna mukabil sadece krom içeren çelikler HCl (klorik asit) ve H_2SO_4 (sülfürik asit) gibi redükleyici asitlere karşı dayanıklı değildirler. Bu asitler yüzeyi koruyan kromoksit tabakasını ortadan kaldırırlar.
- Endüstride oluşturulan paslanmaz çelikler, redükleyici asitlere karşıda iyi bir mukavemet gösteren ve bileşimlerinde kromun yanı sıra yüksek miktarda nikel ve molibden ihtiva ederler.

Günümüz endüstrisinde kullanılan paslanmaz çelikler

- 1.Kromlu martenzitik paslanmaz çelikler*
- 2.Kromlu ferritik paslanmaz çelikler*
- 3.Krom-nikelli ostenitik paslanmaz çelikler.*
- 4. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler*
- 5. Dupleks paslanmaz çelikler*

Bu guruplar birbirlerinden; çeliğin bileşimi, iç yapısı, dolayısıyla kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler bakımından büyük farklılıklar gösterir. Kaynak kabiliyetine de büyük ölçüde etki eder.

III.2.1. Kromlu Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

- Bu guruba giren paslanmaz çelikler genel olarak % 6'dan az krom ihtiva ederler; bileşimlerdeki karbon miktarı % 0.10 ilâ % 1.2 arasında değişir; yüksek miktarda karbon ihtiva edenlerde krom miktarı % 18'e kadar çıkabilir.
- Bu tür çeliklerin kritik soğuma hızları çok yavaştır (yani TTTde burun oldukça sağdadır), dolayısıyla bunlarda martenzit teşekkülü çok yavaş bir soğuma halinde, örneğin sakin havada soğumada bile meydana gelir.
- Martenzitik halde sertleşmiş vaziyette korozyon dirençleri gayet iyidir. 815°C'ye kadar paslanmazlık özelliklerini yitirmezler, yalnız uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kalırlarsa hafif bir korozyon başlangıcı olur bu bakımdan bunlar endüstride sürekli olarak 700°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılamazlar.

Bu tür paslanmaz çeliklerde, çok yavaş bir soğuma halinde bile en kalın kesitlerde dahi martenzit oluştuğundan, ITAB'de ani soğumanın oluşturduğu gerilmeler, kaynak kabiliyetini büyük ölçüde etkiler.

Az karbonlu martenzitik paslanmaz çelikler bir takım tedbirler alınarak kaynak edilebilir, yüksek karbonlular ise mümkün mertebe kaynak edilmemelidirler.

Az karbonlu martenzitik paslanmaz çeliklerde, martenzit nispeten daha az serttir ve dolayısıyla çatlamaya karşı daha az eğilimlidir. Normal olarak bu çelikler kaynaktan evvel bir ön tavlama tabi tutulur. Ancak uygulanan ön tavlama yüksek karbon eşdeğerli çelikler halinde olduğu gibi ITAB'de bir sertlik azalması meydana getirmez. Sadece oluşan ısı gerilmeleri azalttığından çatlama ihtimalini azaltır. Bu tür çelikler için uygulanan ön tav derecesi 200-300°C'dir.

Kaynak bölgesinde daha tok bir yapı elde etmek ve servis anında parçada ortaya çıkabilecek çatlama olasılığını ortadan kaldırmak gayesiyle parçalar mümkün olan hallerde, hemen kaynaktan sonra, parça soğumadan bir gerilme giderme tavlamasına tabi tutulmalıdır. En iyi süneklik ve tokluk parçanın 800-820°C de 4 saat süre ile tavllanması ve takiben çok yavaş bir şekilde tercihan fırında soğutulması neticesinde elde edilir.

Kromlu martenzitik paslanmaz çeliklerin kaynağında, kaynak dikişinin mukavemetinin çok önemli olmadığı ve parçanın da kükürtlü bir ortamda bulunmadığı hallerde ostenitik kaynak metali kullanılır.

Ostenitik kaynak metalinin akma sınırının düşük olması kaynaktan sonra oluşan kendini çekme gerilmelerinin oluşturduğu çatlama ihtimalini ortadan kaldırır.

Yüksek karbon içeren (% 0.5-1.2) martenzitik paslanmaz çelikler bütün bu tedbirler yardımı ile dahi sağlam bir şekilde kaynak edilemezler.

Problem: *ITAB'de ani soğumanın oluşturduğu gerilmeler, kaynak kabiliyetini büyük ölçüde etkiler. Çatlama rizikosunu ortaya çıkarır.*

Çare: *Kaynaktan hemen sonra, parça soğumadan bir gerilme giderme tavlamasına tabi tutulmalıdır. En iyi süneklik ve tokluk parçanın 800-820°C de 4 saat süre ile tavllanması ve takiben çok yavaş bir şekilde tercihan fırında soğutulması neticesinde elde edilir.*

Dikişi mukavemetinin çok önemli olmadığı ve parçanın da kükürtlü bir ortamda bulunmadığı hallerde ostenitik kaynak metali kullanılır. Ostenitik kaynak metalinin akma sınırının düşük olması kaynaktan sonra oluşan kendini çekme gerilmelerinin oluşturduğu çatlama ihtimalini ortadan kaldırır.

III.2.2. Kromlu Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

- Bu tür paslanmaz çelikler bileşimlerinde % 16 ilâ % 30 krom ve % 0.05-0.25 karbon içerirler. Büyük miktarda krom ve çok az miktarda karbon içerdiklerinden bunlarda yüksek sıcaklıklarda veya sıvı halden itibaren soğutulmaları esnasında hiç veya çok az ostenit meydana gelir, dolayısıyla ostenit-ferrit dönüşmesi yoktur.
- İç yapıları normal olarak ferrit ve karbürlerden meydana gelmiştir. Bu tip çeliklerin en önemli özellikleri, katı halde bir faz dönüşmesi meydana gelmediğinden su verme yolu ile sertleştirilememeleri ve yüksek sıcaklıklarda korozyon ve oksidasyon dirençlerinin yüksek olmasıdır.
- Bu tür çeliklerin sertleştirilebilmeleri ancak soğuk şekil değiştirme ile mümkündür. Az miktarda soğuk şekil değiştirmenin dahi meydana getirdiği sertlik çeliğin biçimlendirilmesini zorlaştırdığından kullanma alanları azdır. Bu çelikler soğuk şekil değiştirme sertleşmesini ortadan kaldırmak için 750°C ilâ 800°C sıcaklıklarında yumuşatma tavlamasına tabi tutulurlar.
- Bu tür paslanmaz çelikler, su verme yolu ile sertleştirilemediklerinden ITAB'de martenzit oluşumu tehlikesi meydana gelmez, bu bakımdan martenzitik paslanmaz çeliklere nazaran daha kolay kaynak edilirler.

Kromlu ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında karşılaşılan en önemli sorun, kaynak esnasında ITAB'nin bir kısmı 1150°C'nin üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısınır ve bu bölgede aşırı bir tane büyümesi meydana gelir.

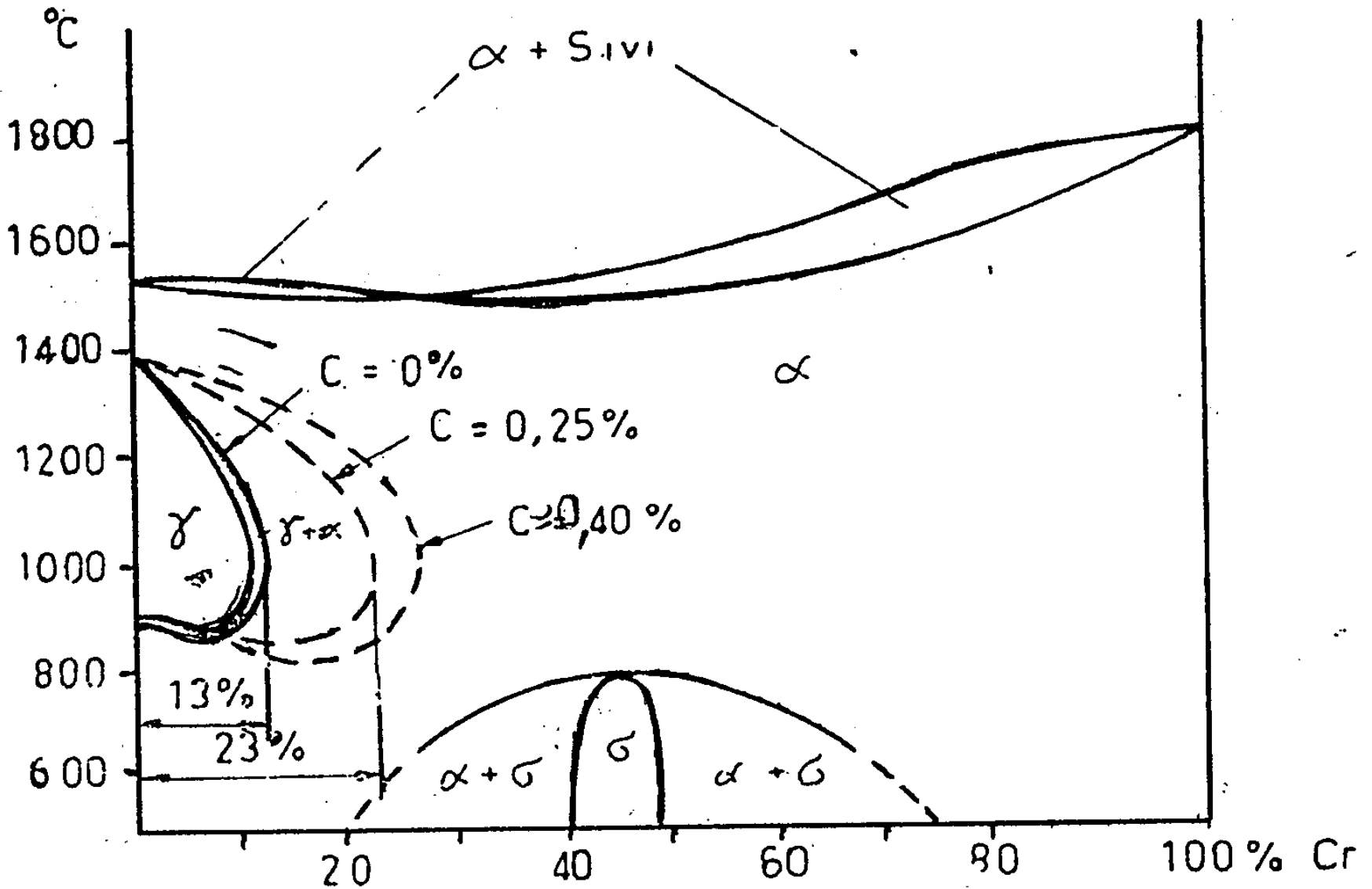
Bu tür çeliklerde katı halde östenitin ferrite dönüşmesi olayı meydana gelmediğinden bir ısıl işlem yardımı ile taneleri küçültmenin imkanı yoktur. Normal halde ferritik paslanmaz çelikler çok ince taneli sünek bir yapıya sahiptirler. Kaba taneli bir yapı haline geçince gevrekleşirler ve çentik darbe mukavemeti düşer ve geçiş sıcaklığı yükselir.

Tane büyümesine mani olmak için, bazı tip ferritik paslanmaz çeliklerin bileşimine bir miktar azot ilave edilir. Bu tür paslanmaz çelikler kaynağa daha müsait bir durum gösterir. Elektrota ilave edilen bir miktar azotta kaynak metalinin katılaşması sonucunda ince taneli olmasına yardımcı olur.

Kromlu ferritik paslanmaz çelikler daima bir miktarda karbon ihtiva ederler. Karbonun ferrit içinde çözülme miktarı çok az olduğundan, karbon tüm yapı içinde ince bir şekilde dağılmış karbürler halindedir.

Kaynak esnasında ITAB'de bu karbürlerin bir kısmı çözülür ve küçük yerel ostenit bölgeleri meydana getirir. Şekil III.2.1'de Fe-Cr denge diyagramı görülmektedir. Bu diyagram üzerine çeliğin yapısında mevcut karbonun ostenit alanını genişletme etkisi şematik olarak işlenmiştir, buradan da görüldüğü gibi karbon miktarının biraz artması ostenit alanını genişleterek yüksek miktarda krom içeren çeliklerde dahi ostenit oluşumuna imkan vermektedir.

Oluşan ostenit büyüyen ferrit tanelerinin çevresinde bir ağ şeklinde yer alır; soğuma esnasında bu ostenit martenzite dönüşür ve dolayısıyla ITAB'de iri ferrit taneleri etrafında bir martenzit ağından oluşmuş bir yapı ortaya çıkar. Bu yapının sertliğine martenzit bir etkide bulunmaz, zira miktarı çok azdır, buna mukabil kırılgan yapar.



Şekil III. 2.1 Fe-Cr denge diyagramı.

- Bu tip paslanmaz çeliklerin kaynağında öyle bir kaynak usulü uygulanmalıdır ki ITAB 1150°C 'yi aşan sıcaklıklarda mümkün mertebe kısa süre kalmalıdır. Bu ise ancak kaynağın çok kısa pasolarla yapılması ve hemen soğutulması ile gerçekleştirilebilir.
- Teorik olarak iri taneli hale gelmiş yapıyı sıcak dövme ile, örneğin kaynak bölgesinin çekiçlenmesi ile islah etmek mümkündür. Yalnız bu her parçaya tatbik edilemez dövme işlemi parça soğumaya yüz tutmuş iken yapılırsa, esasen gevrekleşmiş olan ITAB'de çatlak oluşmasına sebep olunur.
- Ferritik Paslanmaz Çeliklerin kaynağında ortaya çıkan bir diğer tehlike de, krom ve demirin bir metallerarası fazı olan çok kırılgan ve gevrek sigma (σ) fazının oluşmasıdır. Bu olay sıcaklığın uzun süre 400°C ila 550°C arasında tutulması neticesinde ortaya çıkar bu bakımdan bu çeliklere hiçbir zaman 400°C 'nin üzerinde bir öntav uygulanmamalıdır.

Ferritik paslanmaz çelikler ile % 9'dan daha az nikel içeren ostenitik paslanmaz çeliklerde, kaynak bölgesinde sigma fazının meydana gelmesi, bu çeliklerin kaynak kabiliyetine olumsuz yönde etkir.

Sigma fazı çok sert (700-800 HV), antimagnetik ve gevrek özellikte metallerrarası bir bileşiktir. Bileşimi takriben % 52 Cr ve % 48 Fe'den ibarettir ve 550°C ila 925°C arasındaki sıcaklıklarda meydana gelir.

Ostenitik çeliklerde bu fazın meydana gelebilmesi için, ostenitik yapı içinde bir miktar da ferrit olması lazımdır.

Soğuk şekil değıştirme, niobyum, molibden, silisyum gibi elementlerin mevcudiyeti sigma fazı oluşumunu teşvik eder. Sigma fazının mevcudiyeti çeliğin uzama, büzülme ve çentik darbe mukavemetini azalttığından mevcudiyeti arzu edilmez. Karbür çökmesini yok etmek için uygulanan ısıl işlem sigma fazının da yok olmasını sağlar. Ostenitik paslanmaz çelik daha önceden bir homojenizasyon tavına tabi tutulmuş ve içindeki ferrit miktarı % 6.5'in altına düşürülmüş ise, kaynak bölgesinde oluşacak sigma fazı bu bölgenin özelliklerine olumsuz bir etkide bulunmaz.

- Yüksek miktarda krom ve karbon içeren ferritik paslanmaz çeliklere, ITAB'nin özelliklerinin geliştirilmesi bakımından, 200°C'lik bir öntav uygulanabilir.
- Kaynaktan sonra 750-850°C'lik bir tavlamayı müteakip hızlı bir soğutma, bu çeliklerde ITAB'nin sünekliğinin ve taneler arası korozyona direncin artmasına yardımcı olur.
- Kaynak edilmiş parçaların soğuk şekillendirilmesi ve zorlanması 300-400°C'lik bir tavlamadan sonra yapılmalıdır.
- **Kaynak dikişinde erimiş bölgede, tane büyümesinin sebep olduğu gevrekliğe ostenitik elektrot kullanarak mani olunabilir.** Az karbonlu ferritik paslanmaz çelikler halinde 18/8 tipi, % 0,1'den fazla karbon ihtiva eden çelikler için ise % 25 Cr ve % 20 Ni ihtiva eden elektrotlar iyi netice vermektedir.

- Problemler:
- I - Kromlu ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında karşılaşılan en önemli sorun, kaynak esnasında ITAB'nin bir kısmı 1150°C 'nin üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısınır ve bu bölgede aşırı bir tane büyümesi meydana gelir.
- **Çare:** Elektrot çeliğine imalatı sırasında Azot (Arayer atomu) eklenebilir. Kaynak dikişi sıcak iken dövülüp ıslah edilebilir bu da rizikolu olabilir.

II - Kromlu ferritik paslanmaz çelikler daima bir miktarda karbon ihtiva ederler. Kaynak esnasında ITAB'de bu karbürlerin bir kısmı çözülür ve küçük yerel ostenit bölgeleri meydana getirir. Oluşan ostenit büyüyen ferrit tanelerinin çevresinde bir ağ şeklinde yer alır; soğuma esnasında bu ostenit martenzite dönüşür ve dolayısıyla ITAB'de iri ferrit taneleri etrafında bir martenzit ağından oluşmuş bir yapı ortaya çıkar. Bu yapının sertliğine martenzit bir etkide bulunmaz, zira miktarı çok azdır, buna mukabil kırılgan yapar.

Çare: Bu tip paslanmaz çeliklerin kaynağında ITAB 1150°C 'yi aşan sıcaklıklarda mümkün mertebe kısa süre kalmalıdır. Bu ise ancak kaynağın çok kısa pasolarla yapılması ve hemen soğutulması ile gerçekleştirilebilir.

III - Sigma fazı çok sert (700-800 HV), antimagnetik ve gevrek özellikte metallerearası bir bileşiktir. Bileşimi takriben % 52 Cr ve % 48 Fe'den ibarettir ve 550°C ila 925°C arasındaki sıcaklıklarda meydana gelir.

ÇARE: Karbür çökmesini yok etmek için uygulanan ısıtma işlemi sigma fazının da yok olmasını sağlar.

Genel Çareler:

- Yüksek miktarda krom ve karbon içeren ferritik paslanmaz çeliklere, ITAB'nin özelliklerinin geliştirilmesi bakımından, 200°C'lik bir öntav uygulanabilir.
- Kaynaktan sonra 750-850°C'lik bir tavlama hızlı bir soğutma, bu çeliklerde ITAB'nin sünekliğinin ve taneler arası korozyona karşı direncin artmasına yardımcı olur.
- Kaynak edilmiş parçaların soğuk şekillendirilmesi ve zorlanması 300-400°C'lik bir tavlama sonra yapılmalıdır.
- Kaynak dikişinde erimiş bölgede, tane büyümesinin sebep olduğu gevrekliğe ostenitik elektrot kullanarak mani olunabilir.
- Az karbonlu ferritik paslanmaz çelikler halinde 18/8 tipi, % 0,1'den fazla karbon ihtiva eden çelikler için ise % 25 Cr ve % 20 Ni ihtiva eden elektrotlar iyi netice vermektedir.

III.2.3. Krom-Nikelli Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

- Bu tür paslanmaz çelikler bileşimleri % 12-25 krom ve % 8-25 Nikel içerirler. Nikel kuvvetli bir ostenit yapıcı olduğundan, bu çeliklerde katılaşma esnasında ortaya çıkan ostenit oda sıcaklığının altındaki sıcaklık derecelerinde dahi dönüşmeden kalır. Soğuma esnasında ostenit ferrit dönüşümü olmadığından bu tür paslanmaz çelikler de su verme yoluyla sertleştirilemezler. Bu grup paslanmaz çelikler içinde en fazla tanınan 18/10 çeliği diye isimlendirilen bileşiminde % 18 Krom ve % 10 Nikel içeren tipidir. Antimagnetik olan bu tür paslanmaz çeliklere genellikle korozyon mukavemetini arttırmak gayesi bir miktar da Molibden katılır. Bu çeliklerin kaynak kabiliyeti açısından en önemli özellikleri şunlardır:
- *a. Isı iletme katsayıları oda sıcaklığında az alaşımlı ve sade karbonlu çeliklerin 1/3'ü kadardır.*
- *b. Isıl genleşme katsayıları sade karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin takriben 1.5 mislidir, yani % 50 daha fazladır.*
- *c. Alaşımsız karbonlu çelikler düşük bir elektrik iletme direncine sahiptirler, bu tür paslanmaz çeliklerde ise bu değer 5 ila 7 misli daha büyüktür.*

- Bu tür çeliklerin kaynağında, basit karbonlu çeliklerin kaynağından daha fazla kendini çekme meydana gelir. Kaynak dikişinin soğuması esnasında büyük büzölmelerin meydana gelmesi neticesinde, bu bölgede oluşan şiddetli iç gerilmeler çatlama tehlikesine yol açar. Bu tür paslanmaz çeliklerin bilhassa çift taraflı iç köşe dikişlerinde sıcak çatlakların oluşma ihtimali çok fazladır.
- Bu fiziksel olayların yanı sıra iki önemli metalürjik etkende krom nikelli ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağını zorlaştırır.
- **Bunlardan birincisi (δ) delta ferrit fazının oluşumu diğeri ise karbür çökmesi olayıdır. Krom nikelli ostenitik paslanmaz çelikler sıvı halden itibaren katılaşmaya başlayınca, ostenit ve ferrit taneleri oluşur.**
- Bu delta ferrit ostenitin dönüşümü sonucunda ortaya çıkan ferritten farklıdır. Katılaşma normal olarak endüstride ingota dökülen bir sıvı metalin katılaşmasında görölen bir süratle cereyan ettiğı zaman bu tür çeliklerin yapısı ostenit taneleri arasına serpiştirilmiş delta ferrit taneciklerinden meydana gelir. Delta ferrit bu malzemeyi sıcak dövme ve haddeleme için uygun olmayan bir hale sokar, sıcak şekil değıştirme esnasında malzemede çatlaklar oluşur.

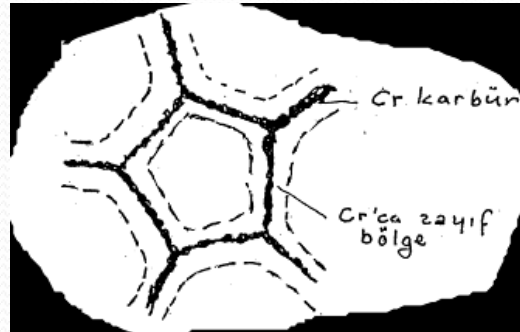
- Bu olaya mani olabilmek için katılan krom nikelli ostenitik paslanmaz çeliklerde soğumanın çok yavaş bir hızla seyretmesi gereklidir.
- Bir başka çözüm yolu da bu çeliğin uzun bir süre 1150°C 'de tavlanması ve hızlı soğutulmasıdır.
- Ostenitik krom nikelli paslanmaz çelikler oda sıcaklığında ve daha düşük sıcaklıklarda mutlak olarak içyapı bakımından kararlı değildirler. Bu çelikler de aşırı soğuk şekil değiştirme, bilhassa dövme, sonucunda kısmen bir martenzitik yapı elde edilebilir.
- 18/8 ve 18/10 tipi gibi bazı krom nikelli ostenitik paslanmaz çelikler 450°C ile 850°C arasında bir sıcaklığa kadar ısıtılıp o sıcaklıkta tutulduklarında **bir karbür çökmesi eğilimi kendini** gösterir. Bu tür çeliklerin eldesi sırasında krom ve karbonun ostenit içinde çözüldüğü 1100°C sıcaklığından itibaren hızla soğutulurlar.

Sıcaklığın 450°C 'nin üzerine çıkması karbonun difüzyon hızı, karbonu tane sınırlarından dışarı çıkartacak derecede artar.

Tane sınırlarında biriken karbon, kroma karşı yüksek eğiliminden dolayı bu bölgede kromla birleşerek krom karbür meydana getirir.

Krom karbürün ağırlık olarak % 90'ını krom meydana getirdiğinden çok az bir karbon dahi bulunsa tane sınırlarında kromca bir zayıflama meydana gelir. Bunun neticesi olarak malzeme korozif bir ortamda bulunduğu zaman, kromca zayıflamış olan tane sınırlarında korozyon meydana gelir.

Bu **Şekil III.2.2**'de ortaya çıkan bu tanelerarası korozyon bütün malzemeyi çok kısa bir zaman zarfında kullanılamaz hale getirebilir. Çeliğin karbon içeriği arttıkça da bu olay şiddetlenir.



Şekil III.2.2. Ostenit tane sınırlarına çöken krom karbür ağı.

- Krom nikelli ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı esnasında eriyen bölge çok kısa bir zamanda katılaşır hızla soğuduğundan ve elektrot olarak kullanılan alaşımların karbon içeriği de çok düşük olduğundan, kaynak metal, özellikle kaynak dikişi için karbür çökeltme tehlikesi mevcut değildir.
- Buna karşın ITAB kaynak süresi kadar 500-900°C sıcaklıkları arasında tavlı olarak kalmakta ve aynı zamanda da burası esas metal olduğu için, karbon içeriğinin yüksek olması halinde, ostenit tane sınırlarında taneler arası korozyonun başlamasına sebep olacak karbür çökeltmesi olayı meydana gelecektir.
- Tek paso ile yapılan elektrik ark kaynağında 650°C ila 750°C arasındaki sıcaklığa ITAB bir dakikadan daha az bir süre maruz kalır. Buna mukabil çok pasolu kaynak halinde bu süre üç dakikanın üzerine çıkar ve dolayısıyla karbür çökeltme tehlikesi baş gösterir.
- Kaynakla birleştirilmesi gereken krom-nikelli ostenitik paslanmaz çeliklerin esas metal karbon içeriği azami % 0,6, tercihan % 0.03 civarında olmalıdır.

Bu konuda uygulanan bir başka yöntem de çeliğin stabilizasyonu diye isimlendirilir.

Stabilizasyon için ilave edilen elementler Titanyum, Niobyum ve Tantal'dır. Bunların oluşturduğu karbürler, tane sınırları boyunca değil, ostenit taneleri içinde ince zerrecikler halinde dağılmış olduklarından, çeliğin mekanik davranışlarında da bir değişiklik meydana getirmezler.

Bu stabilizasyonun gerçekleşebilmesi için ilave edilen titanyumun karbona göre 4 misli, niobyumun 8 ila 10 misli, tantalın 16 misli miktarda olması gereklidir.

Çeliğin stabilizasyonu için genellikle, maliyet açısından Esas metallerde titanyum tercih edilir, elektrotların stabilizasyonu için ise, titanyumun kaynak arkında büyük miktarda kaybindan ötürü niobyum tercih edilir.

Stabilize edilmiş çelikler için de, taneler arası korozyona karşı tam manası ile dayanıklıdır denilemez. Zira, niobyum, titanyum ve tantal karbür 1300°C'nin üzerinde çözülür ve karbon serbest kalarak krom karbür oluşturabilir.

Bu sıcaklığa kadar erişen bölge çok dar olduğu için, erime çizgisine yakın bir yerde çok dar bir bölge korozyona karşı mukavemetini yitirir ve bu bölgeye bıçak izi etkisi veya korozyonu denir.

Parça 1100°C'ye kadar tavlانیp, suya sokularak aniden soğutulursa, yüksek sıcaklıkta ostenit içinde çözülmüş bulunan karbürler hızlı soğuma esnasında yeniden oluşamazlar.

Kaynak dikişinde ITAB'de veya esas metalde karbür çökmesinin meydana geldiğı hallerde, şayet parçanın boyutları ve konstrüksiyonu müsait ise, bir tavlama yardımı ile bu olayın olumsuz etkileri giderilebilir.

Tane sınırlarına çökelen krom karbürün olumsuz etkilerini yok etmek bakımından bu usul çok iyi netice vermesine rağmen, uygulamada tercih edilmez, zira böyle bir ısıl işlemin uygulanması pek pratik değildir.

- Ostenitik çeliklerde içinde bir miktar da ferrit olması durumunda, soğuk şekil değiştirme ve niobyum, molibden, silisyum gibi elementlerin mevcudiyeti sigma fazı oluşumunu teşvik eder. Sigma fazının mevcudiyeti çeliğin uzama, büzülme ve çentik darbe mukavemetini azalttığından mevcudiyeti arzu edilmez. Karbür çökmesini yok etmek için uygulanan ısıtma işlemi sigma fazının da yok olmasını sağlar. Ostenitik paslanmaz çelik daha önceden bir homojenizasyon tavına tabi tutulmuş ve içindeki ferrit miktarı % 6.5'in altına düşürülmüş ise, kaynak bölgesinde oluşacak sigma fazı bu bölgenin özelliklerine olumsuz bir etkide bulunmaz.

- **Problemler:**

- I - Basit karbonlu çeliklerin kaynağından daha fazla kendini çekme meydana gelir. Kaynak dikişinin soğuması esnasında büyük büzölmelerin meydana gelmesi neticesinde, bu bölgede oluşan şiddetli iç gerilmeler çatlama tehlikesine yol açar (çift taraflı iç köşe dikişlerinde sıcak çatlakların oluşma ihtimali çok fazladır).
- II - (δ) delta ferrit fazı oluşur. Sıvı halden itibaren katılaşmaya başlayınca, delta ferrit ve ostenit taneleri oluşur. Bu delta ferrit ostenitin dönüşümü sonucunda ortaya çıkan ferritten farklıdır. Böylece Ostenit taneleri arasına serpiştirilmiş delta ferrit taneciklerinden meydana gelir. Delta ferrit bu malzemeyi sıcak dövme ve haddeleme için uygun olmayan bir hale sokar, sıcak şekil değiştirme esnasında malzemedede çatlaklar oluşur.

- **Çare:**

- 1 - Bu olaya mani olabilmek için katılaşan krom nikelli ostenitik paslanmaz çeliklerde soğumanın çok yavaş bir hızla seyretmesi gereklidir.
- 2 - Bir başka çözüm yolu da bu çeliğin uzun bir süre 1150°C'de tavlınması ve hızlı soğutulmasıdır.

- III - Karbür çökmesi meydana gelir.
- 18/8 ve 18/10 tipi gibi bazı krom nikelli ostenitik paslanmaz çelikler 450°C ila 850°C arasında bir sıcaklığa kadar ısıtılıp o sıcaklıkta tutulduklarında bir karbür çökmesi eğilimi kendini gösterir. Bu tür çeliklerin eldesi sırasında krom ve karbonun ostenit içinde çözüldüğü 1100°C sıcaklığından itibaren hızla soğutulurlar.

Krom karbürün ağırlık olarak % 90'ını krom meydana getirdiğinden çok az bir karbon dahi bulursa tane sınırlarında kromca bir zayıflama meydana gelir. Kromca zayıflamış olan tane sınırlarında korozyon meydana gelir. Ortaya çıkan bu tanelerarası korozyon bütün malzemeyi çok kısa bir zaman zarfında kullanılamaz hale getirebilir. Çeliğin karbon içeriği arttıkça da bu olay şiddetlenir.

ITABın da kaynak süresi kadar 500-900°C sıcaklıkları arasında tavlı olarak kalması nedeniyle ve aynı zamanda da burası esas metal olduğu için, karbon içeriğinin yüksek olması halinde, ostenit tane sınırlarında taneler arası korozyonun başlamasına sebep olacak karbür çökmesi olayı meydana gelecektir (Paso sayısı arttıkça da bu sıcaklığı arasında kalma süresi de artacaktır).

- **Çareler:** Kaynakla birleştirilmesi gereken krom-nikelli ostenitik paslanmaz çeliklerin esas metal karbon içeriği azami % 0,6, tercihan % 0.03 civarında olmalıdır.

Bu konuda uygulanan bir başka yöntem de çeliğin stabilizasyonu diye isimlendirilir. Elementler Titanyum, Niobyum ve Tantal'dır. Bunların oluşturduğu karbürler, tane sınırları boyunca değil, ostenit taneleri içinde ince zerrecikler halinde dağılmış olduklarından, çeliğin mekanik davranışlarında da bir değişiklik meydana getirmezler (*Çeliğin stabilizasyonu için genellikle, maliyet açısından Esas metallerde titanyum tercih edilir, elektrotların stabilizasyonu için ise, titanyumun kaynak arkında büyük miktarda kaybından ötürü niobyum tercih edilir*).

Stabilize edilmiş çelikler için de, taneler arası korozyona karşı tam manası ile dayanıklıdır denilemez. Zira, niobyum, titanyum ve tantal karbür 1300°C'nin üzerinde çözülür ve karbon serbest kalarak krom karbür oluşturabilir.

Bu sıcaklığa kadar erişen bölge çok dar olduğu için, erime çizgisine yakın bir yerde çok dar bir bölge korozyona karşı mukavemetini yitirir ve bu bölgeye bıçak izi etkisi veya korozyonu denir.

Parça 1100°C'ye kadar tavlانیp, suya sokularak aniden soğutulur. Ancak pek de pratik değildir.

IV - Ostenitik krom nikelli paslanmaz çelikler oda sıcaklığında ve daha düşük sıcaklıklarda mutlak olarak içyapı bakımından kararlı değildirler. Bu çelikler de aşırı soğuk şekil değiştirme, bilhassa dövme, sonucunda kısmen bir martenzitik yapı elde edilebilir.

- V - Ostenitik çeliklerde içinde bir miktar da ferrit olması durumunda, soğuk şekil değiştirme ve niobyum, molibden, silisyum gibi elementlerin mevcudiyeti sigma fazı oluşumunu teşvik eder.
- ÇARE: Karbür çökmesini yok etmek için uygulanan ısıtma işlemi sigma fazının da yok olmasını sağlar. Ostenitik paslanmaz çelik daha önceden bir homojenizasyon tavına tabi tutulmuş ve içindeki ferrit miktarı % 6.5'in altına düşürülmüş ise, kaynak bölgesinde oluşacak sigma fazı bu bölgenin özelliklerine olumsuz bir etkiye bulunmaz.

Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

- Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çeliklerden oluşturulacak kaynaklı bağlantılarda arzu edilen özellikleri sağlamak için seçilen uygun üretim ve ısıt işlemler bu tür çeliklerin kullanım yerine göre değişebilir. Kaynak sonrası, uygulanacak çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıt işlemleri ile maksimum mekanik özellikler ve korozyon direnci elde edilebilir. Çarpılmaların oluşabilirliği ve çatlama tehlikesi bazı durumlarda çözeltiye alma tavrının uygulanmasını sınırlar. Bu nedenle, bazen sadece kaynak sonrasında yaşlandırma işlemi gerekir.
- Eğer kaynaklı birleştirme tam bir ısıt çevrime alınamıyorsa, kaynağa başlamadan önce bağlantıyı oluşturacak bileşenlere çözeltiye alma tavlama uygulanmış olmalıdır. Kaynaklı birleştirmeler kullanılmadan önce yaşlandırma ısıt işlemine tabi tutulmalıdır; bu konuda çelik üreticilerinin önerileri dikkate alınır.
- Genellikle çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler için bir ön tavlamaya gerek yoktur. Örneğin; 17-4 PH martenzitik tür çelik malzeme 100 mm.' nin altındaki kalınlıklarında ön tav uygulanmaksızın kaynak edilebilir, ancak pasolar arası sıcaklıklar 150 C' de tutulması genelleştirilmiştir. 100 mm' yi aşan kalınlıklarda ise, 95 C öntav ve 95-260 C pasolar arası sıcaklıklara dikkat edilmesi bir çok uygulama için önerilir.

Simge	Kimyasal Bileşim ^a (%)									
	Cr	Ni	C	Mn	Si	Cu	Mo	Ti	Al	Diğer
Stainless W ^b 17-4 PH 15-5 PH(XM-12) CROLOY 16-6PH CUSTOM 450(XM-25) CUSTOM 455(XM-16) PH 13-8 Mo(XM-13) ALMAR 362(XM-9) IN-736	Martenzitik Çökelme Sertleşmeli Türler									
	16.75	6.75	0.07	0.50	0.50	-	-	0.80	0.20	-
	16.50	4.25	0.04	0.40	0.50	3.60	-	-	-	Nb+Ta 0.25
	15.00	4.60	0.04	0.25	0.40	3.50	-	-	-	Nb+Ta 0.35
	15.75	7.50	0.03	0.80	0.45	-	-	0.60	0.40	-
	14.90	6.50	0.03	0.30	0.25	1.50	0.80	-	-	Nb+Ta 0.75
	11.75	8.50	0.03	0.20	0.20	2.25	-	1.20	-	Nb+Ta 0.30
	13.00	8.00	0.04	0.05	0.05	-	2.25	-	1.00	-
	14.50	6.50	0.03	0.30	0.20	-	-	0.80	-	-
	10.00	10.00	0.02	0.10	0.10	-	2.00	0.20	0.30	-
17-7PH PH 15-7 Mo AM-350 AM-355 PH 14-8 Mo ^c (XM-24)	Yarı-Ostenitik Çökelme Sertleşmeli Türler									
	17.00	7.00	0.07	0.70	0.40	-	-	-	1.15	-
	15.00	7.00	0.07	0.70	0.40	-	2.25	-	1.15	-
	16.50	4.25	0.10	0.75	0.35	-	2.75	-	-	N 0.10
	15.50	4.25	0.13	0.85	0.35	-	2.75	-	-	N 0.12
	15.50	8.75	0.05	0.10	0.10	-	2.50	-	1.35	-
17-10 P HNM A-286	Ostenitik Çökelme Sertleşmeli Türler									
	17.0	10.50	0.12	0.75	0.50	-	-	-	-	P 0.28
	18.5	9.50	0.30	3.50	0.50	-	-	-	-	P 0.25
	15.0	25.0	0.06	1.20	0.50	-	1.20	2.00	0.25	V 0.30

^a Geri kalanı demir

^b Ferritik yapıca üstün

^c Vakum endüksiyon fırında üretilmiş,
Parantez içindeki simgeler ASTM' e göredir

Martenzitik ve yarı-ostenitik çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklerin kaynağında çatlama tehlikesi yoktur. **Ancak daha önceden de, belirtildiği gibi ostenitik türlerin ITAB' de sıcak çatlama tehlikesi kaynak edilebilmelerini zorlaştırır** Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklere kıyasla daha az sünektir ve çentik hassasiyetleri fazladır. Bu açıdan, kaynak edilecek parçaların tasarımında ve kaynaklı birleştirmelerde gerilme birikimi yaratacak kısımlardan sakınılmalıdır.

Çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklerin kaynak edilebilir türlerinde, ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklere uygulanabilen tüm kaynak yöntemleri kullanılabilir. Bu tür çeliklerin kaynaklı birleştirmeleri için TIG, MIG ve Plazma ark kaynak yöntemleri oldukça uygun yöntemlerdir. Bu tür çeliklere örtülü elektrotlar ile ark kaynağı da uygulanabilir ancak esas metal bileşimi ile tam uyumlu elektrotlar bulunmadığı hallerde yüksek bağlantı mukavemetleri elde edilemez. Bu tür çelikler direnç kaynak yöntemleri ile de birleştirilebilir.

Çökeltmeli Paslanmaz Çeliklerde Kaynak Yöntemlerinin Uygulanması

- **Örtülü Elektrotlar ile Ark Kaynağı**
- 17-4 PH, 17-7 PH, AM 350 ve AM 355 simgeleri ile anılan martenzitik ve yarı-ostenitik çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler; Ti veya Al içermediklerinden dolayı, örtülü elektrotlar kullanılarak rahatlıkla kaynak edilebilirler. **Normal olarak esas metal ile aynı bileşimlerde elektrotlar kullanılır ve tüm pozisyonlarda kaynak uygulanabilir.**
- **TIG Kaynağı**
- **El ile veya otomatik TIG kaynak yöntemi, 6 mm.' ye kadar kalınlıklardaki çökeltme sertleşmeli paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde çok yaygın kullanım alanı bulur. Daha kalın kesitlerde de TIG kaynak yönteminin uygulanması olasıdır ancak MIG kaynak yöntemi daha ekonomik ve daha hızlı bir yöntem olarak düşünülmelidir.**
- **Birleştirmenin arka yüzü veya dikişin kökü atmosferin olumsuz etkilerinden korunmak amacı ile kaynak sırasında soy gaz koruması altında olmalıdır.**

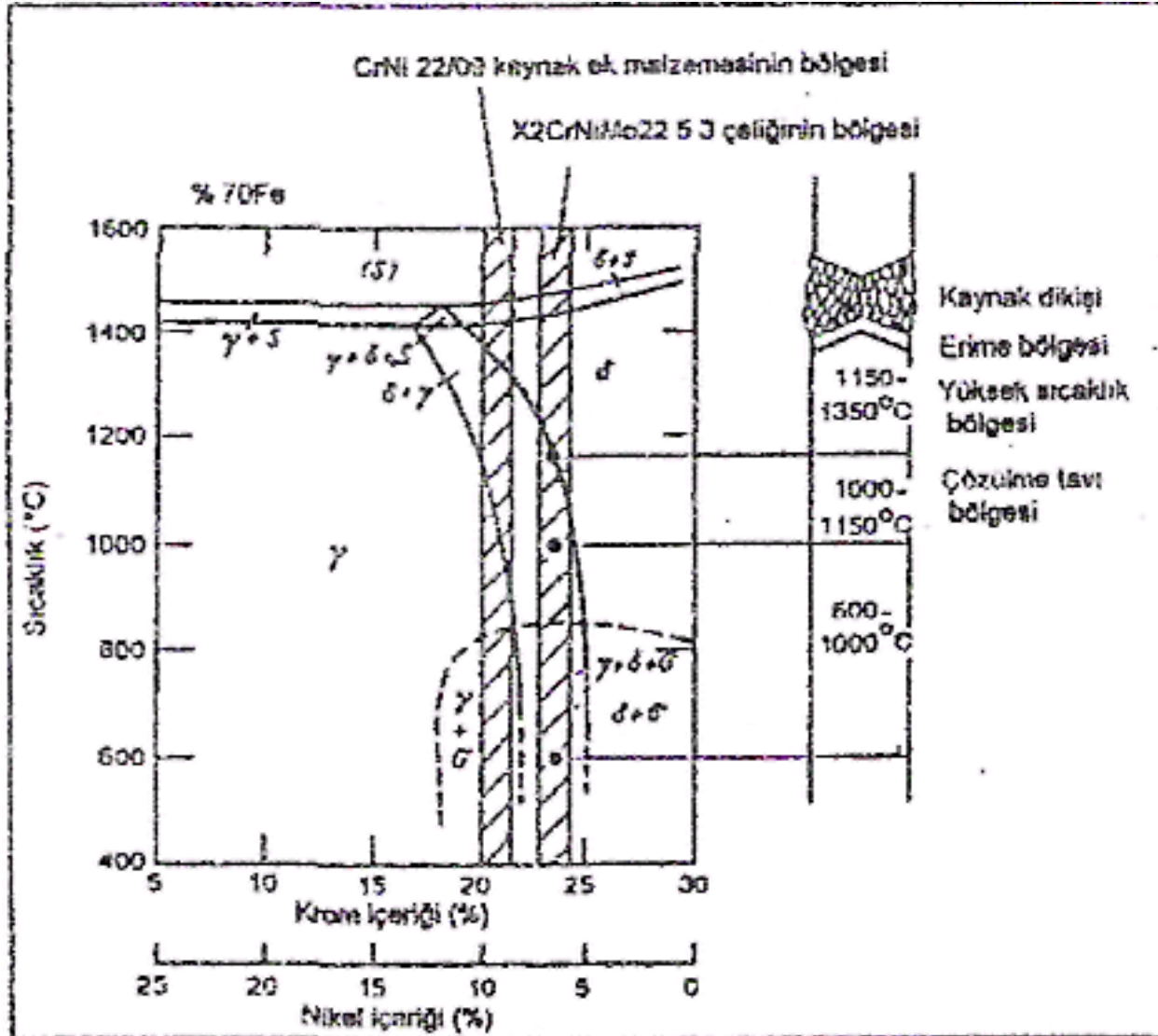
- **MIG Kaynağı**
- **Çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklerin 6 mm' den kalın kesitlerinin birleştirilmesinde spreyl ark ile MIG kaynak yöntemi kullanılır.** TIG kaynağına göre dolgu oranı yüksek olduğundan daha hızlı bir biçimde kaynak gerçekleştirilir.
- **Tozaltı Kaynağı**
- Bu tür çeliklerin birleştirilmesinde tozaltı kaynağı, genellikle 12.5 mm. den daha kalın kesitlere uygulanır.
-
- **Diğer Yöntemler İle Kaynak**
- Bu çeliklerin modern kaynak yöntemleri ile birleştirilmesine özellikle elektron ışın kaynağı yapılmış bağlantıların yorulma ve çekme mukavemetlerinin incelenmesine yönelik bilimsel ve endüstriyel araştırmalardan çok iyi sonuçlar alınmaktadır.

Dupleks ve Süper-Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

EURONORM DIN	Kimyasal Bileşim (%)						
	C	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Diğer
X2CrNiMoSi 18 5 3	0.02	18.5	5	2.7	-	0.07	Si=1.7
X10CrNiMoTi 21 6 2	0.02-0.06	20	6	2	-	-	Ti=0.4
X2CrNiMoCu 21 7 3 2	0.025	21	6.5	2.5	1.5	-	-
X2CrNiMoN 22 5 3	0.02	22	5.5	3.0	-	0.15	-
X3CrNiMo 25 6 2	0.025	25	5.5	1.5	-	≤0.1	-
X2CrNiMoN 25 5 2	0.025	25	6	1.7	-	0.17	-
X2CrNiMoCu 25 6 3	0.03	24	7	2.8	0.4	-	-
X2CrNiMoCuW 25 5 2 1	0.02	25	6	3.3	0.4	-	W=0.3
X3CrNiMoCu 25 5 3 2	0.03	24	5	1.5	1.0	0.1	-
X8CrNiMoCu 25 5 3 2	0.06	25	5	2	2	≥0.01	-

- Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynağında, kaynak metalinde delta ferrit/ostenit dengesinin sağlanmasının oldukça büyük önemi vardır. Dupleks ve süper-dupleks kaynak metallerinin katılaşmasında başlangıçta hemen hemen ferritik (delta ferrit) yapı oluşur. İlerleyen soğuma ile ferritik tane sınırlarında ostenitik fazın çekirdeklenmesi başlar. Dolayısı ile, ostenit fazının oluşumu kaynak soğuma hızı ile sınırlanmaktadır. Azot, ostenitin yeniden oluşmasında en etkin elementtir. Azotun diğer önemli bir rolü de ostenit ve ferrit fazları arasındaki farklılığı azaltarak metaller arası faz oluşum tehlikesini düşürmesidir. Azot özellikle ostenitik fazda korozyon direncini kuvvetli bir şekilde düzeltir.
- Bu tür çeliklere ait faz diyagramları incelendiğinde, $\delta/\delta+\gamma$ faz bölgesinin 1100 C'nin üzerinde bir sıcaklığa maruz kaldığı görülecektir. Dolayısı ile, kaynak metalinde ve ITAB'de ferrit fazı oluşumu artmaktadır (Şekil).

X2CrNiMoN2253 çeliğinin CrNi22/09 elektrodu ile kaynağında oluşan bölgelerin % 70 Fe içeren Fe-Cr-Ni faz diyagramındaki yeri



- Kaynak bölgesinin soğuma hızı (çok hızlı soğumadan kaçınmak gerekir) oluşacak ostenit fazı oranını etkilemektedir. Kaynak bağlantısının istenenin üzerinde ferrit içermesi bağlantının tokluğunu ve korozyon direncini düşürür. Uygun dupleks mikroyapıyı oluşturmak için ek bir ısıtma işlemi gereksinim duyulur. Kaynak metalinin uygun iç yapısı ve özellikleri yüksek nikel içerikli kaynak ek metali kullanılarak sağlanır. Bu açıdan genellikle %9 Ni içeren ek kaynak metalleri kullanılır.
- Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynağında ITAB' de de ferrit miktarının artması beklenmelidir. Bu açıdan, çok düşük ısı girdisi ve buna bağlı olarak da hızlı soğumalardan kaçınılmalı ve ITAB' de bağlantı tokluğu ve korozyon direnci açısından da ostenit fazının oluşumuna izin verilmelidir.

Soğuma hızı, ısı girdisi, pasolar arası sıcaklıklar ve malzeme kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. Özellikle çok yüksek alaşımlı dupleks paslanmaz çeliklerde çok yavaş soğuma hızlarında metaller arası gevrek fazlar oluşur; bu oluşumlar kaynak metali ve ITAB' de hem tokluğun hem de korozyon direncinin düşmesine neden olur. Çok hızlı soğuma hızlarında da yüksek ferrit miktarı, nitrür çökelmeleri ve bunun sonucunda da düşük tokluk ve düşük korozyon direnci ile karşılaşılır. Dolayısı ile, dupleks paslanmaz çeliklerin kaynağı alaşım içeriklerine bağlı olarak kontrollü bir ısı girdisi ile gerçekleştirilmelidir. Tabloda dupleks kalitelere uygulanması önerilen en az ve en çok ısı girdisi ile pasolar arası sıcaklıklar verilmektedir.

Duplex ve süper- duplex paslanmaz çeliklerin kaynağı için önerilen ısı girişi ve pasolararası sıcaklıklar

Tür	Önerilen Isı Girdisi* (kJ/mm)	Maksimum Pasolararası Sıcaklıklar(°C)
%23Cr Molibdensiz Duplex	0.5-2.5	150-200
%22Cr Standard Duplex	0.5-2.5	125-200
%25Cr (0-%2.5Cu)Duplex	0.2-1.5	100-150**
%25Cr Super-duplex	0.2-1.5	100-150**

* Isı girişi malzeme kalınlığına göre seçilmelidir.

** Optimum kaynak özellikleri için maksimum 100 °C önerilir.

Dupleks Paslanmaz Çeliklere Uygulanan Kaynak Yöntemleri

- Dupleks ve süper dupleks paslanmaz çelikler örtülü elektrot ile ark, TIG, MIG, tozaltı, özlü elektrot ile ark vs gazaltı vs plazma ark kaynağı yöntemleri ile uygun ek kaynak metalleri kullanılarak başarılı bir biçimde kaynak edilebilmektedirler.
-
- **Örtülü Elektrot İle Ark Kaynağı**
- Günümüzde dupleks ve super-dupleks paslanmaz çeliklerin örtülü elektrotla kaynağı için çeşitli kaynak elektrotları üretilmektedir ve bu tür elektrotların standartları sınırlıdır. Örtülü elektrot ile ark kaynağı. dupleks paslanmaz çelik sacların birleştirilmesinde kullanılabileceği gibi boru kaynaklarında da dolgu pasoların oluşturulmasında başarı ile kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca bunlara ek olarak döküm dupleks türlerinde de tamir amacıyla kullanılan standart bir yöntem haline gelmiştir.

• TIG Kaynak Yöntemi

- Ek bir kaynak teli kullanılmadan gerçekleştirilebilen TIG ve plazma ark kaynak yöntemleri, ince sacların tek taraftan, kalın saclar halinde ve kalın cidarlı borularda da kök pasolarının gerçekleştirilmesinde uygulanan yöntemlerdir. Ancak normalde ek kaynak teli kullanılmayan bu yöntemlerden sakınılmalıdır. Aksi takdirde dikişteki aşırı ferrit oluşumu bağlantının kalitesini bozar. Bu açıdan bu yöntemlerin olabildiği ölçüde ek bir kaynak teli kullanılarak gerçekleştirilmesi ve uygun bileşimdeki telin seçilmesi önemlidir.
- TIG kaynağında boruların iç kısımları için kök gazı olarak %99,996 N_2 gazı da kullanılması, azotun ostenit dengeleyici etkisi dikkate alınarak önem kazanır. Böylece çukurcuk korozyon (pitting) direnci artar.

- **MIG Kaynak Yöntemi**

- Dupleks paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde ve dolgu pasolarında MIG kaynak yöntemi oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde $Ar + \%1-3CO_2$, $Ar+\%1-3CO_2$, $Ar+\%30He+\%1-3O_2$ veya $Ar+ \%15He+\%1-3CO_2$ karışım gazları kullanılır. Kök gazı olarak da saf Ar veya $\%3N_2$ eklenen karışım gaz önerilir. Bu yöntemde yüksek ısı girdisi ile kaynak yapılır. Pasolar arası sıcaklık maksimum 150 C ile sınırlandırılmıştır.

- **Tozaltı Kaynak Yöntemi**

- 10 mm'nin üzerindeki kalınlıklara sahip dupleks ve süper-dupleks paslanmaz çeliklerin kaynağında yüksek dolgu oranından dolayı en ekonomik kaynak yöntemi tozaltı kaynağı olmaktadır. Pasolar arası sıcaklıklar 200 C' yi geçmemelidir. Genel olarak yüksek baziklik derecesine sahip kaynak tozları çatlama emniyeti bakımından önerilir.
- Son on yılın en yoğun malzeme araştırmalarına konu olan bu tür çelikler, sadece alışılmış kaynak yöntemleri ile kaynak edilmemekte elektron ışın ve laser ışın hatta katı hal kaynak yöntemleri ile de kaynak edilebilmektedirler.



Schaeffler DİYAGRAMI

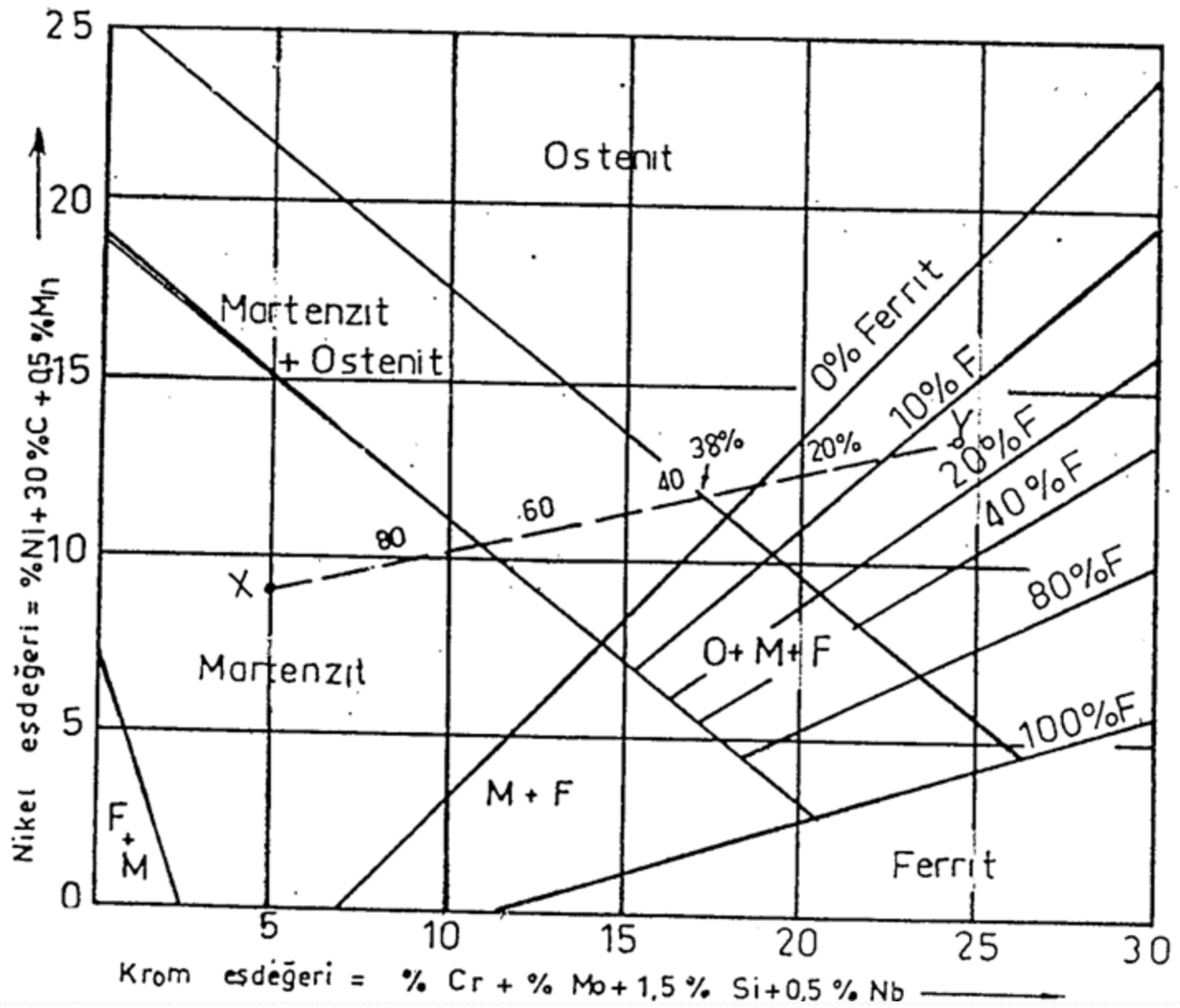
Schaeffler DİYAGRAMI

Kaynak metali daima bir miktarda eriyen esas metali içerdiğinden, bileşimi elektrot bileşimi yardımı ile belirlenemez. Esas metalin ve elektrotun bileşimleri bilinirse, bunların kaynak esnasındaki karışımları yaklaşık olarak tahmin edilebilir ve ***Schaeffler diyagramı*** yardımı ile de iç yapıları tespit edilebilir.

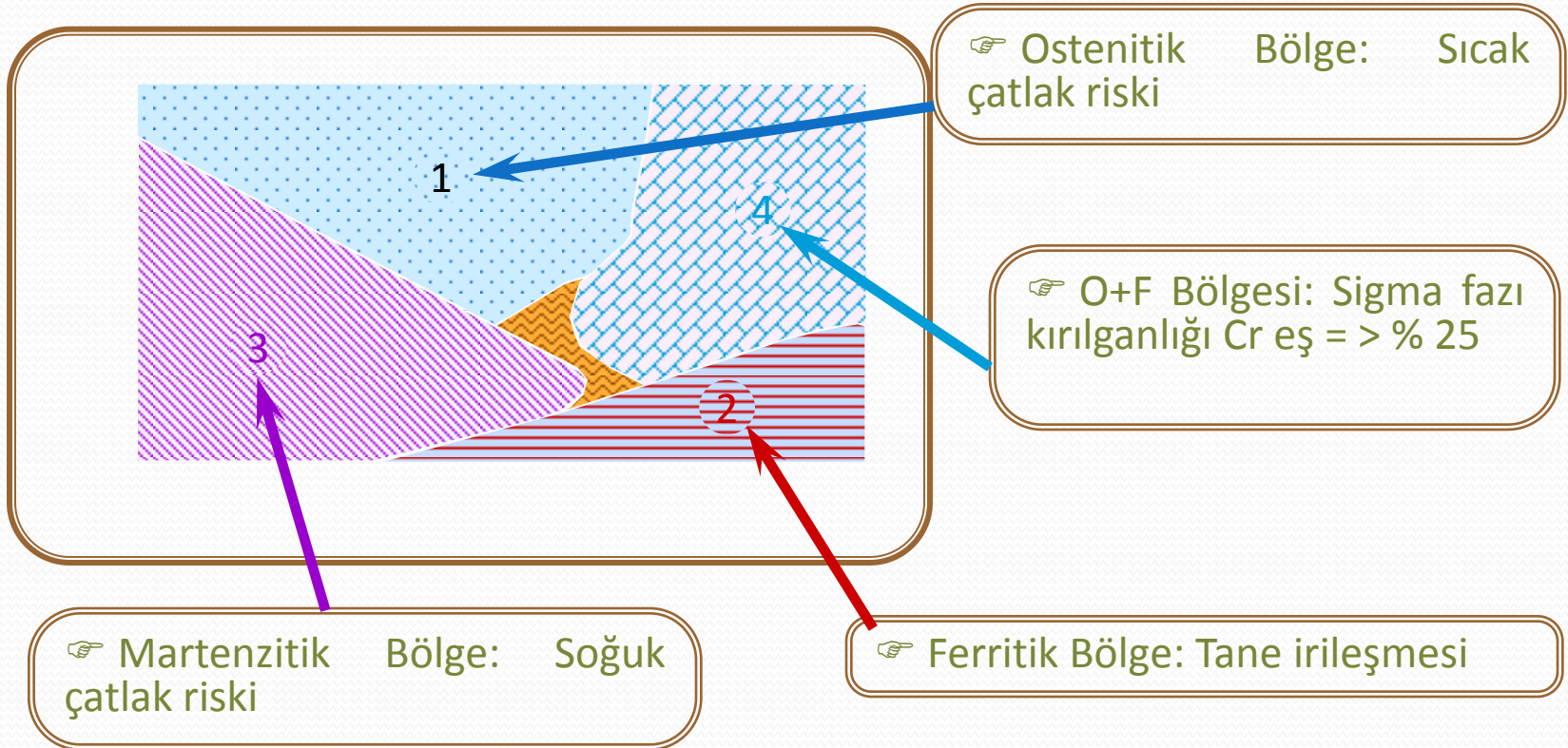
- ✖ Ostenitik paslanmaz çelik kaynak metallerinin kimyasal bileşiminde delta ferritin saptanması ile ilgili ilk çalışmalar 1949 yılında Anton SCHAEFFLER tarafından gerçekleştirilmiştir.
- ✖ Schaeffler, 4.76 mm (3/16 inç) çapında dolu çekirdekli, örtülü ostenitik elektrodlar kullanarak diyagramın sınır çizgilerini tanımlamak üzere bir seri deney gerçekleştirmiştir.
- ✖ Esas metal ile dolgu metalinin karışım oranları kimyasal ve metalografik açıdan incelemiştir.
- ✖ Böylece Schaeffler, pratik deneylere dayanan teknolojik bir harita biçiminde diyagram hazırlar, ancak bu, kesinlikle bir faz diyagramı değildir.
- ✖ O günün koşullarında yapılan deneylerde dikkate alınmayan elektrod çapları, kaynak sırasındaki farklı soğuma hızları daha sonra Schaeffler tarafından rapor edilmiştir. Zira Schaeffler' in diyagramında delta ferrit içeriğinin saptanmasında $\pm \%4$ ' luk bir hata payı vardır.

- Schaeffler diyagramında, ferriti dengeleyici elementler (ALFAJENLER) $Cr_{eş}$ olarak yatay ekseninde,
- Osteniti dengeleyici elementler ise (GAMAJENLER) $Ni_{eş}$ olarak düşey ekseninde yerleştirilmiştir.
- Schaeffler diyagramında yüksek azot içerikleri dikkate alınmamıştır. Bu açıdan diyagram sadece % 0.05-0.1 N içerikleri için uygulanabilir. Ayrıca karbonun %0.03' lük minimum miktarı ve % 0.3' lük Si miktarı da tamamen tahmini olarak ele alınmaktadır. Ayrıca bu diyagramın yüksek Mn içeren paslanmaz çelikler için de kullanılması pek uygun değildir.

- Schaeffler diyagramının geliştirilerek yayınlanmasından sonraki tarihlerde bir çok araştırmacı diyagram üzerinde çalışmış ve diyagramı tekrar tekrar düzenleyerek daha hassas sonuçlar alınabilecek şekilde geliştirmişlerdir.
- Schaeffler diyagramı bugün hala paslanmaz çeliklerin üretimi, paslanmaz çelik elektrodların geliştirilmesi ve bu tür çeliklerin Kaynak edilmeleri konusunda çalışan bir çok mühendis ve teknik eleman tarafından yaygın olarak kullanılan bir diyagramdır. Bu açıdan diyagramı burada detaylı incelemekte fayda vardır.

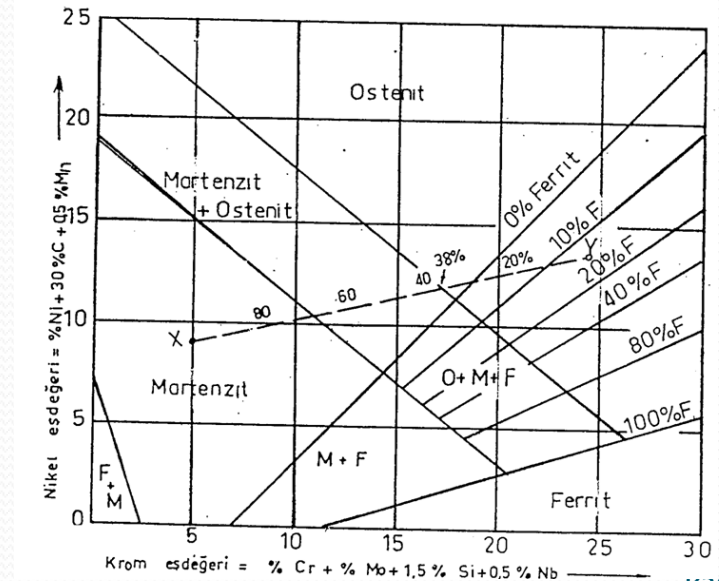


Metalurjik Bölgeler ve Riskleri



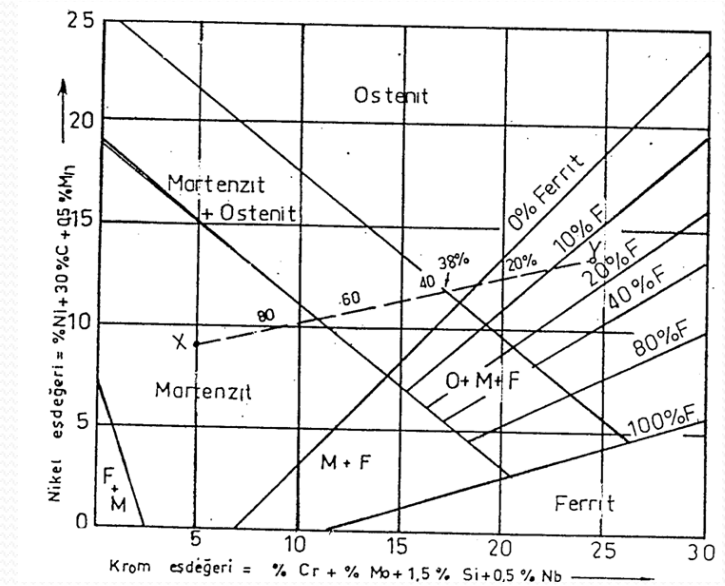
Ostenitik Bölge

- 1250 C' den itibaren sıcak çatlak hassasiyeti kendini gösterir.
- Düşük karbon aramları için çok iyi tanelerarası korozyona dayanıklılık
- Çok iyi tokluk ve süneklik



Ferritik Bölge

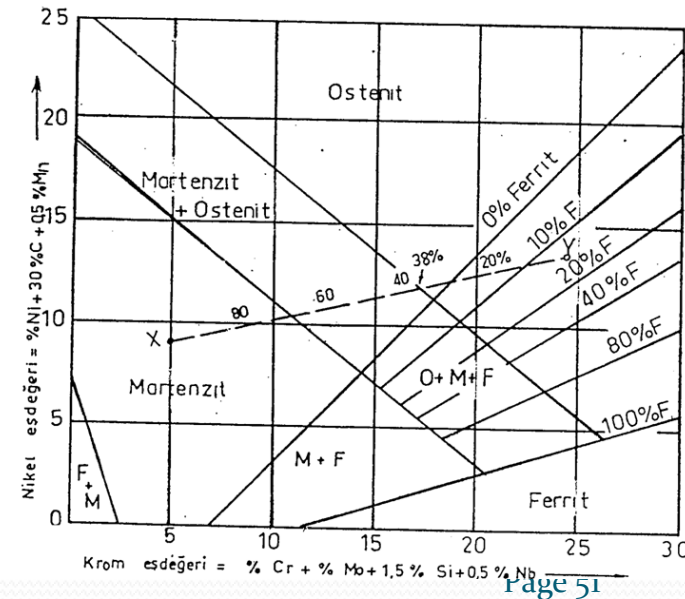
- 1150 C üzerinde Tane irileşmesi nedeniyle gevrekleşme (Ön ısıtma yasak)
- Tokluk ve Süneklik iyi
- Taneler arası korozyona eğilim yok



Martenzitik Bölge

- 400 C altında çatlama eğilimi var. (Etki: C + Hidrojen + Gerilme) Böylece:
 - Öntavlama gerekli (200 - 300 C)
 - Hidrojence zayıf ilave metal gerekir
 - Son tavlama 300 C
 - Tavsiye edilen son işlem (~750 C)

- Kırılma Muk ve sertlik yüksek
- İyi tokluk
- Düşük karbon değerleri için zayıf süneklik



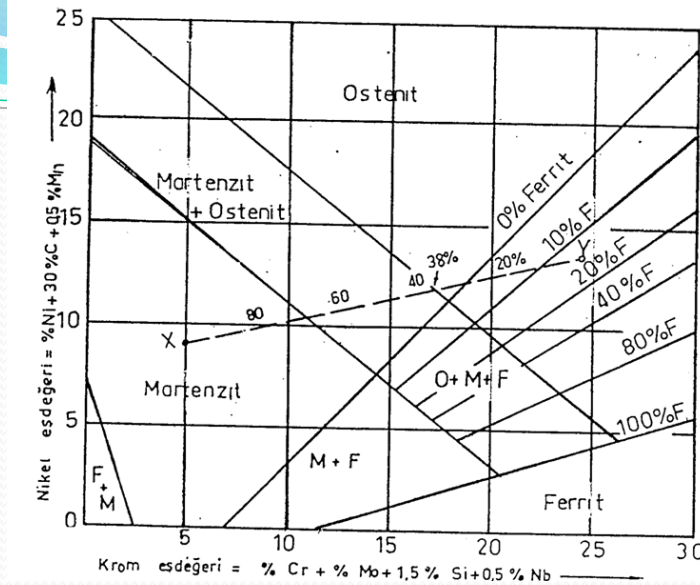
Ostenitik+Ferritik Bölge:

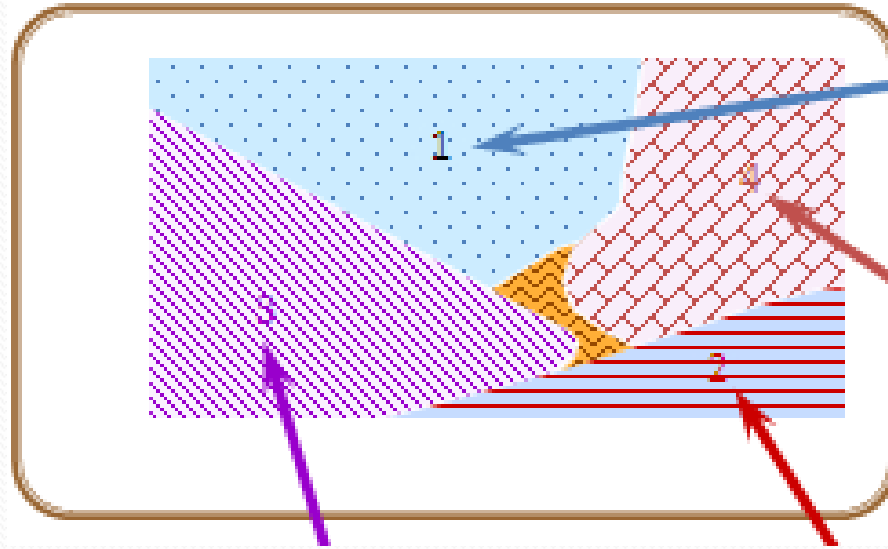
➤ Sıcak çatlak hassasiyeti

➤ Düşük karbon ve stabilizasyona oluşuna bağlı olarak taneler arası korozyona iyi bir dayanım

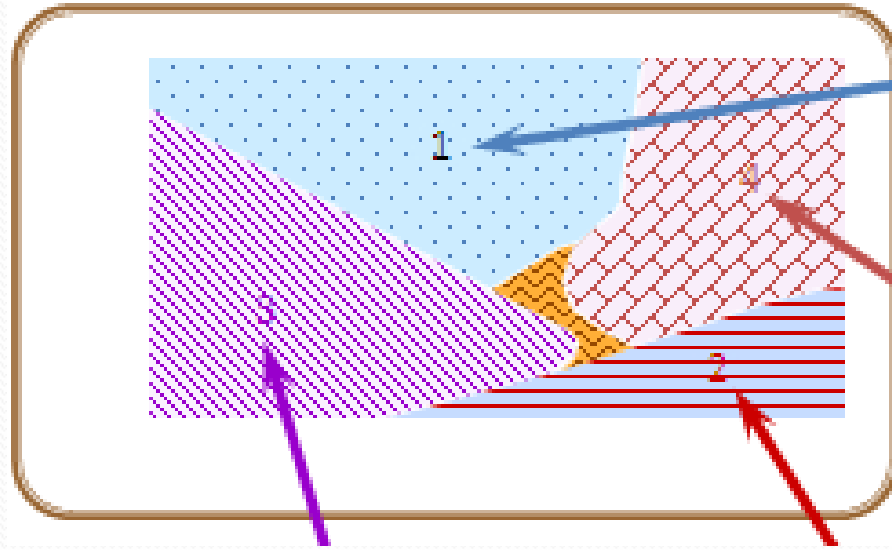
➤ Cr eşdeğerinin % 25'den büyük olması durumunda 550-900 C arasında ferritin "sigma" fazına geçisi ile kırılganlık

➤ Çok iyi tokluk ve süneklik

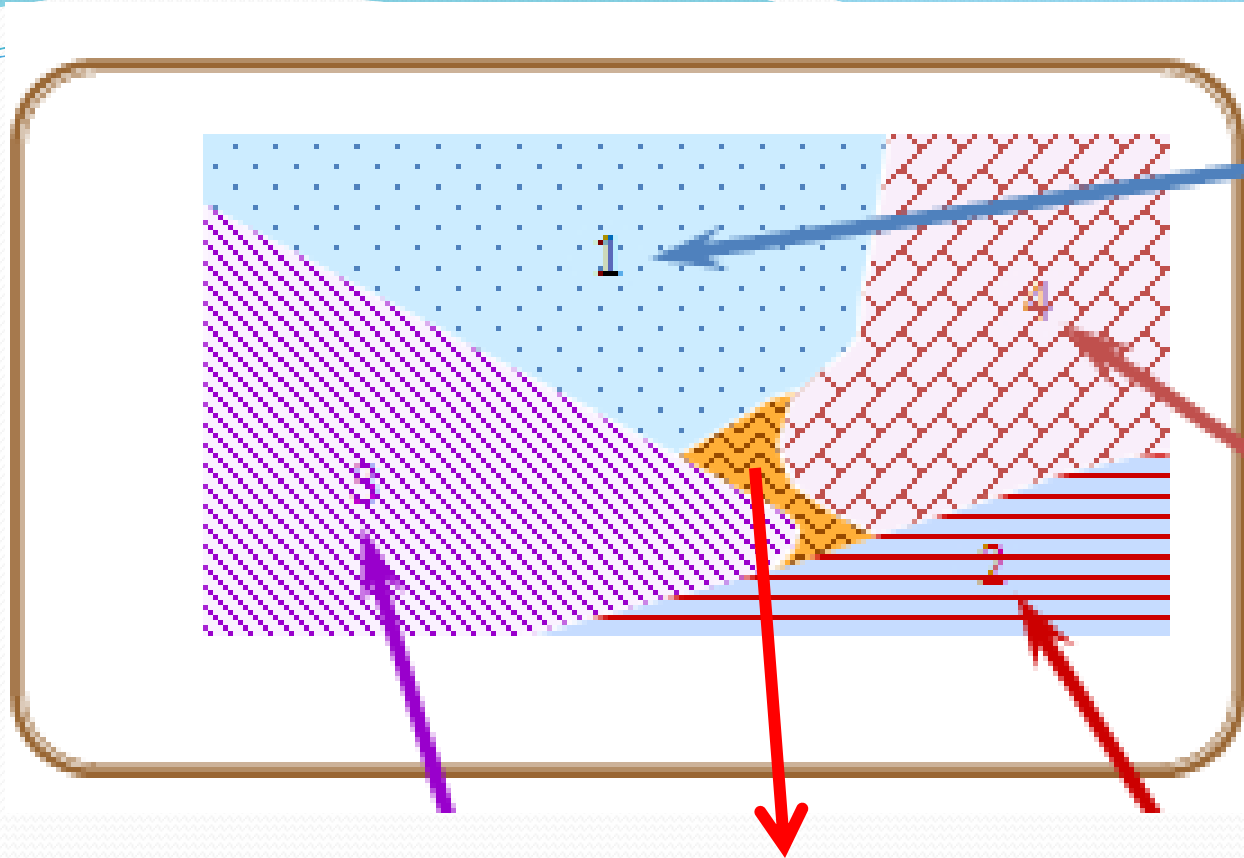




- ✖ * **1. Bölge (1250°C 'nin üzerinde sıcak çatlama eğilimi):** Tamamen ostenitik bir kaynak metalinin söz konusu olabileceği bölgedir. Bu bölgede sıcak çatlama eğilimi çok fazladır. Zira, bazen ostenitik-martenzitik bir içyapı oluşabilir.
- ✖ * **2. Bölge (1150°C 'nin üzerinde tane irileşmesi):** Ferritik Bu bölge az miktarda C içeren % 17 Cr' lu paslanmaz çelikleri gösterir. Bu çeliklerin kaynağında ısının tesiri altındaki bölgede tane irileşmesi sonucunda gevrekleşme olur ve dikişin çentik darbe mukavemeti düşer.

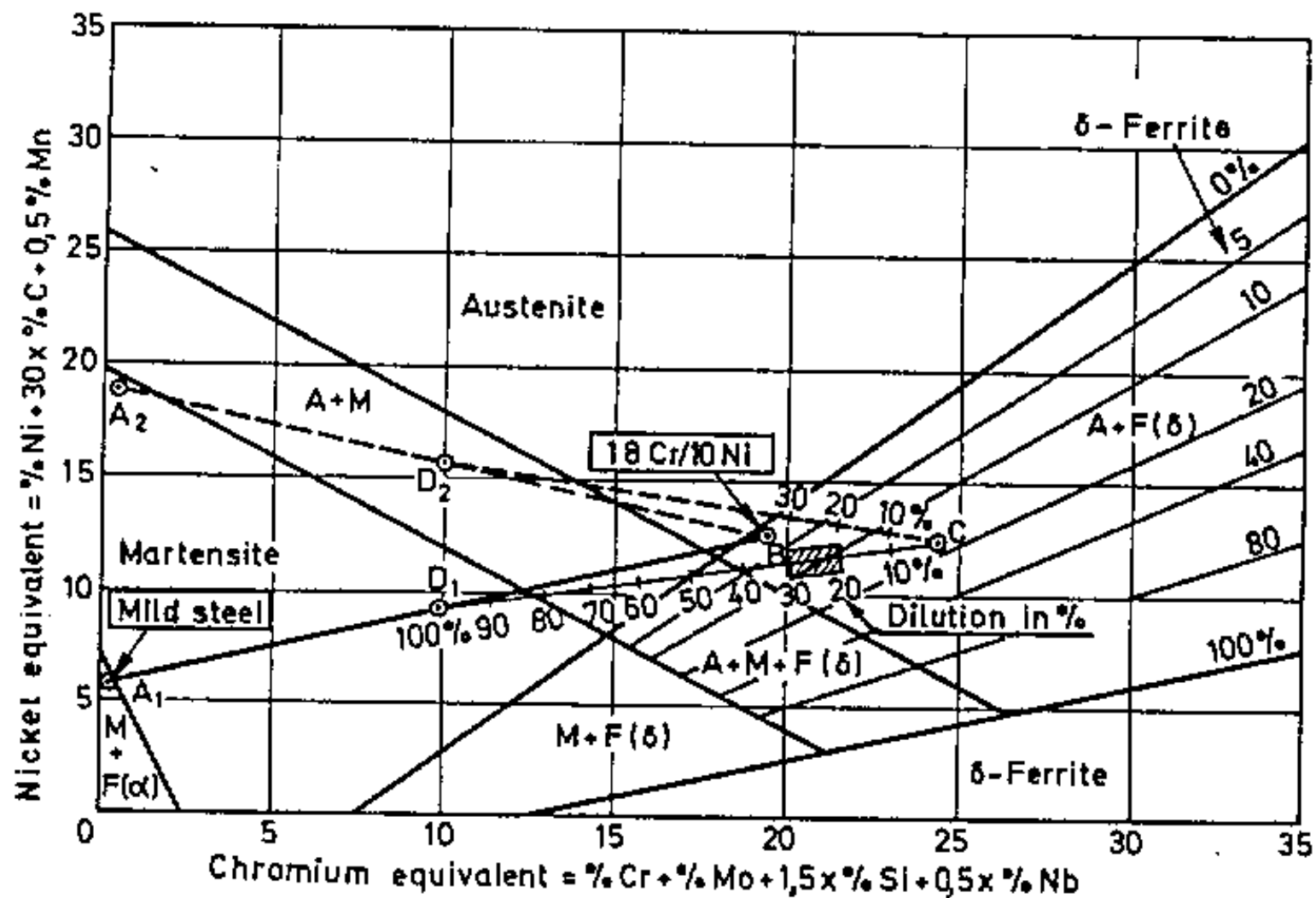


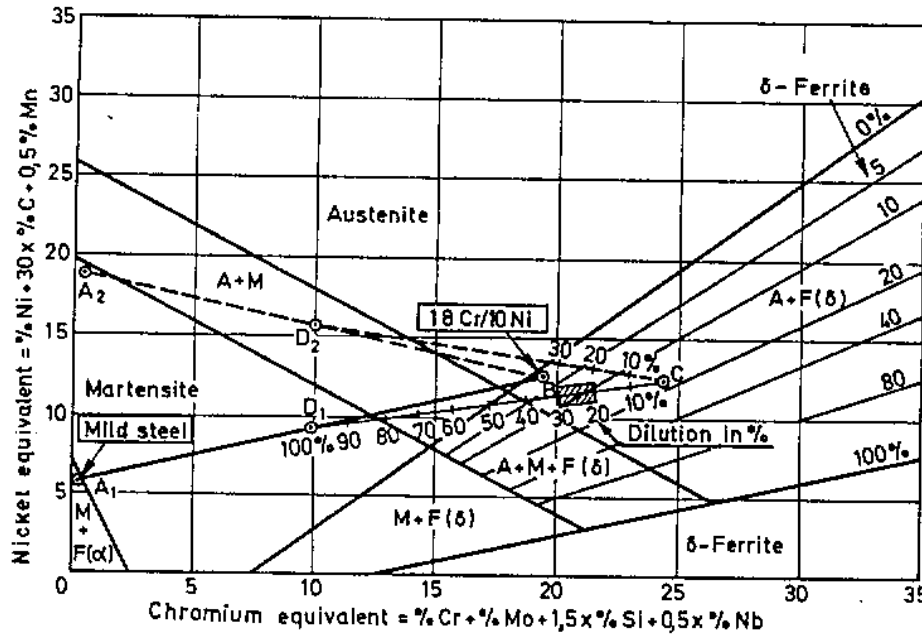
- ✖ * **3. Bölge (400 °C'nin artında sertlik ile çatlama eğilimi): Martenzitik**
Bu bölgede, %0.3-0.5C içeren çelikler, aşınmaya dayanıklı sert dolgu tabakaları, martenzitik yapılı çeliklerde olduğu gibi sert, gevrek, kırılğan martenzit fazı oluşur.
- ✖ * **4. Bölge (900-500 °C arasında sigma fazı gevrekliği): Ostenitik + Ferritik**
Sigma fazı özellikle kromca zengin çeliklerde kendini gösterir. Sigma fazının oluşumunda delta ferrit miktarının etkisi daha önce açıklanmıştı. Bu açıdan elektrod metalinin ve buna bağlı olarak kaynak metalinin delta ferrit içeriği çelik ve elektrod üreticileri tarafından dikkate alınmakta ve delta ferrit miktarının % 10 dan fazla olmaması istenmektedir.



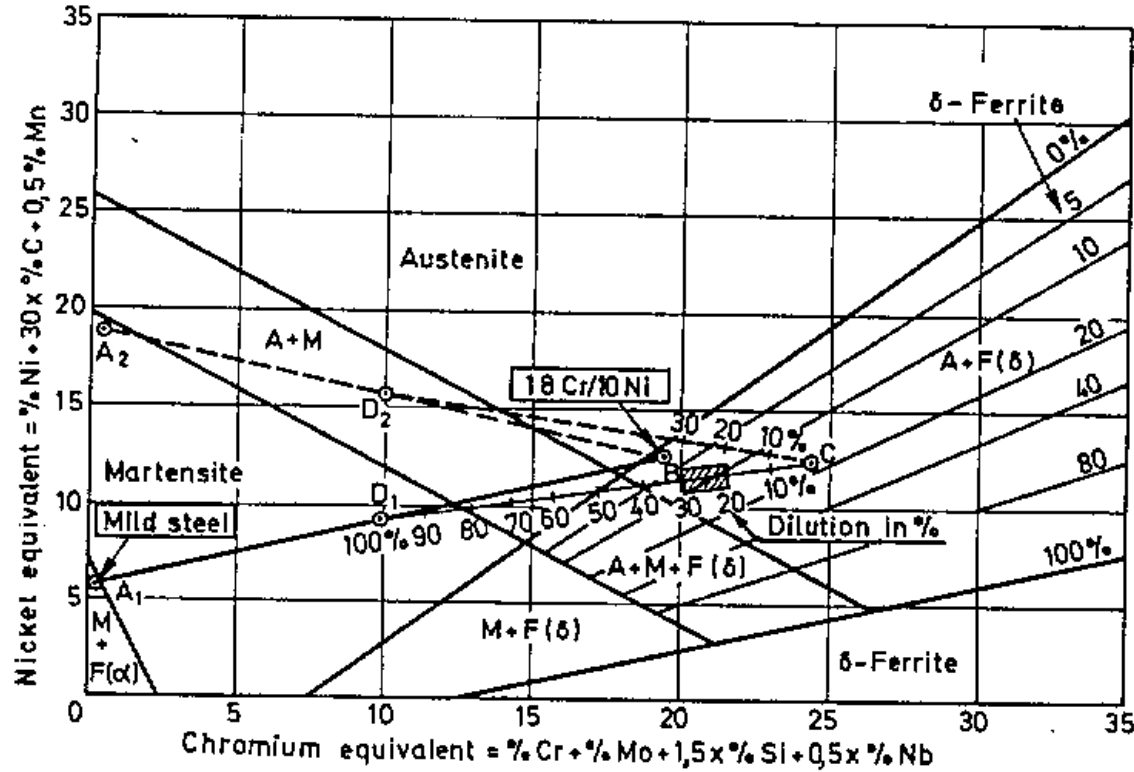
Schaeffler diyagramının orta kısmında % 16 dan % 24 Cr' ne, % 6 dan % 18 Ni_{eş}' ne kadar uzanan üçgen biçiminde küçük ostenitik ve ferritik içyapılı bir bölge vardır ki, bu bölge iyi bir kaynak kabiliyetine sahiptir.

SCHAEFFLER DİYAGRAMI UYGULAMASI

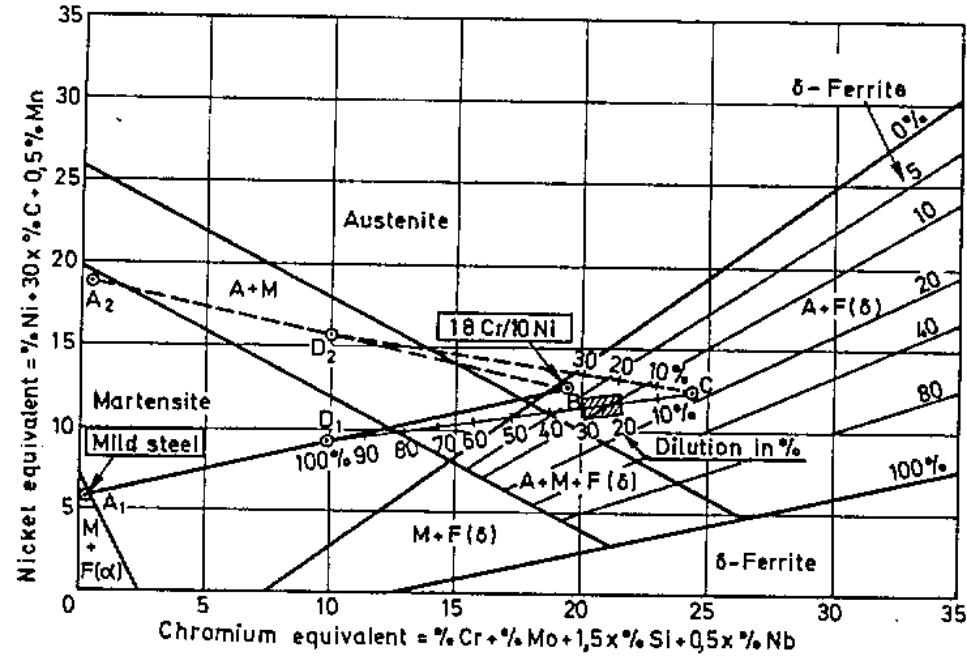




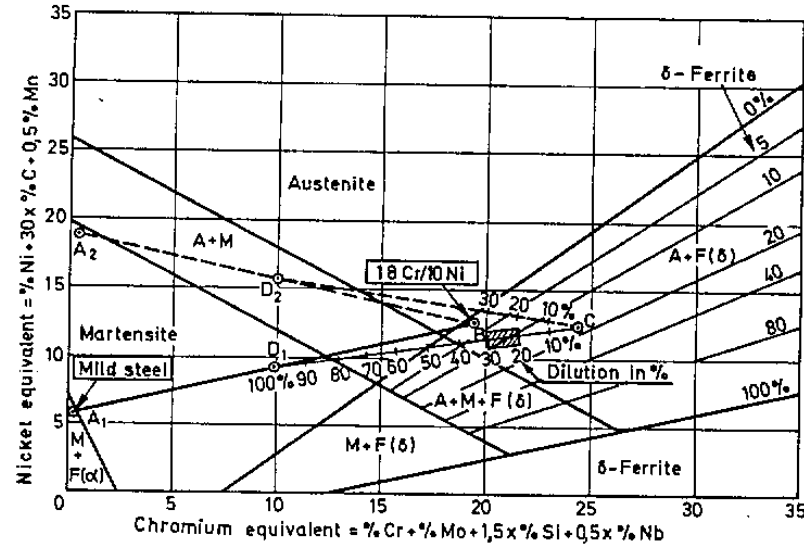
Bu diyagramın pratikteki uygulaması **Şekil**'de görülebilir. Farz edelim ki % 0.2 karbonlu yumuşak çelik (A₁) 18Cr/10Ni ostenitik paslanmaz çelikle (B) birleştiriliyor. Kullanılması gereken ilave metal yüksek alaşımlı 23Cr/12Ni elektrottur. **Şekil**'de tüm kaynak metalinin analizi C noktasına denk gelmektedir. Kaynak sırasında, kaynak metali alaşımsız çelikle kısmen sertleşmiş olacağı için yüksek alaşımlı ilave metalin kullanılması gerekir.



Örnekte eşit miktardaki yumuşak çelikle ostenitik paslanmaz çeliğin (2 farklı esas metal) karışabileceği kabul edilmiştir. Yüksek alaşımlı kaynak metali, eşit miktarda yumuşak çelik ve 18Cr/10Ni tipindeki ostenitik paslanmaz çelikten oluşan D₁ alaşımıyla karıştırılmıştır.



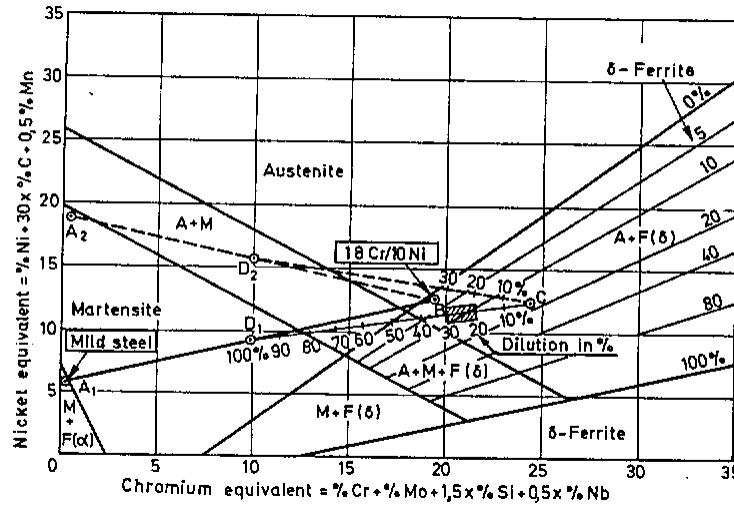
Eğer Şekil'deki D1 ve C noktaları düz bir çizgiyle birleştirilir Değişik kaynak metal karışım yüzde değerlerine bakarak hareket ederiz. Gazaltı kaynak işleminden kaynaklanan karışımın dağılımının %20-30 olduğu tahmininden yola çıkarak ostenit yapıda yaklaşık %10 delta ferrit (taralı alan) içeren kaynak metalinin sıcak çatlağa karşı dayanımının olduğunu söyleriz.



Eğer karışım oranı % 40 ise kaynak metali % 4 delta ferrit içerir ve bu da sıcak çatlak dayanımı için gerekli olan sınırın en alt değeridir. % 50 karışım % 0 ferrit çizgisine denk gelir. Aynı zamanda ostenitin dışında martenzit oluşur. Ostenit katılaşması sonucunda çevre sıcaklığında ferrit eksikliği oluşur. Bunun sonucunda metal sıcak kırılmaya karşı hassaslaşır. Yapıda martenzitin bulunmasından dolayı soğuk çatlak ihtimali de vardır. Bir başka deyişle, kaynaklı birleşmenin %50 karışım da kırılma ihtimali çok fazladır.

Bu örnekler, ostenit ferrit birleşiminde karışımın çatlama dayanımındaki önemini göstermektedir. Yüksek karışım oranına sahip ve tamamen ostenitik paslanmaz çelikler olan ostenit, molibden alaşımlı Cr-Ni çeliklerde Cr-Ni-Mo alaşımlı yüksek ferrit içeriğine sahip 3 nolu kaynak metali kullanılmaktadır. Bu ilave metal aynı zamanda karışmada dalgalanmaların çok olduğu kök pasoları için de uygundur.

Yüksek Ni_{eş} sahip su verilmiş ya da temperlenmiş % 9 nikelli ferritik çeliklerin birleştirilmesinde ya da yüksek karbonlu mangan çeliklerin ostenitik çeliklere kaynağında *Schaeffler* diyagramındaki karışım doğrultusu değişecektir.



Örneğin, yaklaşık %0.6 karbon içeren ve 18 Ni_{es}'e sahip olan karbon çeliğinin (A2 noktası) B noktasındaki 18Cr/10Ni ostenitik paslanmaz çeliğiyle birleştirilmesi çizilmiştir. C noktasıyla gösterilen 23Cr/12Ni ilave metali kullanılmıştır. Kaynak metal alaşımı C noktasını D2 noktasıyla birleştiren karışım doğrusu % o ferrit doğrusuyla çakışır. Bu yüzden kaynak metali bu noktada tamamen ostenittir ve sıcak çatlamaya karşı hassastır.

No	Kısa gösterim	AWS Standart*	Kimyasal Bileşim (%)							Delta Ferrit (% Hacim)	Lineer ısı genleşme katsayısı 20-, 10 ⁻⁶ m/m.K
			C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb		
1	19Cr/9Ni/3Mo	~ E 308Mo	0.05	0.8	1.0	19.0	3.4	9.0	-	18	18.0
2	23Cr/12Ni/L	E	0.02	0.9	1.2	23.0	-	12.0	-	18	17.5
3	23Cr/12Ni/3Mo/L	E 309 LMo	0.02	0.9	1.0	23.0	2.7	12.0	-	25	17.4
4	22Cr/18Ni/5Mn		0.13	0.9	4.5	22.5	-	18.0	-	0	18.0
5	16Cr/70Ni/6Mn/2 Nb	E NiCrFe 3	0.05	0.5	6.0	16-20	-	70.0	2.2	0	14.4

* 1 – 3 arası AWS A5.4 – e karşı gelmektedir; No 5 ise AWS A5.11-83'e karşı gelmektedir.

~ Sadece Isıl genleşme katsayısı bakımından

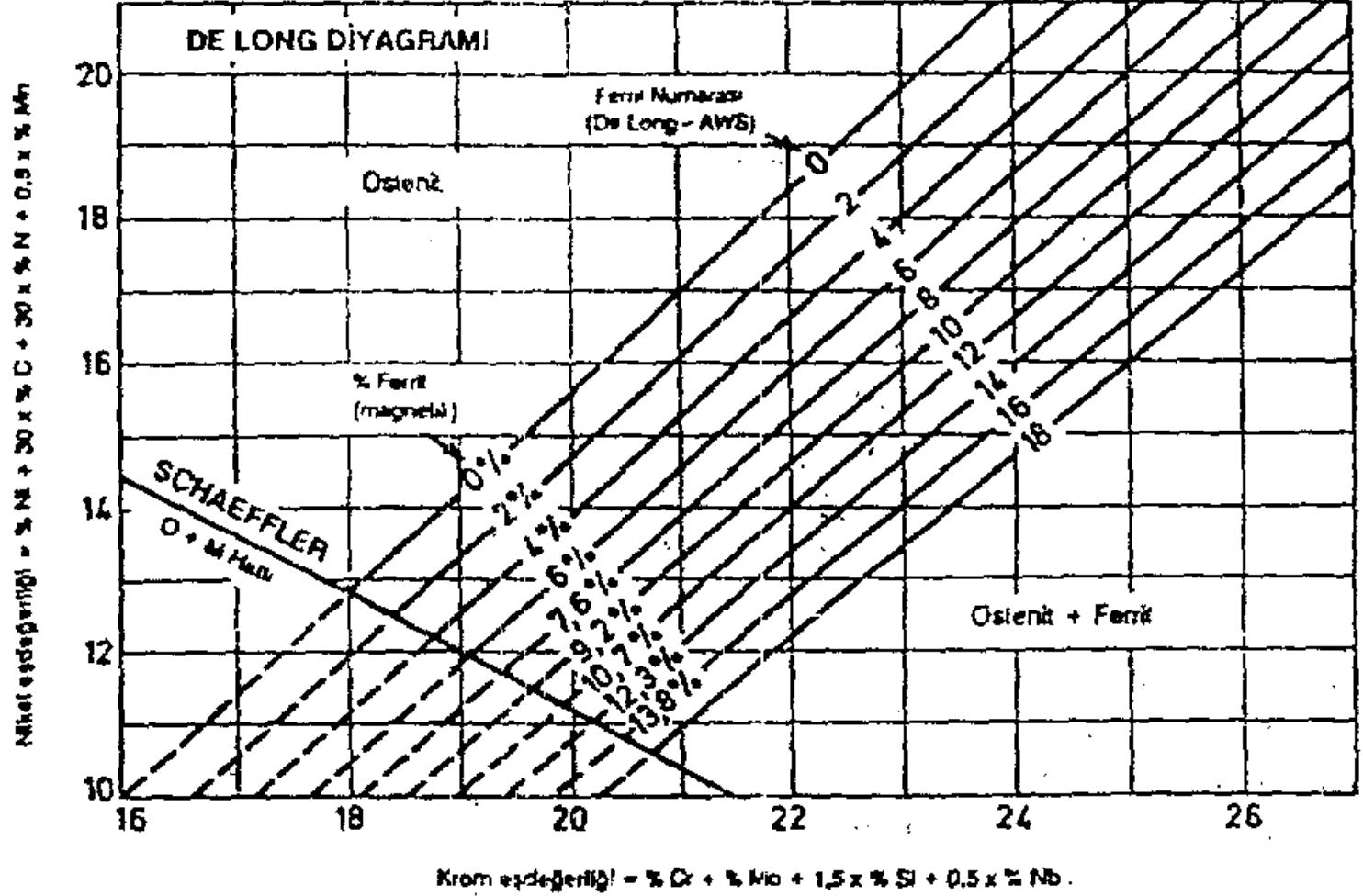
Bu durumlarda yüksek ferrit içeren kaynak metali ve ayrıca yüksek manganez içeren tamamen ostenit kaynak metali (Tablo 'da, sırasıyla no.3,4) bu gibi malzeme kombinasyonlarının kaynağında iyi sonuçlar vermektedir. Yüksek manganez ve karbon içeriğinden dolayı 4 nolu kaynak metali tamamen ostenitik yapıda olmasına karşın yeterli sıcak çatlak dayanımına sahiptir.

Nikel esaslı ilave metalleri sıcak çatlağa karşı dayanım gösterirler. Bu durum karışım oranının yaklaşık % 35 seviyesine kadar sürer.



DELONG DİYAGRAMI

✦ Schaeffler' in uzun deneysel araştırmaları sonucu ortaya çıkarttığı bu diyagramda delta ferrit % olarak ele alınmaktadır. Manyetik ferrit ölçmeler üzerine yapılan çalışmalar çeşitli araştırmacılar tarafından metalografik ve radyografik İçyapı analizlerinin incelenmesi şeklinde yıllarca sürmüş ve uzun yıllar farklı laboratuarlarda farklı metodlar ile yapılan lme değerleri arasında sapmalar olduğu ortaya çıkmıştır. Bu deneyimler zerine **De Long**, kaynak metallerinin sıcak çatlama direncinin arttırılması için delta ferrit miktarını ölçen yöntemlerin getirdiği problemleri mükemmel bir şekilde çözümlemiştir **De Long**' un araştırmaları sonucu geliştirdiği De Long diyagramı ilk defa 1956 yılında yayınlanmıştır.

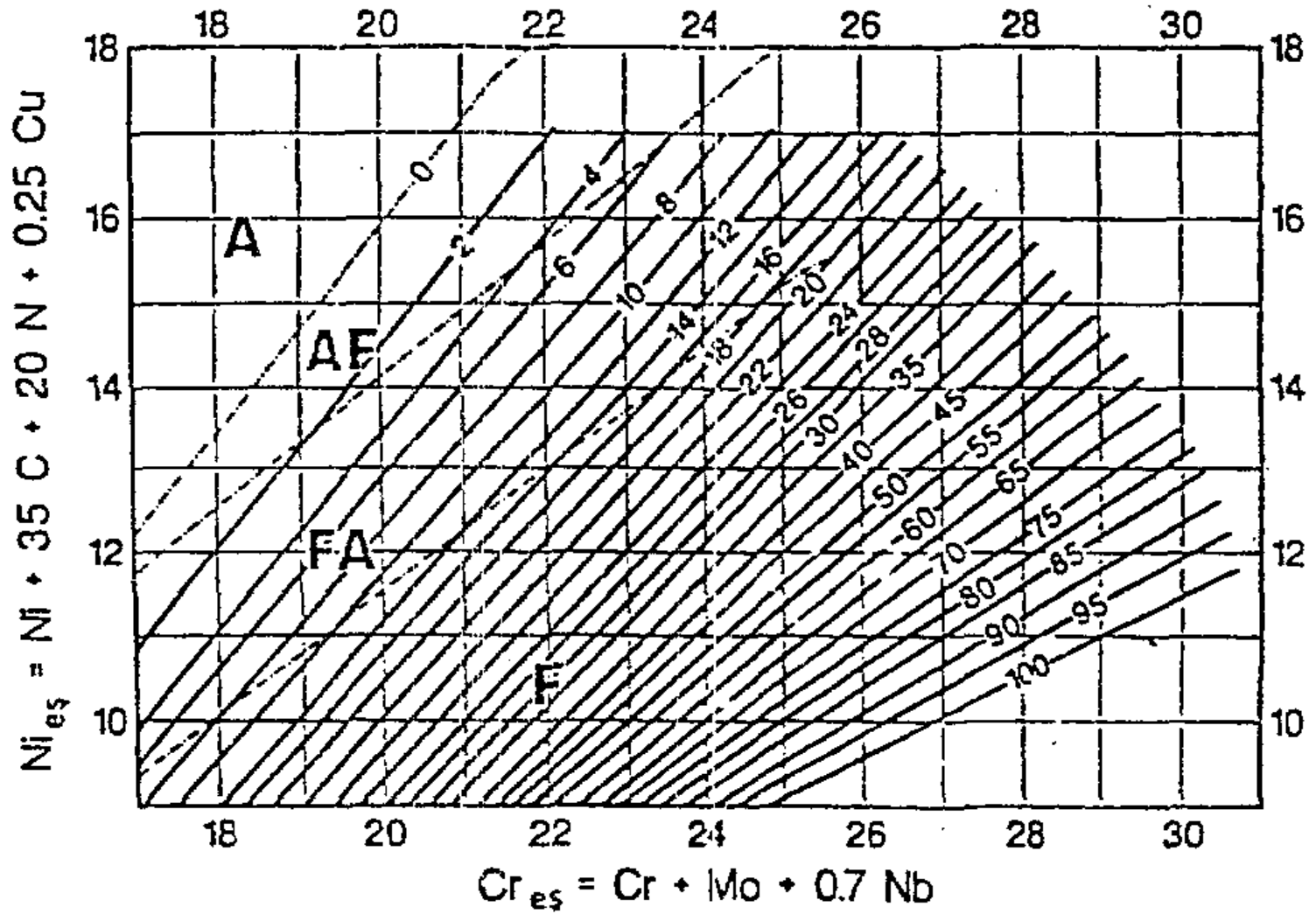


- De Long diyagramında, Schaeffler diyagramında $Ni_{eş}$ bağıntısında yer almayan Azotun (N)' un kuvvetli ostenit dengeleyici etkisi dikkate alınır. Zira, ostenit dengelemede C ve N, Ni' den 30 kat daha etkilidir. Hatta ostenitik paslanmaz kaynak metalinde bulunabilecek az miktardaki bazı elementler dahi mikroyapıyı etkileyebilir; örneğin titanyumun bulunması kaynak metalindeki ferrit miktarını birkaç ferrit sayısı arttırabilir.
- De Long diyagramında geniş bir skalada birbirine yakın bölüntülerle delta ferritin saptanmasında hata payı oldukça düşürülmüş ve delta ferrit içeriği % 0 ila % 15 arasında optimum olarak gösterilmiştir. Bu diyagram aslında Schaeffler diyagramının küçük bir alanından başka bir şey değildir.

✖ Paslanmaz çelik kaynak metalllerinde, metalografik ölçme yöntemleri ile kaynak metalinde tam olarak ne kadar delta ferrit bulunduğunu saptamanın zorluğunun anlaşılması üzerine manyetik ölçme aletlerinin geliştirilmesi sonucunda delta ferrit ölçümünde Standard tekniklerin ve ferrit sayılarının kullanılması yönünde araştırmacılar ve Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW) arasında fikir birliği oluşmuş, bunun sonucunda da ferrit numarası (FN) kavramı ortaya çıkmıştır.

✕ Schaeffler ve De Long diyagramlarındaki eksiklikler ve sınırlamalar 1930'lu yıllarda keşfedilen ve 1970'li yıllardan sonra geliştirilen ve de son yıllarda ön plana çıkan çift fazlı (dupleks) paslanmaz çeliklerin kaynak metalllerinde delta ferritin hassas olarak saptanmasına yetmemektedir. Bu açıdan 1988 yılında AWS Yüksek Alaşımlar Komitesi tarafından organize edilen bilimsel araştırmalar sonucu WRC-1988 yeni saptama diyagramı geliştirilmiş, bu diyagramdaki eksiklikler de geçen süre içinde yapılan araştırmalar sonucunda modifiye edilerek WRC-1992 diyagramı ortaya çıkarılmıştır.

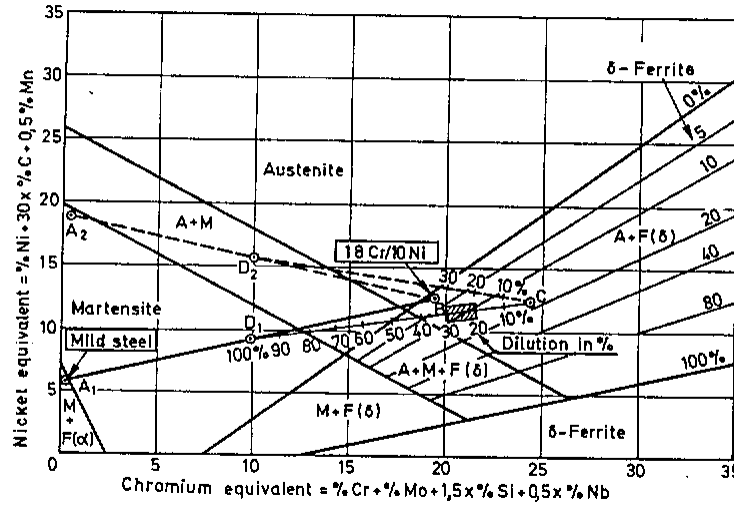
- ✖ Bugün bu yeni diyagram yalnız dupleks paslanmaz çeliklerin değil bazı ostenitik paslanmaz çeliklerin ve özellikle tam (süper) ostenitik paslanmaz çeliklerin de kaynağında elektrot seçiminde kullanılmaktadır
- ✖ Burada şunu belirtmekte yarar vardır, araştırmacılar ve elektrod üreticileri delta ferrit içeren kaynak metallerinin, ferrit içermeyen kaynak metallerine nazaran sıcak çatlaklara karşı daha dirençli olduklarını bulmuşlardır ve günümüzde üretilen paslanmaz elektrodlar ve teller kaynak metalinde bir miktar delta ferrit içerecek şekilde üretilirler.
- ✖ Bunun nedeni ostenitik kaynak metali içinde sıcak çatlakların oluşumuna neden olacak segregasyonların eklenen ferritik yapıdan dolayı minimum olmasıdır.



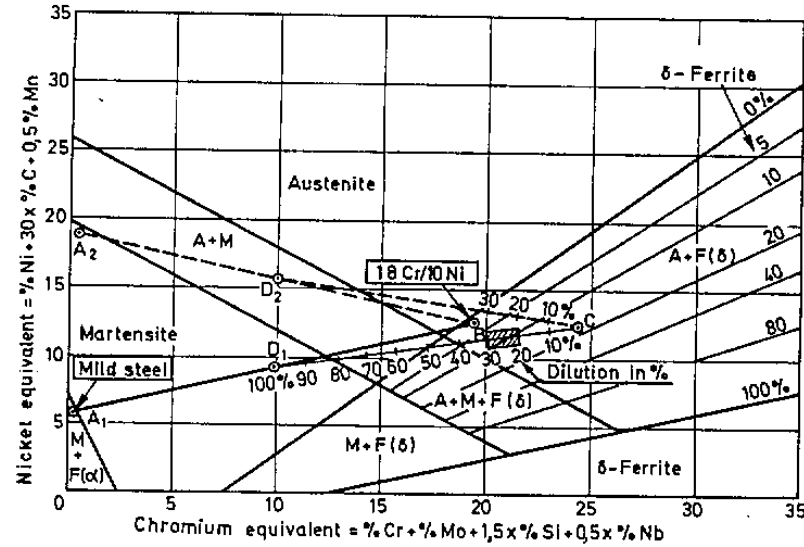
Şekil 2.- Ferrit numarasının saptanması için geliştirilen WRC-1992 diyagramı

Ostenitik – Ferritik Bağlantıların Kaynak Edilişi

- ✖ Ostenitik ferritik bağlantılar örtülü elektrotla ya da TIG veya MIG ile gayet iyi kaynak edilir. Karışım %50 seviyelerinde olup özellikle TIG kaynağında kök pasosu kaynağın en kritik olduğu yerdir. Kaynak yapılan metalde çatlak oluşum olasılığı çok yüksektir. Diğer bir kritik durum ise “tekli V” kaynağında olmaktadır. Bağlantının zayıf hazırlanmasından dolayı kök pasoda yüksek karışım oranları beklenir. Bu yüzden ince parçalarda mümkün olduğunca “tek V” bağlantısı yerine “çift V” bağlantısı yapılması tavsiye edilir. Bütün bağlantı hazırlıklarının birbirine uyması sağlanmalıdır. Ayrıca ostenitik ilave metaliyle kaynak edilmiş bütün kök pasolarının yüksek alaşımlı ve yüksek delta ferrit içeriğine sahip metallerle kaynak edilmeleri gerekir. Taşlama işleminden sonra küçük çaplı elektrotlarla yivin hazırlanması ostenitik-ferritik bağlantıda çatlak oluşumuna karşı olumlu bir faktördür.



- ✖ Sonraki pasolarda aynı miktarda ferritik ve ostenitik malzeme erir. Kaynak işlemi D₁ ya da D₂ noktasına mümkün olduğunca yakın olur. Eğer bu durum gerçekleşmezse, örneğin eriyen malzeme ferritik malzeme ise D₁ noktası A noktasına yaklaşır. Sonuçta C-D₁ karışım doğrusu yukarı kayar ve %0 ferrit içeren % 30 karışımı olduğu kaynak metali martenzit bölgesinin içine girer.
- ✖ 150°C nin üzerinde ön tavlamaya ihtiyaç duyan ve ostenitik paslanmaz çelik ve ferritik çelik arasında yapılan bağlantının kaynak kabiliyeti sınırlı olduğu için ferritik malzemelerin bağlantı yüzeyinde alaşımlı ostenitik elektrot kullanılarak arayüzey (buttering) tabakalanır.



Eğer karışım oranı % 40 ise kaynak metali % 4 delta ferrit içerir ve bu da sıcak çatlak dayanımı için gerekli olan sınırın en alt değeridir. %50 karışım %0 ferrit çizgisine denk gelir. Aynı zamanda ostenitin dışında martenzit oluşur. Birincil ostenit katılaşması sonucunda çevre sıcaklığında ferrit eksikliği oluşur. Bunun sonucunda metal sıcak kırılmaya karşı hassaslaşır. Yapıda martenzitin bulunmasından dolayı soğuk çatlak ihtimali de vardır. Bir başka deyişle, kaynaklı birleşmenin %50 karışım da kırılma ihtimali çok fazladır.

Bu örnekler, ostenit ferrit birleşmede karışımın çatlama dayanımındaki önemini göstermektedir. Yüksek karışım oranına sahip ve tamamen ostenitik paslanmaz çelikler olan ostenit molibden alaşımlı Cr-Ni çeliklerde Cr-Ni-Mo alaşımlı yüksek ferrit içeriğine sahip 3 nolu kaynak metali kullanılmaktadır. Bu ilave metal aynı zamanda karışmada dalgalanmaların çok olduğu kök pasoları için de uygundur.

**Farklı Ostenitik-ferritik çeliklerin kaynaklarında kullanılan tüm kaynak metallerinin bileşimi
ve ısıl genleşme katsayıları ve delta ferrit içerikleri**

No	Kısa gösterim	AWS Standart*	Kimyasal Bileşim (%)							Delta Ferrit (% Hacim)	Lineer ısıl genleşme katsayısı 20-, 10 ⁻⁶ m/m.K
			C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb		
1	19Cr/9Ni/3Mo	~ E 308Mo	0.05	0.8	1.0	19.0	3.4	9.0	-	18	18.0
2	23Cr/12Ni/L	E	0.02	0.9	1.2	23.0	-	12.0	-	18	17.5
3	23Cr/12Ni/3Mo/L	E 309 LMo	0.02	0.9	1.0	23.0	2.7	12.0	-	25	17.4
4	22Cr/18Ni/5Mn		0.13	0.9	4.5	22.5	-	18.0	-	0	18.0
5	16Cr/70Ni/6Mn/2 Nb	E NiCrFe 3	0.05	0.5	6.0	16-20	-	70.0	2.2	0	14.4

* 1 – 3 arası AWS A5.4 – e karşı gelmektedir; No 5 ise AWS A5.11-83'e karşı gelmektedir.

~ Sadece Isıl genleşme katsayısı bakımından

Şu da belirtilmelidir ki ferritik bağlantı yüzeylerinde sadece bir paso arayüzey gerekmektedir. Arayüzey ilave kaynak metalinin yanı sıra uygun ön tavlama sıcaklığının da olması gerekir. Bundan sonra bağlantı kaynak edilebilir. Arayüzey kullanarak kaynak sırasında oluşan yüksek gerilmeler ferritik çeliğin ITAB'de ostenitik arayüzey ve ostenitik kaynak metali arasındaki bölgeye kaydırılır. Ön tavllanmış ferritik çeliğe yığılan arayüzey ısı girişinin düşük olmasını sağlamak için sadece küçük çaplı elektrotlarla kaynak yapılır. Bundan sonraki pasolar kalın elektrotlarla yapılabilir. Örneğin, eşit oranda ferritik çelik ve önceden yapılmış tampon bölgenin kaynak yapılmasından sonra kaynağa standart ostenitik elektrotlarla devam edilir. Ostenitik tampon bölge ile ostenitik komşu çelik arasında bağlantı yapılmış olur. Bu yüzden ön tavlama bundan sonra gerekli değildir.

✖ Kural olarak sadece tavllanmış elektrotlar (ısıtılmış) kullanılabilir. Eğer düşük alaşımlı çelik ancak sınırlı bir kaynak kabiliyetini sağlıyorsa, düşük hidrojen içeren ilave metali sağlayan ostenitik elektrotların kullanılması gerekir. Yoksa düşük alaşımlı çeliğin ITAB'ına soğuma sırasında ostenitik olduğu sürece hidrojen yayılır. Daha sonra ITAB'ın ostenitik yapısı tamamen ya da kısmen soğuma sırasında martenzite dönüşür. Eğer ITAB'a ostenitik kaynak metalinden daha fazla hidrojen geçmişse soğuk kırılma görülebilir.

✖ **Ostenitik-ferritik bağlantıların kaynağında şu gibi işlemler iyi sonuçlar vermiştir:**

- ✖ - Düşük ısı girdisi;
- ✖ - Ara paso sıcaklığının en fazla 150°C seçilmesi;
- ✖ - Eğer düşük alaşımlı çelik, öntavlama ve 150°C'nin üzerinde ara paso gerektiriyorsa, yüksek alaşımlı yeniden ısıtılmış elektrotlar kullanılarak bağlantı yüzeyinde arayüzey oluşturulması gerekir. Daha sonra normal ostenitik elektrotla devam edilir.
- ✖ - Elektrot çapının iki katından fazla elektrodu hareket ettirmemek;
- ✖ - Çift V ağız açılarak paso yapılması.