

## XV — MUKAVEMET SORUNLARI

### KAYNAKLI BİRLEŞMELERDE YORULMA

#### YORULMA KIRILMASININ GENEL KARAKTERİSTİKLERİ

##### *Tanımlama*

En geniş anlamıyla "yorulma" terimi, tekrarlanan ya da artıp azalan gerilmelere maruz metalik malzemelerde meydana gelen değişmelerle ilgilidir; kaide olarak terim, özellikle, bu tür gerilmelerin uygulanmasının sonucu olarak bir kırılma şeklini ifadede kullanılır. Yorulma kırılması hiç kuşkusuz bir metalik malzemenin koşullarında bir kesin değişmeyi temsil eder ve dolayısıyla pratik amaçlar açısından yorulma davranışının en önemli görünümü olmaktadır. Başka değişmeler de vaki olmakta ise de bunlar müspet maddi zararlar bu denli açıklıkla bağlantılı değildir. Nihai kırılmaya götüren mekanizma bir yük ya da gerilme sayıklı birikimine bağlıdır. Aynı şekilde, kırılmanın kendisi de ilerleyen bir karakter arz eder ve bu açıdan öbür tür kırılmalardan, özellikle pratik olarak ani sayılan gevrek, klivaj kırılmasından farklıdır. Birçok durumda yorulma yüklemesi tek bir çatlağın gelişmesinin sonucu olmakta, ancak, çatlak dolayısıyla kesitte meydana gelen alan küçülmesi veya çatlağın doğurduğu gerilme yoğunlaşması ya da "çentik" etkisi, ya plastik şekil değiştirme ve sünek ya da klivaj yoluyla kırılmaya götürebilir.

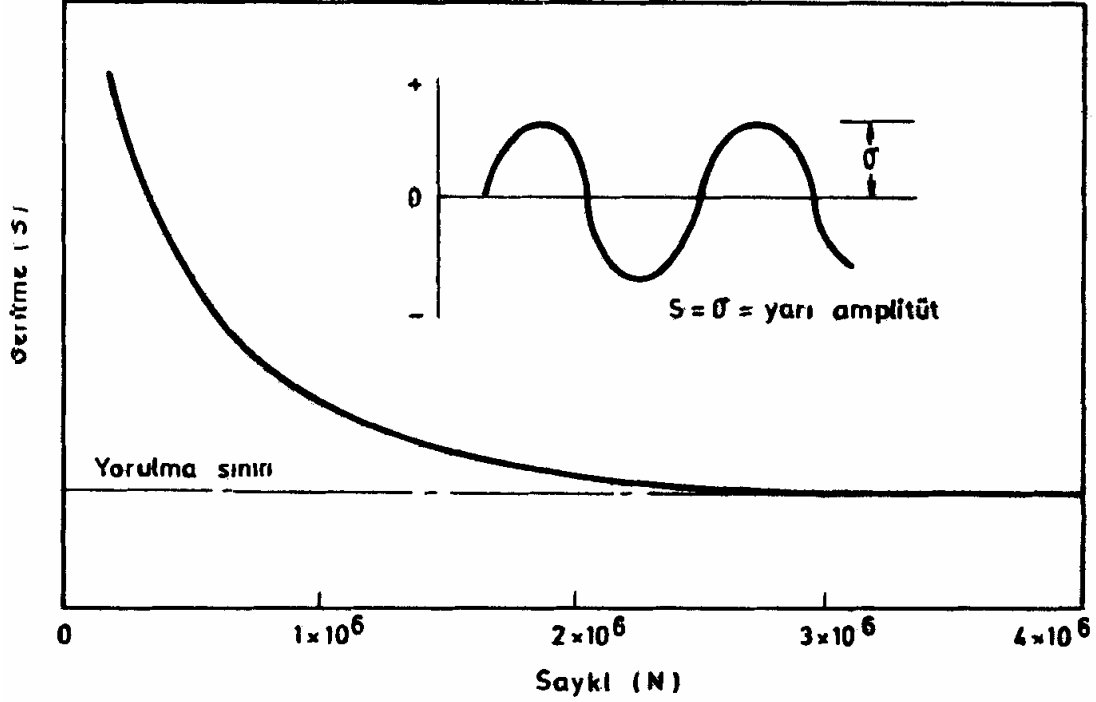
Yorulma kırılması meydana getiren gerilmeler ya çekme, basma, eğme, burma gibi basit, ya da bu basit gerilmelerin bir birleşimi olabilir. Burada tetkik edilmeyecek özel durumlar (yorulma ile birlikte aşırı şekil değiştirme) dışında; *kırılma için gerekli gerilme amplitüdü, malzemenin elastik sınırının altındadır*; başka deyimle bu gerilme tek bir kez uygulandığında, kırılma, hatta plastik şekil değişme bile hasıl etmez.

#### S - N (WÖHLER) EĞRİLERİ

Bir malzemenin dayanıklılığının, yani yorulma yoluyla kırılma hasıl etmek için gerekli gerilme sayıklı sayısının, uygulanan gerilmenin büyüklüğüne bağlı olduğu açıkça saptanmıştır. İlişki genel olarak S - N, ya da Wöhler eğrisiyle karakterize olup bu eğri, birbirinin eşi deney parçalarının deney sonuçlarını grafiğe işleyip bu deneysel noktalar arasında bir ortalama eğri çizerek elde edilir. Eğrinin gösterdiği ilişki, doğal olarak, sadece her bireysel deneyde tüm gerilme sayıklarının da birbirine eş olması koşuluyla geçerlidir.

Absiste geniş bir dayanıklılık alanını kapsamak gerektiğinden (N) gerilme sayıkları genellikle bir logaritmik ölçekle işlenir; ordonatta gerilme amplitüdü lineer ya da logaritmik ölçekle gösterilebilir.

Bir tipik S - N eğrisi şek. 213'de gösterilmiştir. Eğriye yatay asemptota tekabül eden gerilme düzeyi *yorulma sınırı* olarak bilinir. Yorulma sınırının üstündeki gerilmeler, bir uygun sayıklı sayısı biriktiğinde, hiç şüphesiz zarara götürür, oysa ki yorulma sınırının altındaki alan, deney



Şek. 213 — Tipik S - N (Wöhler) eğrisi.

parçalarının kırılmadan kaldıkları koşulları temsil eder. Bununla birlikte yorulma sınırının malzemenin bir genel niteliği olmadığı bilinmelidir. Alüminyum alaşımları görünür yorulma sınırı arz etmeyebilirler; aynı şey yorulma gerilmelerinin yüksek sıcaklık veya korozif ortamla birlikte bulunması halinde, çeliklerde de vaki olabilir. Bunların dışında, belli bir malzeme, deney yöntemi ve başka etmenlere bağlı olarak, bir yorulma alanı arz edebilir. Pratik amaçlar için  $a_N$  yorulma mukavemetinin en az akla gelen niteliğini tanımlamak mutlak olmuştur; burada  $a$ , belli bir  $N$  yükleme sayklı için ele alınmış gerilme kademesidir. Örneğin kaynaklı çelik parçalarda farklı birleşme şekillerinin yorulma mukavemetlerinin kıyaslanmaları çoğu kez  $N = 2 \times 10^6$  sayklı için saptanmış  $\sigma_N$  değerleri olarak yapılır.

#### *Yorulma ile kırılmaya götüren etmenler*

##### *Genel*

Önce genel uygulama ile kaynaklı olsun ya da olmasın her numunenin davranışını etkileyen etmenler ele alınacak, sonra da bir kaynaklı birleşme içeren parçaların özel durumu irdelenecektir.

Yorulmayı etkileyen genel etmenler üç grupta toplanır:

- I) Parça ya da konstrüksiyonun tasarımı ve görünümü
- II) Deney ya da çalışma koşulları
- III) Deney parçası ya da konstrüksiyon malzemesi.

##### *Parçanın tasarımı ve görünümü*

S-N (Wöhler) eğrisinin şekli, çalışma sırasında hasıl olan gerilmelerin değerlendirilmesinde ya da sayklic gerilmelere maruz parçaların çalışan kesitlerinin hesaplanmasında yapılan hatanın

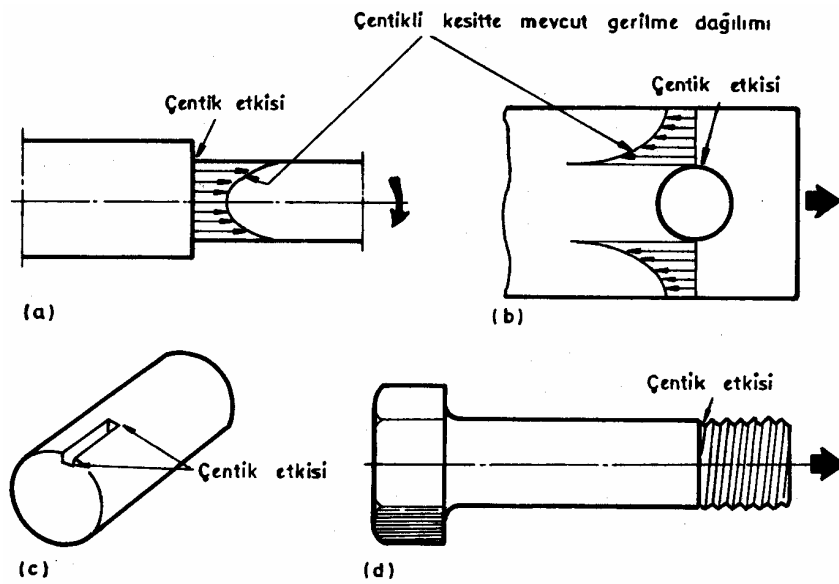
yorulma kırılmasına götürebileceğini açıkça gösterir. Bununla birlikte, S - N eğrisi ve yorulma sınırı, yukarıda söylendiği gibi, belli bir malzemenin değişmez bir niteliğini temsil etmez. Yorulma mukavemeti, özellikle, gerilme yoğunlaşmalarının varlığından derinden etkilenir ve bu yoğunlaşmalar çok türlü hasıl olabilir. Bu itibarla bir S - N eğrileri ailesinin ortaya çıkması olası olup bunlardan her biri, aynı şekilde denenmiş ama belli bir gerilme yoğunlaşması etkisine bağlı, aynı malzemeye uygulanabilir.

O, halde, tasarımda, referans olarak kullanıldığında S - N eğrisi, konstrüksiyonun tasarımında, geometrik görünümü açısından uygulanabilir olacaktır.

Bir konstrüksiyonun genel görünümünün hangi yolla gerilme yoğunlaşması hasıl ettiğine dair bazı örnekler şek. 214'de verilmiştir. Çalışma sırasında vaki olmuş birçok kırılma, konstrüksiyon ve endüstri tesislerinde bu tür süreksizliklerin olumsuz etkilerine dikkat edilmemiş olması ve yorulma nitelikleri açısından da uygun "çentikli numune" verileri seçiminin ihmal edilmiş olmasından ileri gelmiştir.

#### Çalışma koşulları

Uygun yorulma verilerinin seçimi ve emniyetli çalışma gerilmeleri için doğru tasarım önlemleri, S- N eğrilerinin çizilmesinde kullanılanlarla aynı tipte çalışma yüklemesi koşullarının, başlıca, gerilmenin bir sabit amplitüd değişmesinin varsayılmasını gerektirir. Sabit bir eğme momentine tabi dönen shaftlar için varsayım doğru kabul edilmiş olup benzer durumlar mevcuttur. Bununla birlikte eğer uniform olmayan ya da gelişigüzel bir yükleme hesaba alınmıyorsa, ki bu çoğu kez vaki olur, S - N eğrisi tasarım için doğrudan bir esas olarak yetersiz kalır. Bir basit örnek verelim: Sabit amplitüdü bir yükleme ve buna tekabül eden S - N eğrisinin ömür için peşinen sunduğu değer aslında, çalışma sırasında biriktirilecek toplam sayıkl sayısının ancak küçük bir oranını temsil ettiğinden bilinmezlikten gelen fazla yükleme periyodlarına rağmen ele alınır.



Şek. 214 — Sık rastlanan çentik etkileri: (a) ani kesit değişimi, (b) delinmiş delik, (c) dik köşeli kama yuvası ve (d) dişli civata.

Bunun sonucunda da normal yükleme saykları düzeyinin kırılmaya götürmeyeceği belli iken aslında bu kırılma vaki olur. Fazla yükleme periyodlarının teşvik ettiği çatlak başlangıcı ortaya çok ciddi bir çentik etkisi meydana getirir şöyle ki çatlağın ilerlemesi "normal yükleme düzeyi"nde de sürer.

Bu itibarla tasarımda rast gele yükleme modellerinin yorulma ömrü üzerindeki etkisinin değerlendirilme sorununa özel dikkat sarf etmek gerekir ve bu, mevcut olan ve bir ciddi esasa dayanmayan kaidelerden daha ileri bir şeylerin ortaya konması için sürekli araştırmalara konu olmaktadır.

Birçok sınaî uygulamada, sayklic (devrî) gerilmelere maruz parçalar aynı zamanda yorulma mukavemetini azaltma yönünde etki yapan bir koroziif çevrede çalışır. Çentik etkileri, korozyon karıncaları tarafından başlatılır ve "bıçak çizgisi" korozyon tahribatı, yorulmayla birlikte aynı anda ortaya çıkıp bir bileşik etki yapar. Bu itibarla korozyon yorulma deneyleri, bazı özel durumlarda, değer taşır.

### *Malzeme*

Metal ve alaşımların yorulma mukavemetleri genellikle malzemenin çekme dayanımı nitelikleri ile ilişki arz eder ancak bunun için pürüzsüz, parlatılmış ve dolayısıyla her türlü gerilme yoğunlaşma etkisinin bertaraf edilmiş olması bir ön koşuldur. Bununla birlikte birçok malzeme, çelikler ve alüminyum alaşımları dahil, çentik varlığına hassas olup çekme dayanımı nitelikleri ne denli yüksek olursa, bunların işbu hassasiyeti de o denli fazla olur. Bunun sonucu olarak çentikli numunelerin yorulma mukavemeti, çentiksiz yorulmanınki artsa da, çekme mukavemetiyle orantılı olarak artmaz. Çentiğe hassasiyet, yorulma çalışması için malzeme seçiminde en önemli mülâhaza olup aşağıda göreceğimiz gibi bunun kaynakla ilgili olarak özel anlamı vardır.

Isıl işlem ve çekme dayanımı nitelikleri ya da abrazyona, korozyona veya sürünmeye mukavemeti yükseltmek için başvuru olan sair işlemlerin etkileri, aynı şekilde yorulma niteliklerini önemli ölçüde değiştirebilir. Bunun faydası kadar olumsuz etkileri de olabilir: fazla ısıtma ya da dekarbürasyon, yüksek sıcaklıkta ısıl işlemin sonucu olup yorulma mukavemetine ters etki yapmış olabilir. Özellikle yüzeylerin etkilenmesi önemli olmaktadır şöyle ki yüzey koşulunun yorulma mukavemeti üstünde başat etkisi vardır. Aynı zamanda, tamamen homojen malzeme her zaman düşünülemez ve gerilme yoğunlaşmasının artışına neden olan yüzey altı kusurlar, şüphesiz, mukavemet azalmasına yol açar.

Haddelenmiş, dökülmüş veya doğulmuş, ya da kaynakla imal edilmiş ürünler arta kalmış gerilmeleri içerirler. Bu gerilme sistemleri dış yük uygulaması olmadan mevcut olup, arta kalmış (bakiye) basınç gerilmeleri tarafından dengelenmiş çekme bileşkenleriyle bir denge halindedir. Bu itibarla, uygulanmış yüklerin meydana getirdikleri gerilmelerle ya aynı yönde, ya da ters yönde etki yaparlar.

Bir bakiye basınç gerilmesi bir uygulanmış çekme gerilmesine karşıt geldiğinde durum yorulma mukavemetinin lehine olup bu nedenle tane püskürtme, soğuk haddeleme veya çekiçleme gibi

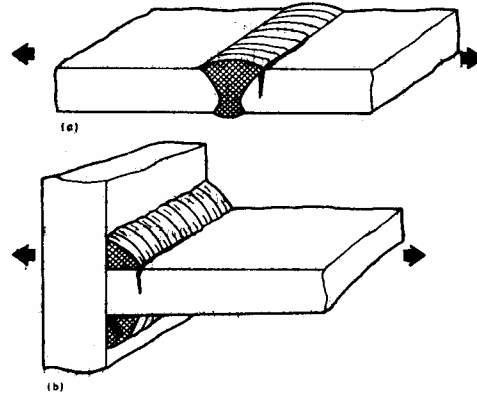
yüzeyde basınç gerilmeleri meydana getiren işlemler yorulma bakımından yüzeyde çok etkili olurlar (şek. 215) (bu konuya ilerde değineceğiz). Öbür yandan, uygulanan çekme gerilmeleriyle aynı yönde etki yapan bakiye çekme gerilmelerinin mutlaka bir zararlı durum yarattıkları iddiası da aynı ölçüde doğru olmayabilir. Çok sayıda laboratuvar deneyi, bakiye çekme gerilmelerinin



ciddi yorulma mukavemeti azalmalarına yol açtığı anlamında zararlı olduğu iddiasını doğrulayamamıştır; oysa ki konu, deneysel açıdan hiçbir surette kapanmış değildir. Bununla birlikte, örneğin ısıl işlemle gerilim giderme işleminin, yorulma performansı dışında başka nedenlerle, gerekli bir işlem olabileceğini de akılda tutmak çok önemlidir.

#### *Kaynaklı birleşmelerin yorulma davranışı*

Kaynaklı konstrüksiyonlarda yukarda sözü edilmiş genel etmenler kaynak edilmemiş konstrüksiyonlarda olduğu gibi hareket ederler; ancak bunlardan bazıları özel önem kazanır. İrtibatlanmış parçaların görünümü ve kullanılmış kaynak birleşme şekli, yorulma davranışına egemen olma eğilimindedir. Kaide olarak, daha sonra herhangi bir işlem görmemiş kaynaklı birleşmeler, kullanılan malzemeden daha az bir yorulmaya mukavemet arz ederler ve kırılma vaki olduğunda bu, az çok istisnasız, bir çentik etkisinin doğal olarak meydana çıktığı noktadan olur. Böylece, tekrarlanan çekme gerilmesine maruz bir enine alın kaynağı, tercihen kaynağın kenarı boyunca kırılır (şek. 216 a), bir köşe kaynağı da ya aynı pozisyonda, ya da kaynağın kökünden kırılır (şek. 216 b).



Şek. 216 — Kaynaklı birleşmede çentik etkisi: (a) enine alın kaynağında yorulma kırılması, (b) köşe kaynaklarında kenar ve kök kırılması.

Kaynaklı konstrüksiyonların karakteristik yorulma davranışını izah edip bundan uygun

önlem yöntemleri çıkartabilmek için kaynağın etkileri şöyle sınıflandırılabilir:

- I) Geometrik çentik etkileri
- II) Metalürjik etkiler
- III) Rijidliğin etkileri

İlk iki etmen mevcut birleşmenin koşullarıyla, üçüncüsü de kaynaklı konstrüksiyonun tüm görünümüyle ilgilidir. Geometrik çentik etkileri kırılmada kendilerini çoğunlukla bir kaynağın kenar ya da kökünde yerel kesit değişme noktalarında (şek. 216) gösterirler. Kaynağın kenarında kesit değişmesi ne kadar fazla olursa yorulma mukavemetinin azalması da o denli fazla olur; bu nedenle köşe kaynaklı birleştirmeler normal olarak alın kaynaklarına göre daha düşük mukavemetli olarak irdelenir. Bir köşe ya da alın kaynağında yanma çentiklerinin hasıl olması, yerel çentik etkisini açıkça yükseltip mukavemet azalmasına götürür. Sair kusurlar da, kırılmanın başlayabileceği tehlikeli geometrik çentikler teşkil edebilir. Örneğin, bir alın kaynağının dibinde vaki olabilecek bir nüfuziyet eksikliği, yüklemenin kaynak çizgisine yani kusur düzlemine dikey yönde olması halinde ciddi etki yapar. Öbür yandan birleşmenin kesit geometrisinde herhangi bir iyileştirme yorulma mukavemetini artırır; bu keyfiyet alın kaynaklarında yüzeylerin tesviye edilip köşe kaynaklan yüzeylerindeki her türlü aşırı dışbükeyliğin yok edilmesinin olumlu etkisini izah eder.

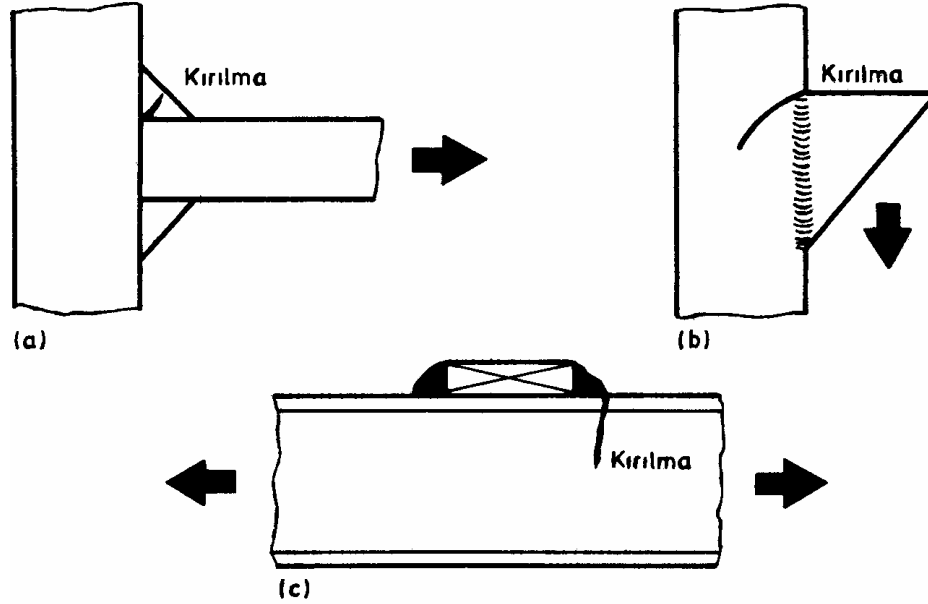
Kaynak banyosuna hemen komşu olan ana metal bölümü üzerine ısı etkisi, dokuda değişimler hasıl eder. Böylece, kaynağın kenarında mevcut olan yerel, geometrik çentik işbu "ısıdan etkilenmiş bölge" (IEB) içinde bulunur. Bu bölge doğruca sıvı halden katılaşmış olduğu kadar su almaya meyilli ve fazla ısınmış malzemedir oluşur. Bu itibarla geometrik çentik etkisiyle birlikte bir de "metalürjik çentik etkisi"nin varlığından söz edilir. Artan sertlik demirli malzemelerin IEB'lerinin mutlak karakteristiği olup aşırı sertliğin hasıl olması halinde kaynağın kenarında soğuk çatlama eğilimi meydana çıkar. Keza sıcak çatlak da aynı yerde bazı koşullarda görülür. Çatlamanın herhangi bir şekli, yorulma mukavemetine kesin zarar veren bir sınır durumunu temsil eder. Metalürjik çentik etkisinin konstrüksiyonun yorulma açısından herhangi bir ciddi zayıflamasına bağlı olmadığı görülürse de deneyler bunun etkisinin, geometrik çentik etkisi kaynak talaşlı işleme veya taşlamayla düzeltilerek bertaraf edildiğinde IEB çizgisi boyunca yorulma çatlamaının kalması için yeterli olduğunu göstermiştir.

Ve nihayet kaynaklı konstrüksiyonun rijitliği, cıvata ya da perçinli birleşmelerle kıyaslandığında, kaynaklı birleşmelerin gerilmeleri intikal ettirme verimi ve bu gerilmelerin birleşme alanlarında veya kaynaklı takviyeler bölgesinde mümkün olan yoğunlaşması nedeniyle bir ilâve kırılma riskini meydana getirir. Bu itibarla kaynaklı birleşmelerin yorulma mukavemetinin artırılması, bir tasarım (dizayn) olduğu kadar kaynak uygulaması sorunu olmaktadır.

## YORULMA KIRILMALARINA PRATİK ÖRNEKLER

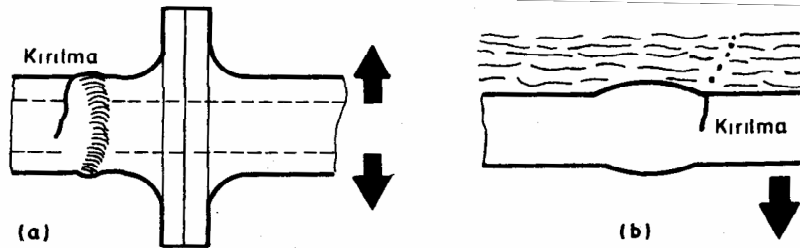
Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW/IIS) uluslararası ölçekte yürütmüş olduğu bir araştırma sonuçlarını aşağıdaki şekilde özetlemiştir.

a) Birinci grup kırılma nedenleri, parçaların fena tasarımı (dizayn) ya da ölçülendirilmesi olmaktadır. Böyle bir parçanın unsurları, ya da bunların birleştirildikleri kaynaklar, parçaların maruz buldukları sayklic gerilmelere dayanmak için yeterli boyutta olmayabilir şöyle ki bunlar üzerindeki çalışma yükü aşım olur (şek. 217 a). Keza bir konstrüksiyonun bir parçasının şekli fena tasarlanmış olabilir şöyle ki bunda çentik etkisi yaratılmıştır (şek. 217 b), ve yine (maalesef bu duruma çok sık rastlanır) takviye veya fittings çalışan parçaya uygun önlem alınmadan kaynak edilmiştir (şek. 217 c). Böyle bir durumda, bahis konusu kaynaklar herhangi bir gerilme intikal ettirmeseler bile, bu takviye ya da fittingslerin varlığı, konstrüksiyonun yorulma davranışını değiştirmeye yeterli olur.



Şek. 217 — Birinci grup yorulma kırılmalarına ait örnekler: (a) aşırı çalışma yüklemesi, (b) fena tasarım ve (c) tali takviye veya fittings.

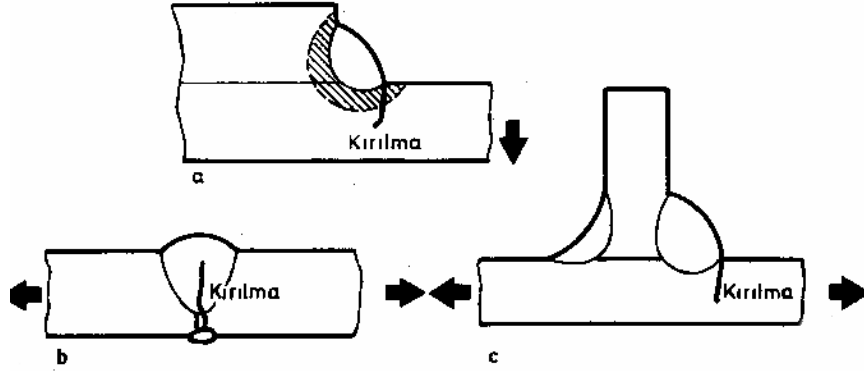
b) Kırılma nedenlerinin ikinci grubu, peşinen öngörülmuş çalışma koşullarından farklı koşullarla ilgilidir. Bu koşullar anormal gerilmeleri (bunlar sadece kısa süreli fazla yüklenme veya titreşim olsalar bile sonuç değişmez) (şek. 218 a), ya da gerilmelerin içinde vaki oldukları



Şek. 218 — İkinci grup yorulma kırılmalarına ait örnekler: (a) titreşim, ve (b) korozif çevre.

çevrenin korozif etkisini içerebilirler. Bunun sonucu, kendileri de çentik gibi hareket eden çatlakların gelişmesi olmaktadır.

c) Nihayet, bir üçüncü, grup kırılma, hatalı kaynaklara bağlıdır. Hata çelikten ileri gelebilir, bunun kaynak kabiliyeti az olur (şek. 219 a); bu durumlarda kaynak işleminin bizzat kendisinin metalürjik etkileri yine meydana çıkar. Fena kaynak aynı zamanda iç yarıklar veya ciddi bakiye gerilmelerle sonuçlanabilir. Bazı kırılmalar fena kaynak hazırlığından (şek. 219 b) ileri gelip bu hazırlık, konstrüksiyonun doğru birleştirilmesini ya da kaynağın tamirini imkânsız kılar; yine kırılmalar bir bitmiş konstrüksiyonda kaynağın fena şeklinden ileri gelmiş olabilir (şek. 219 c).



Şek. 219 — Üçüncü grup yorulma kırılmalarına ait örnekler:  
(a) zayıf kaynak kabiliyeti, (b) kusurlu hazırlık, ve (c) fena kaynak şekli.

Bu sınıflandırma hem kaynaklı parçaları içeren komple konstrüksiyonlar, hem de kaynakla tamir edilmiş ya da yüzeyi doldurulmuş parçalarla, yani birleştirme dışında bir amaçla metalin eklendiği parçalarla ilgilidir. Bu sonuncu hal sık vaki olur şöyle ki sert yüzey dolgusunun parçanın daha sonraki davranışı üzerindeki etkisi çoğu kez yeterince değerlendirilmez ve yapılan iş de, yukarda işaretlenen cihetlerden birine uygun olarak çoğu kez olumsuz sonuç verir.

Sonuç olarak, yorulma kırılması durumlarının sınıflandırılması, alevle kesme, metal püskürtme, yüzeysel su verme vb. kaynağa bağlı yöntemlerde kusurlu uygulama sonuçlarıyla ilgili konu başlıklarını içerir.

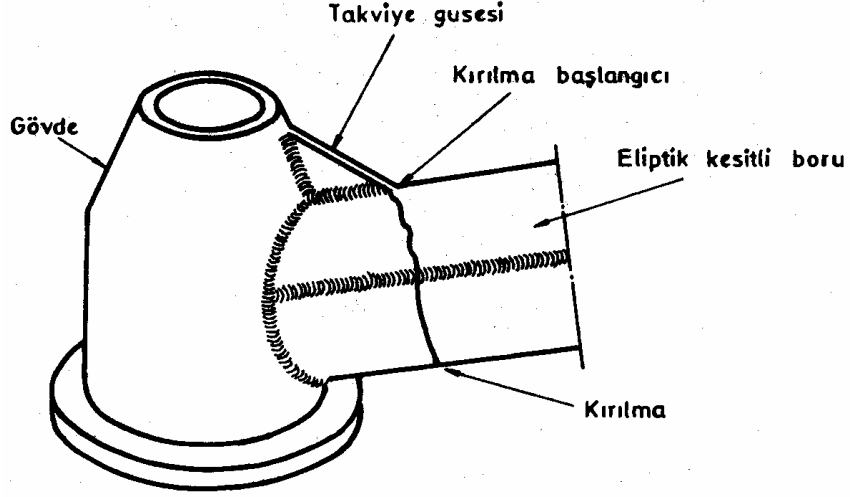
#### *Kırılma örnekleri*

Bu tipik örneklerden biri şek. 220'deki helikopter alt gövde bacağına görülür. Bacağın gövdesiyle borunun irtibatı bir bayrakla pekiştirilmiştir. Boru, eliptik kesitli olup iki yarım borunun kaynak edilmesi suretiyle meydana getirilmiştir. Konstrüksiyon Cr - Mo çeliğinden olup görünüşe göre alışlagelmiş yolla kaynak edilip işlem görmüştür. Ama 2118 inişten sonra, elektron mikrofraktografinin bir yorulma tipinde olduğunu açıkça gösterdiği bir çatlak, şekildeki yerde vaki olmuştur. Bu kırılma kaynaklı birleşmenin rijitliğinden ileri gelmiş olup birleşme, her inişte maruz kaldığı intizamsız ama çok yüksek gerilmelere karşı koyamamıştır. Bu tür bir çentik etkisi, "çentik" in kendisi bizzat gerilme intikal ettirmeyen ilâve parçaların kaynak edilmesinden hasil olmuş olsa bile çalışan parçada yorulma çatlaklarına götürebilir.

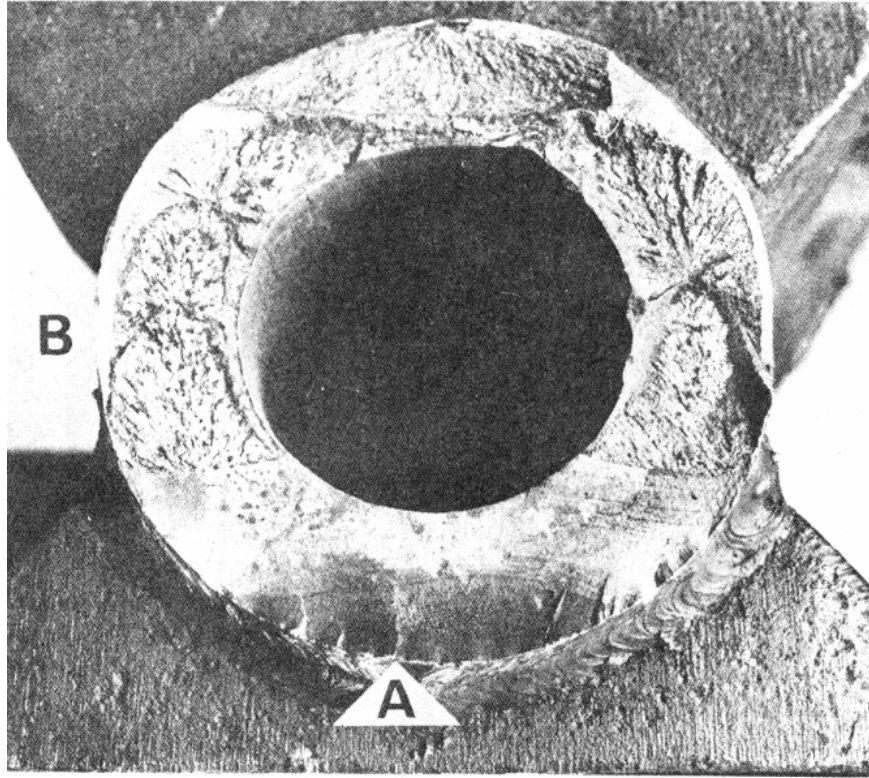
Bu aynı durum, şek. 221'deki treyler aksında da vaki olmuştur. Özellikle (a) bölgesi çok ilgi çekicidir şöyle ki tedricen gelişen çatlamanın nasıl bir yan gevrek kırılmayla bittiğini gösterir. Karbonlu çelikten (C = % 0,28) olan aks 2 m uzunlukta, 98 mm dış, 54 mm iç çapta olup sadece



saykik eğilme gerilmelerine maruz bulunuyordu. Resimde görülebilen iki çarık aksa kaynakla birleştirilmiş, yorulma kırılması alt çarığı bağlayan kaynağın seviyesinde başlayıp kesitin yaklaşık üçte birine yayılmıştır; tedrici bir kırılmanın karakteristik işareti olan çizgi-"yol"lar



Şek. 220 — Helikopter alt gövde bacağı.

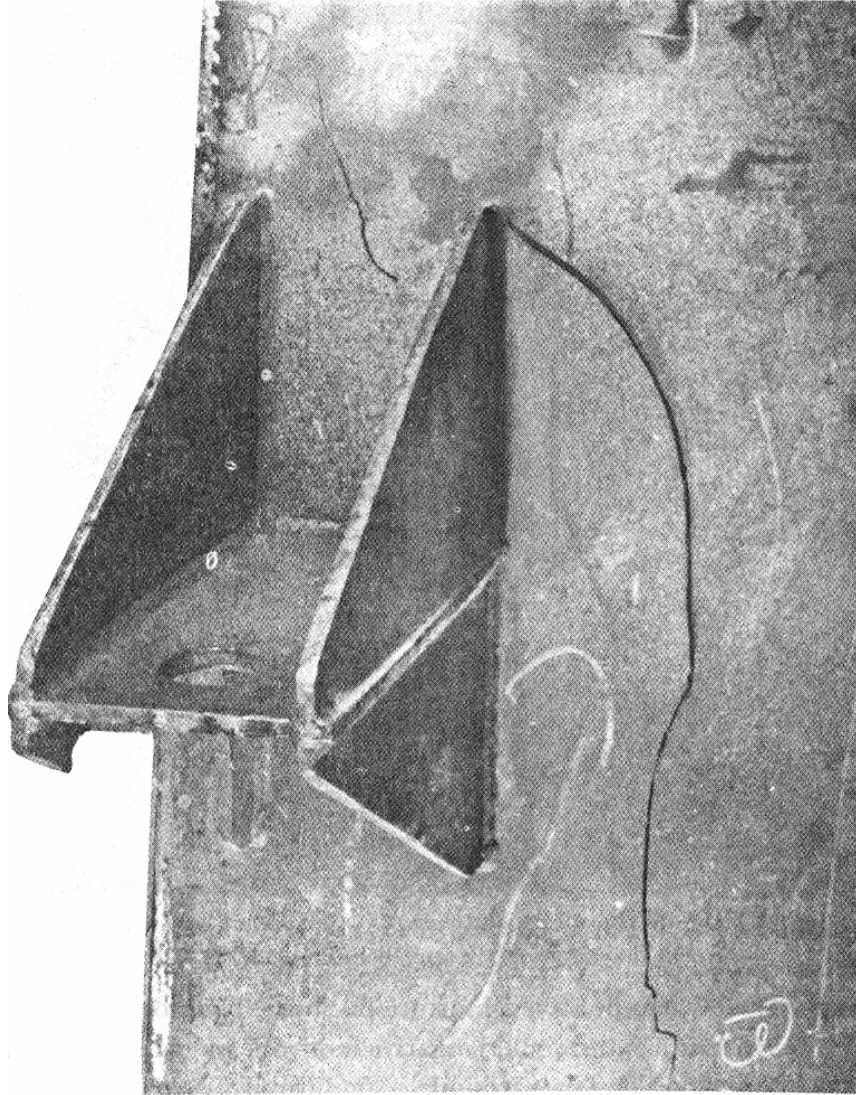


Şek. 221 — Aksın yorulma kırılması (A)'da yorulma başlangıcı, (B)'de yarı gevrek ilerleme bölgesini gösterir.

açıkça görülebiliyor. Böylece de kırılma "yarı gevrek" ve birçok belirgin odak noktalarını haiz hale geliyor. Dört aylık görünürde normal olan bir çalışmadan sonra meydana gelmiş bu kırılma, açıkça kaynaklı çarıkların varlığından ileri gelmiştir zira alt yüzeye kaynaklı bu tür ek parçası

olmayan akslardan hiçbiri benzer çalışma koşulları altında kırılmamıştır.

Gayri tabii gerilmeler altında yorulma kırılmasına iyi bir örnek de şek. 222'deki paslanmaz Cr - Ni çelikten CO rejeneratörüdür. Tesis 7 m yükseklikte, 1 m çap ve 10 mm kalınlıkta saçtandır; çalışma sıcaklığı yaklaşık 600 - 700°C'dır. Üst bölümünün konik külahında, gövdeye kaynaklı dört yükseltme ayağı bağlantı konsolu vardır. Çalışma devresinde, gazların tesise girme koşullarının sonucu bir titreşimler sistemi oluşmuş ve bunlar büyük ses çıkarır olmuşlardır. Bu koşullar altında sadece tesisi pozisyonda tutmakla görevli ayaklar, rejeneratörün dış kabuğuna göre sabit noktalar gibi hareket etmişler, kabuğun kendisi ise yüksek frekanslı ve hayli büyük amplitütlü titreşimlere maruz kalmıştır. Böylece de kırılma konsollar düzeyinde vaki olmuştur. Bu arıza, öbür benzer donanımda değişikliğe götürmüştür; titreşimleri asgariye indirmek için gazın hızı azaltılmış, özenle tasarlanmış kuşaklar da titreşimleri söndürmüştür.



Şek. 222 — Paslanmaz çelik CO rejeneratörünün yükseltme ayağı destek konsolunun birleşme bölgesinde kırılma.

## YORULMA DENEYLERİ

### *Genel*

Sayklic gerilmeye tabi bir parçanın ömrünün birçok etmene bağlı olması itibariyle ve bu etmenlerin etkisi de kuramsal varsayımlarla peşinen görülemediğine göre parçanın muhtemel davranışının sayısal bilgisi büyük ölçüde deneysel verilerin elde bulunmasına bağlı olacaktır. Bu itibarla yorulma deneyi, mühendislik araştırma ve geliştirmesinin çok önemli bir dalını oluşturup çok sayıda tekniğin kullanılmasını gerektirir.

Metallerin yorulma davranışının etüdü ilk olarak, belli bir eğme momentine tabi bir döner çubuk numunenin kullanılmasıyla bir sistematik temele oluşturulmuştur. Evrensel olarak onu ilk saptayan Wöhler'in adına bağlanan bu deney, beklenen ömrün uygulanan gerilmelerin büyüklüğüyle değiştigi gerçeğini ortaya çıkarmak üzere S - N ya da Wöhler eğrisi tarafından karakterize edilen gerilme - amplitüt/ömür ilişkisinin saptanma yolunu açmıştır. Bu temel ilişki, Wöhler deneyinde geliştirilmiş olan almaşık (alterne) eğme yükünden başka yükleme koşulları için de gösterilebilir; örneğin numuneler aksenal yüklemenin, burulma yüklemesinin ya da bileşik eğme ve burulma yüklemesinin sayklic şekillerine tabi kılınabilirler. Bu koşullardan herhangi biri, duruma göre, malzemenin yorulma niteliklerini değerlendirmek üzere deneysel olarak kullanılabilir.

Seçilen malzemedен çıkarılmış tam, çentiksiz numunelerle örneğin ısıl işlemin, yüzey işleminin ya da çevre - ortamın (korozyon, yüksek sıcaklık vb.) etkisiyle ilgili geniş bir yorulma verileri alanını saptamak mümkün olmaktadır. Bu yolla malzemenin temel yorulma nitelikleri gözlenebilir. Aynı şekilde basit çentik şekilleri "çentik duyarlılığı"nı ölçmek için deneye dahil edilebilir ve çoğu kez bir çentiğin gerilme yoğunlaştırması etkisiyle yukarda zikredilmiş çevresel ya da maddi koşul değişkenlerini birleştirmek gerekli olmaktadır.

Yorulmanın genel karakteristiğini saptamak amacıyla, yorulmayla kırılma hasıl etmek için gerekli gerilme amplitüdü ile gerilme sayklic sayısı arasındaki ilişkinin S - N, yani Wöhler eğrisiyle temsil edilebileceği daha önce kaydedilmişti. Sabit amplitüdü yüklem altında yürütölen araştırmaların çoğunluğu için S -N eğrisi, elde edilen sonuçları tanımlamada, özellikle çevre, çentik şekilleri, kaynaklı ayrıntılar vb. değişkenlerin genel etkisini değerlendirmek amacıyla kıyaslamalar yapıldığında, genellikle kullanılmaktadır. Her bir araştırmanın kesin hedefi, bununla birlikte, eğrinin çizilme şeklini saptayacak olup bazı durumlarda belli bir dayanma alanı içinde kalan sonuçların meydana getirilmesine özel dikkat sarf edilmesi gerekebilir. Böylece, azami 100.000 yükleme sayklicına kadar sonuçlar, basınçlı kaplar gibi göreceli olarak seyrek yük değişmelerine maruz sınai tesisler için en önemlileri olabilir; oysa ki  $10^6$  sayklic civarında sonuçlar daha çok yüksek yoğunlukta yük taşıyan kreyn, vinç ve köprülere uygulanır; döner makinalarda biriken gerilme sayklicları işbu alanı  $10^6$  sayklicın çok ötesine uzatabilir.

Deneysel yorulma sonuçları her zaman bir dağılma derecesi arz edecektir ve normal olarak bir ortalama değeri temsil eden S - N eğrisinin bu değeri tasarım amaçları için hayli yetersiz

kalabilir. Belli gerilme düzeylerinde kaydedilen en düşük dayanma değerleri hesaba alınarak bir "alt sınır" gerilme/saykl ilişkisini göstermek ve sonunda sonuçların bir statistik tahlilini yapmaya imkân verecek yolla tasarlanmak üzere deney programının gereksineceği kritik tasarım uygulamaları için çizilebilir.

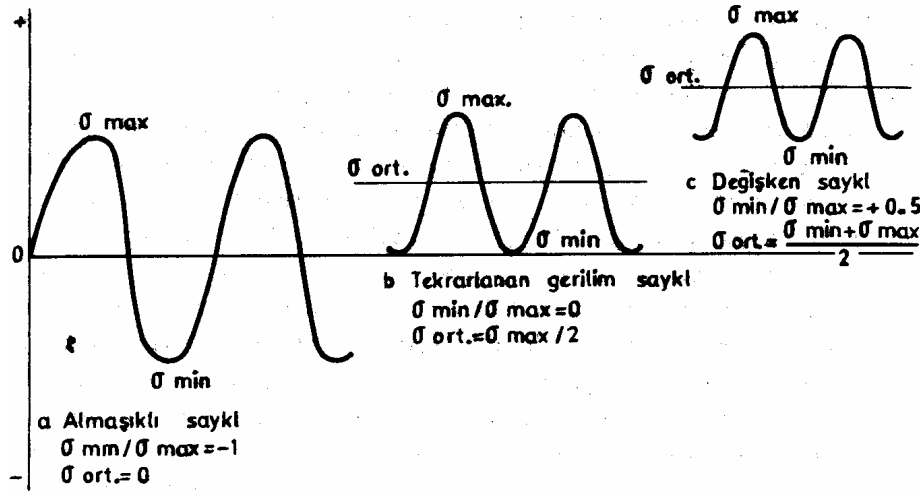
Bu itibarla yorulma deneylerinin sonuçları, araştırmannın tabiatına bağılı olarak, değişik yollarla temsil edilebilir. Bununla birlikte araştırmannın amacının genel tasarım hedefleri için veri saptamak olması halinde, bir başka değişkenin, yani ortalama gerilmenin ithal edilmesi gerekebilir. Böylece, bir ortalama sıfır değerli almaşık gerilmenin bazı tasarım sorunlarına uygulanabilir olmasına karşın başkaları, bir ölü artı hareketli yük sistemiyle karşılaşıldığı hallerde olduğu gibi ya bir pozitif veya negatif ortalama gerilme ortaya çıkmıştır. S - N gösteriliş şekline dönülerek belli bir numune tipi üzerinde deneylerden bir eğriler ailesi böylece (üretilebilir ki her eğri farklı bir minimum gerilmenin ( $\sigma_{min.}$ ) maksimum ( $\sigma_{max.}$ ) gerilmeye oranını ifade eder. Çoğu kez etüd için seçilen üç oran şunlardır:

Almaşık (alterne) gerilme  $\sigma_{min.} / \sigma_{max.} = -1$  ortalama gerilme = 0

Tekrarlanan çekme gerilmesi  $\sigma_{min.} / \sigma_{max.} = 0$  ortalama gerilme =  $\sigma_{max.} / 2$

Dalgalanan çekme gerilmesi  $\sigma_{min.} / \sigma_{max.} = +0,5$  ortalama gerilme =  $(\sigma_{max.} + \sigma_{min.}) / 2$

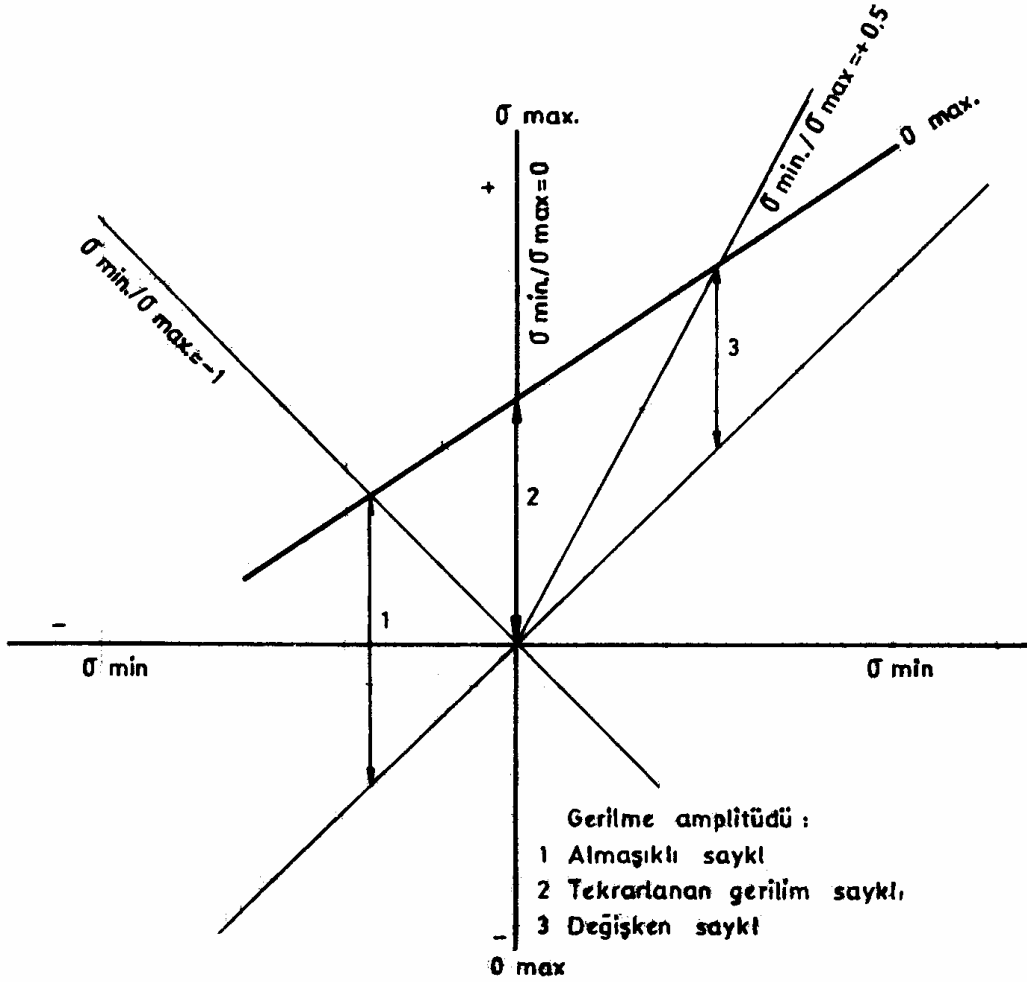
Bu oranlar grafik olarak şek. 223'de, gerilme/zaman şeklinde görülür.



Şek. 223 — Çeşitli ortalama gerilme düzeyleriyle yorulma gerilimi saykları

Deney numunelerinin aynı olmaları ve bir sabit dayanırlık değerinin belirtilmiş olması koşuluyla her bir gerilme oranı altında saptanmış yorulma mukavemetleri birbirleriyle kıyaslanabilir. Bunu yapabilmek için minimum gerilmeyi maksimum gerilmeye bağlayan bir diyagram (Goodman ya da Gerber diyagramı) çizilir veya alternatif olarak, gerilme alanı ( $\sigma_{max} - \sigma_{min}$ ) / ortalama gerilme diyagramından faydalanılabilir. Bunlardan ilki şek. 224'de görülür. Bu diyagram nitel olarak genellikle elde edilen sonuç türünü ifade eder. Başka deyimle, ortalama gerilme arttığında,  $\sigma_{max}$  da artar ama gerilme alanı daralır. Uygulanan yükün esas itibariyle çekme yönünde olması halinde gerilme alanının diyagramın elastik gerilme koşullarını temsil eden alan üzerinde değişmesi fazla olmaz.

Uluslararası Kaynak Enstitüsü (IIW/IIS)'nün XIII No.lu Komisyon'u kaynak deneyi alanında bir etüd yapmış ve deney sonuçlarının temsili hususunda, yorulma mukavemetinin deneysel olarak saptanmasında yeknesaklık (tekdüzelik) sağlamak üzere bir özel süreç önermiştir. Komisyonun ilgileri,  $2 \times 10^6$  sayklda mukavemetin bir uygun değer olacağı merkezinde olmuş olup işbu sürecin başka ihtiyaçlara uygulanabileceği bir gerçektir. Esas itibariyle sistem en az  $2 \times 10^6$  sayklda kırılmamış üç numuneyi gerektirmektedir. Bununla birlikte bu, çatlak yokluğunu da sağlamalıdır ve sayklik yüklemenin bitiminde, görünürde kırılmamış numune statik olarak denenecektir. Deneme aynı tip ve genel plastik şekil değiştirme meydana getirmeye yeterli büyüklükte yük altında olacaktır. Bu yolla her türlü küçük yüzey çatlağı hemen meydana çıkar ve, eğer görülürse, numune başarısız olarak kabul edilir. Bunun üzerine önceki değerden daha düşük gerilmelerde tekrarlanan deneylere girişilir, bunlarda da amaç  $2 \times 10^6$  sayklda çatlak arz etmemiş üç sağlam numune elde etmektir. Şek. 225, deney sürecini diyagram halinde gösterir.



Şek. 224 — Değiştirilmiş Goodman diyagramı.

### Deney makinaları

Mevcut olan yorulma deney makina tiplerinin çok değişik türde olması itibariyle bunların tümünü saymak mümkün değildir. Bunlar yükün menbaı (ölü yük, mekanik olarak harekete geçirilen yük...), sistemi (dönel eğme güçlü - cantilever, dönel eğme güçlü - dört noktada yüklemeli...), numune üzerindeki gerilme koşulu (numune üzerine dağıtılmış eğme momenti,

almaşık eğme gerilmeli...) gibi esaslara göre sınıflandırılır. Yorulma nitelikleri sonunda hesaba götürdüğünden bunlar esas itibariyle deneysel olarak saptanan nitelikler olup mühendis ve tasarımcının gereksinmelerine uygun taleplerinin çok çeşitli olması nedeniyle çok geniş bir makine çeşit serisi meydana getirilmiştir.

Kaynaklı birleşmelerin en basit tiplerinin yorulma deneyinin büyük bölümü, yassı levha numunenin eksenel yüklenmesi şeklinde yürütülmektedir. XIII No.lu Komisyon'un önerisi başlıca makina imalcileri tarafından kabul edilmiş olup bu öneri, yük göstergesi hatasının

makinanın maksimum yük alanının  $\pm \% 0,5$ , veya

uygulanmış bulunan yük alanının  $\pm \% 2$  'sini

aşmaması (bu iki koşuldun hangisi daha büyükse) esasını getiriyor.

#### *Kaynaklı numune ve birleşmelerin deneyleri*

Genel olarak kaynağın etkisini saptamak üzere yürütülen yorulma araştırmaları üç şekilden birini alır:

I) temel

II) teknolojik, veya

III) özel amaçlı

Metallerin yorulmasının temel araştırmaları çok geniş ve çapraşık bir faaliyet alanını temsil etmekle genel değeri haiz olup kaynak bölgesinde mikrostrüktürlerin değişmesi, kaynak metalinin belirgin nitelikleri ve hidrojenin olası etkisi gibi etmenleri hesaba katmak üzere genişletilmeye muhtaçtır; aksi halde kaynaklı birleşmelerin yorulma davranışına bu etmenlerin ne tür dahil oldukları hususunda yerli bilgiler elde edilemez. Örneğin, bu tür bilgi, kaynaklı yüksek çekme mukavemetli çeliklerde daha üstün yorulma nitelikleri temin etme sorunu açısından belli bir önem taşır.

Geniş anlamda teknolojik etüdler, tipik birleşme şekilleriyle konstrüksiyon elementlerinin yorulma davranışının değerlendirilmesiyle ilgili olanlardır. Bu etütlerden elde edilen veriler genellikle tasarımda rehber olma amacını güdüp bunun için bu etütlere birçok değişkenin ithali gerekir. Bir imal yöntemi olarak kaynağın değişik şekillere yatkınlığı tasarımda hem genel kavram, hem de ayrıntılarda hayli değişmelere olanak sağlar; bunun sonucu olarak da temsili yorulma deneyi aslında sınırı olmayan bir faaliyet olur. Hatta ark kaynaklı konstrüksiyonlarla bile sınırlı olsa, bir deney programında gerekli değişkenler, yani ana metal bileşiği, koşulu, şekli, kalınlığı vb; kaynak yöntem tipi, elektrod vb.; kaynaklı birleşmenin tasarımı; yorulma yüklemesinin şekli, gerilme oranı vb.; birleşme üzerinde kaynak sonrası işlemi, çevresel etmenler vb., hayli göz korkutucu olur. Bu değişkenleri anlamlı olarak kapsayan bir şey mevcut değildir; bunun nedeni kısmen, uygun deney olanaklarına sahip olmanın sınırlılığı olup bu yüzden koordine araştırmanın, WII/IIS gibi merkezler aracılığı ile yürütülmesi büyük ekonomik değer taşır.

Kaynaklı parça ve konstrüksiyonların özel amaçlı yorulma deneyi çoğu kez tasarım geliştirmesi için, özellikle bilinen ya da tahmin edilen çalışma yükleri altında bir parça içinde

teessüs eden gerilme dağılımlarının hesabının güç olduğu hallerde, gerekli olmaktadır. Konstrüksiyonun çapraşık olması halinde, çalışma yüklemesini taklit etmek üzere özel tertiplere başvurulur ki bunlar arasında bir deney çerçevesi ve hidrolik kriko yükleme sistemi sayılabilir. Hassas taklit için, belli bir yük değişmesi modeli ya da tamamen gelişigüzel yüklemeyi hesaba almak üzere yükleme "programlanmış" da olabilir. Bu tür özel amaçlı deneyin önemli hususlarından biri de bir prototip konstrüksiyonda birden fazla muhtemel kırılma başlangıç noktasının bulunduğuudur.

### KAYNAKLI NUMUNELERİN TİP VE ŞEKİLLERİ

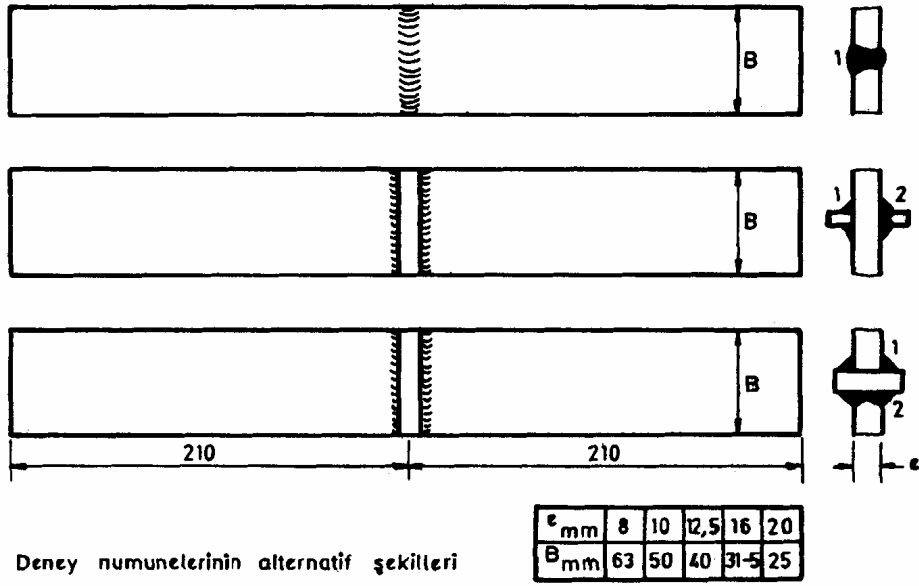
Makina yüklemesinin hassasiyet ve kontroluna ne kadar özen gösterilirse gösterilsin, numunelerin tasarım ve imaline aynı dikkat gösterilmediği sürece elde edilen deney sonuçları değerlerinden hayli kaybedeceklerdir. Doğal olarak her yorulma deneyinde önemli olan birçok mülâhazanın dikkat nazara alınması gerekir. Böylece, örneğin, eksenel yükleme deneyinde, numune tasarımında, çekme çeneleri bölgesine göre deney kesitinde bir alan küçülmesi gerekebilir şöyle ki aksi halde, yerel olarak yoğunlaşmış gerilme koşullarının yer aldığı çeneler bölgesinde istenmeyen çatlama - kırılma, kaçınılmaz olarak vaki olur. Keza deney kesiti, yani muayene edilmekte olan kaynaklı birleşme, sınırlanma nedeniyle bu bölgedeki gerilme koşullarının etkilenmemesi için çenelerden yeterince uzakta olacaktır. Yüklemin eksenelliğinin de denetlenmesi gerekip bu gereklilik büyük ölçüde kaynaklı numunenin imal hassasiyetine bağlıdır.

Özellikle kaynaklı numune hususunda, bunu aşağıya doğru kademelendirip yine de kaynağın tipik etkisini yeniden hasıl etmenin gücülüğü idrâk edilecektir. Bu nedenle bazı kaynak yöntemlerinin etüdü için ana metalin asgari kalınlıklarına başvurulabilir; aynı şekilde etüdün bir bölümünü oluşturması halinde bakiye (geriye kalan) gerilme, numune şekil ve boyutuna özel dikkat sarf edilmedikçe, kolaylıkla yeniden hasıl edilemez. Kaynak metali kusurlarının etkisi üzerinde son araştırmalar küt alın kaynaklı birleşmelerin kalınlığının önemli bir husus olduğunu göstermiştir.

Eksenel yük deneyleri için bazı yassı levha numuneleri IIW/IIS'in XIII No.lu Komisyon'u tarafından standartlaştırılmış olup şek. 226'da gösterilmiştir. Böylece müşterek araştırma kolaylaşmaktadır. Bunların, çene yerleri genişlemesi olmayan paralel kenarlı numuneler oldukları kaydedilecektir.

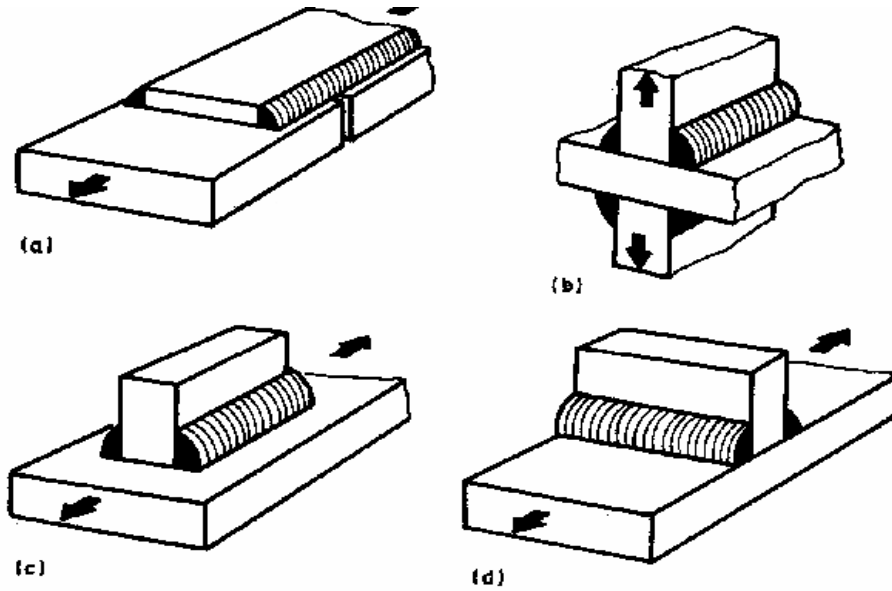
Bir kaynaklı birleşmelerin varlığında böyle bir numunenin yorulma mukavemeti normal olarak kaynaksız levha mukavemetinin % 80'inden aşağı ve çoğu kez de bundan hayli az olacaktır şöyle ki, çekme çenelerinde bir kırılma olasılığına karşı uygun bir pay bulunmaktadır. Kaynaksız levha ya da talaş kaldırarak işlenmiş yüzeyli bir yüksek kalite alın kaynağı ile yorulma mukavemeti, genişletilmiş uç kullanımının önerilir olmasını sonuçlandıracak şekilde olacaktır. Bir S - N saptanması amacı için birçok numune deneneceğinden, numune demeti içinde uygun bir uniformluk derecesinin sağlanması gerekir ve bu, alın kaynakları için levha hizalanması ve bütün numunelerin düzgünlük ve doğruluğu gibi ayrıntılara özeni beraberinde

getirir; kaynak sürecinin kesin tekrarı, kaynak kalite ve kaynak dikiş profilinin uniformluğunun tutulmasında yardımcı olacaktır.



Şek. 226 — IIW/IIS'in XIII No.lu Komisyonu'nun kaynaklı deney numune standard şekilleri.

Birçok temel kaynaklı birleştirme tipi yassı levhadan imal edilebilir ve alın birleştirmelerine ek olarak bunların arasına çeşitli köşe kaynaklı birleşmeler ithal edilebilir. Şek. 227'de görülen örneklerde "yük taşıyan" ile "yük taşımayan" arasında bir ayırım yapılmıştır.



Şek. 227 — Yük taşıyan ve taşımayan köşe kaynakları: (a) yük taşıyan uzunlamasına kaynak, (b) yük taşıyan enlemesine kaynak, (c) yük taşımayan uzunlamasına kaynak ve (d) yük taşımayan enlemesine kaynak.

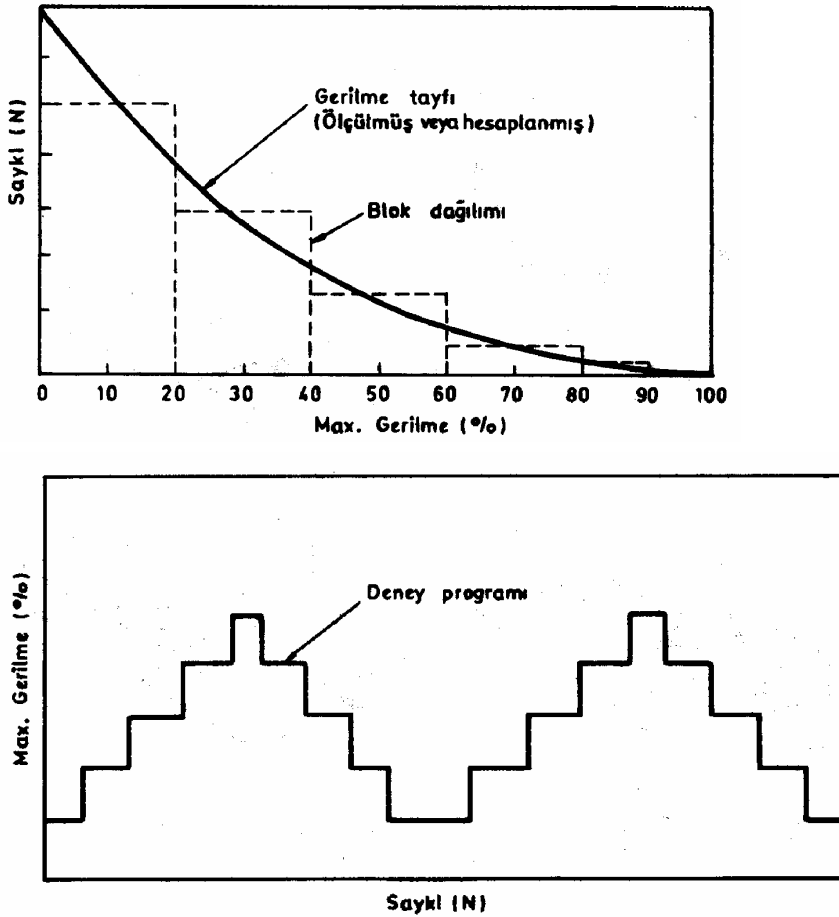
#### DENEY KOŞULLARI (PROGRAMLI YÜKLEME)

Konstrüksiyonlar değişen büyüklükte yük tekrarına maruz kaldıklarında kaynaklı birleşmelerin ömrü, tekabül eden gerilme değişimleri modeli altında, S -N verilerine dayanılarak saptanamaz. Doğal olarak bu sorun sadece kaynaklı yapıya özgü değildir. Uçak uçuşunun yer -



hava - yer saykiline, uçağın birçok yapısal komponenti, değişen büyüklük ve frekansta yük değişmelerine maruzdur. Çok büyük ölçüde âlet kullanımı sayesinde uçak çalışma yüklerinin anlamlı kayıtları tutulabilmiş ve bunlar tasarım değerlendirilmesinde kullanılmıştır; bu aynı ölçü yöntemi ve analiz, başka alanları da kapsamaları içine almışlardır.

Zamanla yük (ya da gerilme) değişmesinin uygun temsilî bir kaydı ile, bir konstrüksiyonun çalışma yüklemesini tiplendiren frekans dağılım eğrileri çizilebilir. Bu bilgi böylece kritik birleşme ya da komponentlerin ömür deneyi için, blok yükleme programlarının (şek. 228) uygulanmasıyla, kullanılabilir. Programlı yükleme kontrollü özel deney makinaları bu amaç için gerekli olup bunların kapasite ve kontrol sistemi, ilk dağılım eğrisine ne denli yaklaşılabildiğini saptar. Bununla birlikte genellikle bir blok programının bütün yük sınırlarının istenen tasarım ömrüne varmadan birçok kez tekrarlanmasına göre tasarlandığı kaydedilecektir; böylece fiilî yüklemenin gelişigüzel karakteri hesaba alındığında uygun "yük karışımı" elde edilmiş olacaktır.



Yükün ölçülmesi, analizi ve deneyi, kuşkusuz, en az bir prototip konstrüksiyonun varlığına bağlıdır. Frekans dağılım eğrilerinin sınıflandırılması gibi bir şey böylece, kaynaklı birleşmelerin programlı yükleme altında davranışı hakkında genel araştırmaya olanak sağlayacaktır. Bu nedenle yorulma ömrü hesabının kişisel görüşlere göre değişen yöntemleri geliştirilmiş olup bunlardan en çok kullanılanı Miner'in kümülatif (biriken) zarar kaidesidir. Bu yöntem, bahis konusu birleşmeler için S - N eğrilerinin bilinmesini ve birleşmelere uygulanacak

her düzeyde bir tahmin edilmiş gerilme düzeyleri cetveliyle sayıl sayılarını gerektiriyor. S - N eğrilerinin, içinde yüklemenin,  $\sigma_{\min.} / \sigma_{\max.}$  gerilme oranı dahil, tabiatının konstrüksiyon için tasavvur edilene benzeyen deneylerden saptanması esastır. Bu gereklerin ışığında, hesaplama yöntemleri diyagram halinde gösterilmektedir.

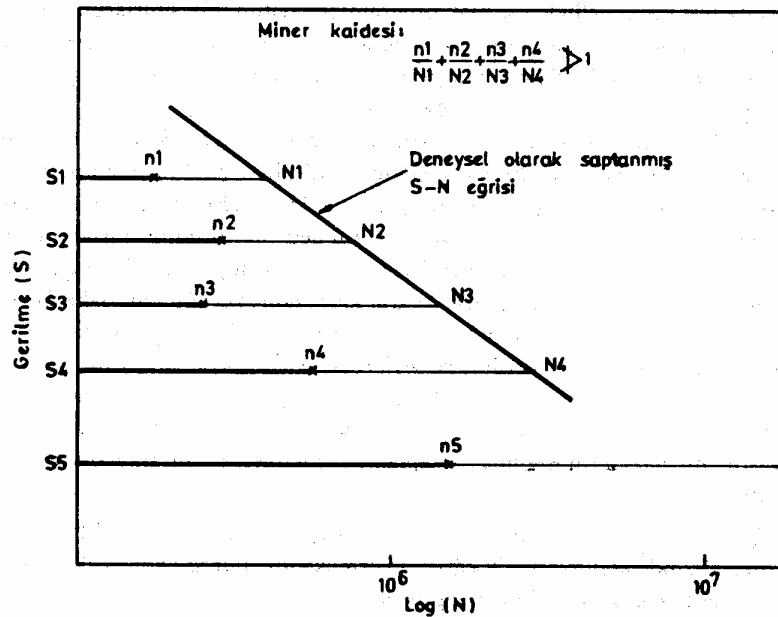
Şek. 229, toplam çalışma yük sayklarının sayısı,  $S_1$  —  $S_4$  değişik gerilme düzeylerinde seçilmiş S - N eğrisini vermektedir; burada konstrüksiyon, bu değişik gerilme düzeylerini planlanmış ömrü boyunca tutacaktır.  $S_1$  gerilim düzeyi ele alındığında  $N_1$ 'in, kırılma noktasını temsil etmesi itibariyle, uygulanabilecek azami saykl sayısı olduğu görülür.  $n_1$  saykl fiilen bu gerilmede uygulandığında,  $n_1/N_1$  kadar faydalı ömürden sarf edilmiş olduğu ileri sürülebilir. "Zarar"ın bütün gerilme düzeylerinde kümülatif olduğu kabul edildiğinde tüm ömür

beklentisinin,

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} > 1$$

olması halinde gerçekleşeceği sonucuna varılır. Toplama, gerilim düzeylerini ve dolayısıyla de N'in değerlerini değiştirerek istenilen tasarım gerilim düzeyleri elde edilene kadar ayar edilebilir.

Yükleme programı altında deneyler, kümülatif zarar kaidesinin koşulsuz kabul edilemeyeceğini göstermiştir. Ayrıca, dayanma değerlerinin deneysel alanı üzerinde bazı sınırlamaları haiz olan S - N eğrileriyle hesap, örneğin şek. 229'daki  $S_5$  gerilme düzeyinde olduğu gibi, saptanmış minimum mukavemetin altında gerilme düzeylerinin etkisini bilmezlikten gelmek zorundadır. Düşük gerilmelerin, yüksek gerilmelerle karışıklarında, tüm yorulma zararına iştirak edebilecekleri bilinir; Miner kaidesinin kaynaklı konstrüksiyonlar uygulandığı yerlerde S - N eğrileri, düşük gerilimlerin etkisini hesaba katabilmek için, grafik olarak  $10^8$  saykla ekstrapole edilmişlerdir.



Şek. 229 — Miner'in kümülatif zarar kaidesinin esası.

## SONUÇLARDAN ÖRNEKLER

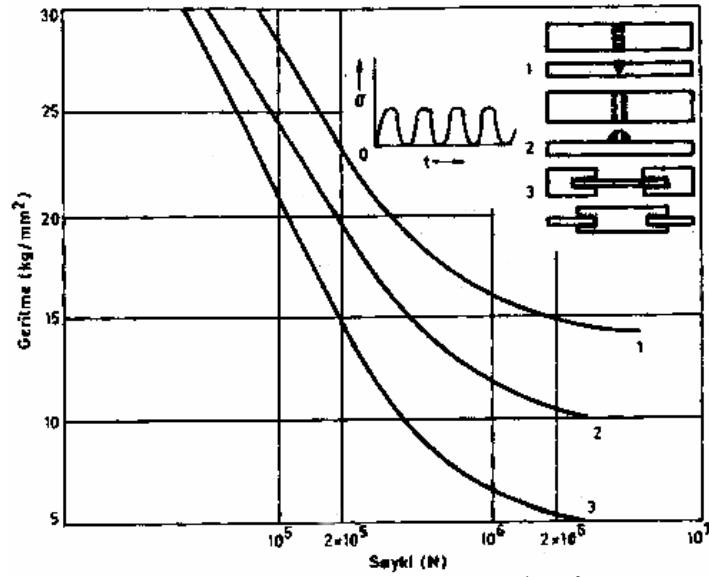
Kaynaklı birleşmelerin yorulma mukavemetini tiplere irca etmek amacıyla iki S - N diyagramı şek. 230 ve 231'de gösterilmiştir. Bunlar, yumuşak çelik ve alüminyum alaşımlarından (% 4 - 5 Mg), yukarda görülmüş olan numuneler üzerindeki deneylerden elde edilmiş fiili sonuçları veriyor; deneyler alt sınır,  $\sigma_{min.} = 0$  ya bir "tekrarlanan gerilme" saykılı,  $\sigma_{min.} / \sigma_{max.} = 0$  eksenel yük altında yürütülmüştür.

Aşağıdaki tabloda  $\sigma_{max.}$  'ın  $2 \times 10^6$  sayklda altı değeri, tekabül eden  $\sigma_{max.}$  'ın,  $2 \times 10^6$  sayklda iki başka  $\sigma_{min.} / \sigma_{max.}$  oranı, yani

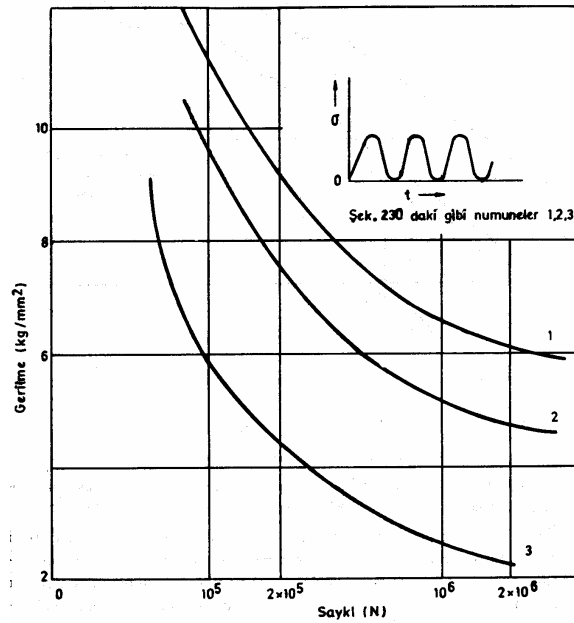
$$\sigma_{min.} / \sigma_{max.} = -1 \text{ (almasıık gerilme) ve}$$

$$\sigma_{min.} / \sigma_{max.} = +0,5 \text{ (}\sigma_{min.} = 1/2 \sigma_{max.}\text{)}$$

için elde edilmiş değerleriyle birlikte gösterilmiştir.



Şek. 230 — Kaynaklı yumuşak çelik için tipik deneysel sonuçlar.



Şek. 231 — Kaynaklı % 4 - 5 Mg - Al alaşımı için tipik deneysel sonuçlar.

Çelik ve alüminyum farklı gerilme oranları kıyaslandıklarında her üç birleşme şeklinin aynı

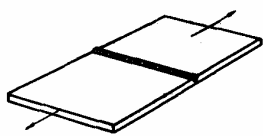
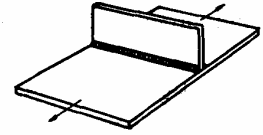
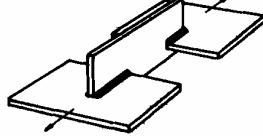
değeri haiz oldukları kaydedilecektir. Başka deyimle mukavemet normal olarak kaynak tipi ve birleşme görünümü tarafından saptanmaktadır. Keza  $\sigma_{max}$  'ın değerinin uygulanan saykl içinde artan ortalama gerilme ile birlikte arttığı da kaydedilecektir.

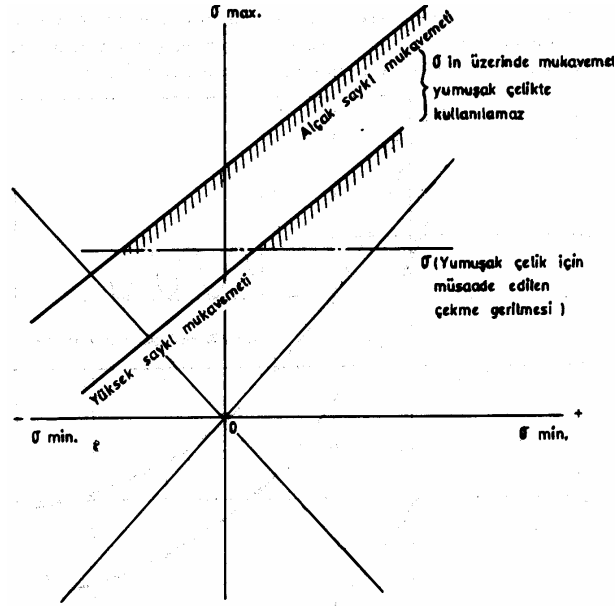
Her ne kadar  $\sigma_{max}$  'ın aşağıdaki tabloda verilmiş değerleri tipik ise de bunlar sabit ve salt değerler değildir. Yorulma mukavemeti birçok etmene ve bu arada bir kaynak tarafından meydana getirilmiş çentik etkisinin ağırlığına duyarlı bir nitelik olup işbu çentik etkisinin kendisi de kaynak süreci ve kaynakçının becerisine göre değişebilir.

$\sigma_{max}$  gerilmesi, nominal P/A gerilmesinin hesabından çıkan gerilme olup burada P, uygulanan azami yük, A'da birleşme levhaların kesit alanıdır. Böylece gerçekte  $\sigma_{max}$  'ın uygun değeri, birleşmenin istenen N ömrü için gerekli kesit alanını saptamalıdır. Bu konuda,  $\sigma_{max}$  'ın *deneysel* değerinin verildiği her yerde, birçok tasarım kod yada standardının öngördüğü müsaade edilebilen değerlerin genellikle daha düşük oldukları ve bunların dağılım ve sair mülâhazaları hesaba almak üzere hangi etmenin uygulandığına bağlı buldukları kaydedilecektir.

Nihayet, aşağıdaki tabloda verilmiş değerler yumuşak çelik ve % 4 - 5 Mg'lu alüminyuma ait ise de kaynaklı numunelerle daha yüksek çekme mukavemetli çelikler veya alüminyum alaşımları üzerinde yapılmış deneylerin mukavemet değerleri de saptanmış, bunların az çok aynı mertebelerde oldukları görülmüştür. Bu itibarla birçok uygulamada, daha yüksek çekme mukavemetli malzeme kullanmanın hiçbir, avantajı bulunmamaktadır. Sadece uygulanacak gerilme sayklının yüksek bir ortalama gerilmeyi haiz olması veya tutulacak olan saykl sayısının az olması hallerinde bazı avantajlar elde edilebilir. Bu keyfiyet şek. 232'de, bir Goodman diyagramı şeklinde, alçak saykl ve yüksek saykl dayanma sınırları için deneysel olarak saptanmış. iki yorulma mukavemeti çizgisi olarak görülür. Şimdi burada  $\sigma_I$ , yumuşak çelik ya da bir orta mukavemette alüminyum alaşımına uygulanabilen azami müsaade edilebilir çekme gerilmesi ise,  $\sigma_I$  'in üzerinde, yüksek ortalama gerilmede (yüksek saykl dayanımı için) veya alçak saykl dayanma bölgesinde (aslında burada, ekonomik nedenle,  $\sigma_I$  'in üzerinde zorlanabilen daha yüksek mukavemetli malzemeler kullanılmalıdır) bir alanın mevcut olduğu görülür.

Kaynaklı birleşmeler için tipik yorulma mukavemeti verileri

Birleşme şekli	Malzeme	$\sigma$ min. / $\sigma$ max.	$\sigma$ max. $N=2 \times 10^6$ kg/mm <sup>2</sup>
	Çelik	- 1	9
		0	15
		+ 0.5	23
	Alüminyum	- 1	4,7
		0	6
		+ 0.5	8
	Çelik	- 1	8
		0	11
		+ 0.5	20
	Alüminyum	- 1	3,8
		0	4,5
		+ 0.5	6,8
	Çelik	- 1	3
		0	5,5
		+ 0.5	8,5
	Alüminyum	- 1	1,8
		0	2,2
		+ 0.5	3,7



Şek. 232 — Müsaade edilebilen azami gerilmeye sınırlama.

## KAYNAK KUSURLARININ ETKİSİ

Az çok tüm kaynak türlerinde nihaî birleşmede kusurlar bulunabilir, ve bu, özellikle, yanlış kaynak süreçlerinin kullanılması halinde mutattır. Bu kusurlar birçok şekil alabilip birçok nedenle ortaya çıkabilirler. Bazen (ama her zaman değil) mukavemete, yorulma mukavemeti dahil, zararlı olurlar. Yorulma bağlamında, hasıl ettikleri gerilme yoğunlaşması etkisinin birleşme görünümünün bizzat kendisinde mevcut olandan daha ağır olması halinde zararlı olurlar.

Araştırmalarda özellikle elle yapılan ya da yarı otomatik ergitme kaynağında görülen kaynak kusurlarının yorulma mukavemeti üzerindeki etkisine ağırlık verilmiştir. Bunun nedeni bu yöntemlerin sınaî önemi olmakla birlikte az çok daha büyük bir kusur potansiyeli elle kaynakta mevcuttur.

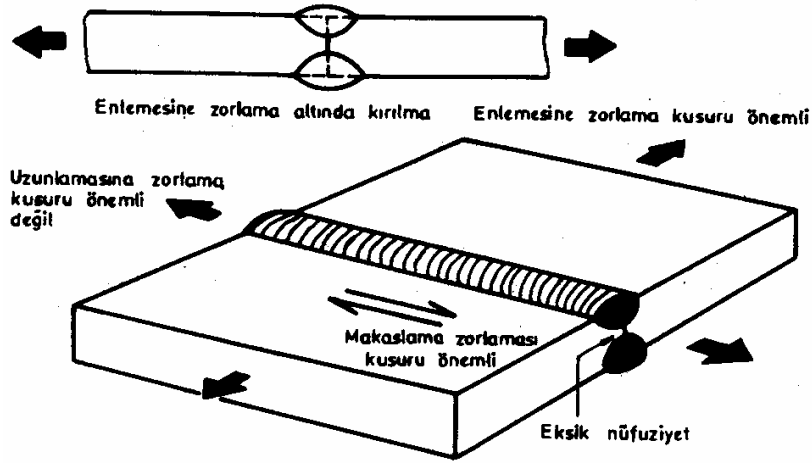
Yukarda kusurların gerilme yoğunlaştırması etkisi (ya da "çentik etkisi")n-den, söz edilmişti. Bu konuda kusurlar birbirinden çok değişik karakteristikler arz edebilirler. Böylece bir yandan ince, dağınık gözenekler tamamen zararsız olabilirken öbür yandan başlangıç çatlakları yorulma mukavemetini büyük ölçüde azaltabilirler. Bununla birlikte kaynak kusurlarının etkisinin basit bir tablosunu çıkarmak da mümkün değildir. Bunun birçok nedeni vardır.

Önce, S - N eğrilerini çizmek üzere gerekli deneyler yürüterek bir etkiyi ölçmek için birkaç numuneye gerek olup bunlar, kusurların ağırlık derecesi bakımından birbirlerinin aynı olacaklardır. Buna ek olarak, belli boyut ve tipte bir kusurun mukavemet üzerindeki etkisinin, içinde görüldüğü birleşmenin kalınlığına bağlı olduğu bilinir. Yine bazı kusur tiplerinin hasıl ettikleri etkiler de birleşmenin şekil ve zorlanma türüne bağlıdır. Bu sonuncu husus, şek. 233'deki alın kaynağında görülen eksik nüfuziyetin etkisiyle ifade edilebilir.

Enlemesine bir alın kaynağında mevcut olan bir nüfuziyet eksikliği, aksenal yükleme ya da ağır makaslama gerilmesi altında elde edilen yorulma mukavemetini belirgin derecede

azaltabilir. Bununla birlikte, şek. 233'te görülen şekliyle, eksik nüfuziyetli geniş alanların bile, yükün kaynaklı birleşmeyle paralel yönde uygulanması halinde, bir etkisi olmaz. Kusurun çevresinin önemine dair bir başka örnek olarak, kaynaktan çıkış koşulları altında denenmiş enlemesine birleşmelerde az miktarda cüruf ve gözeneğin önemli olmadığı yukarıda söylenmiş olup bunun nedeni kaynak takviyesinin kenarında gerilim yoğunlaşmasının üstten atlayan etkisi olmaktadır. Oysa ki bu aynı kusurların tamir görmüş bir şaftın kaynak dolgusunun işlenmiş yüzeyinde veya buna yakın yerde olmaları halinde bunlar ciddi şekilde etkili olabilirler. Şöyle ki en ciddi gerilme yoğunlaşması noktalarını oluştururlar.

Böylece, genellikle birleşme veya parçanın *kendi öz* yorulma mukavemeti ne kadar yüksek olursa bunların kaynak kusuruna o denli duyarlı oldukları saptanmıştır. Bu nedenle köşe kaynaklı birleşmelerin çeşitli şekilleri, daha düşük öz mukavemete sahip olmakla, *çatlaklar ve ergime yokluğu dışında* genellikle birçok kusurdan fazlaca etkilenmezler.



Şek. 233 — Alın kaynaklarında eksik nüfuziyetin etkisi.

## YORULMA MUKAVEMETİNİ ARTIRMA YÖNTEMLERİ

Aşağıda, birleşmelerin tasarımının, bir kaynaklı konstrüksiyonda elverişli yorulma mukavemetinin gerçekleştirilmesi istendiğinde fevkalâde önemli olduğu görülecektir. Gerçekten, bir ekonomik konstrüksiyon elde etmek için tasarım ayrıntılarıyla birleşme yerlerinin doğru seçilmesi suretiyle çok şey yapılabilir. Mamafih, daha elverişli birleşme şekline geçmenin zor ya da imkânsız olduğu birçok durum olup müsaade edilebilen çalışma gerilmeleri çoğu kez statik tasarımda genel olarak kullanılanların hayli altında değerlerde sınırlanır. Bu itibarla kaynaklı birleşmelerin yorulma mukavemetini artıracak yöntemlerin geliştirilmesi ilginç olmaktadır şöyle ki, yukarıda da ifade edildiği gibi, bu tür ıslâhat daha yüksek çekme mukavemetli malzemelerin kullanımına dönüşmekle elde edilmez.

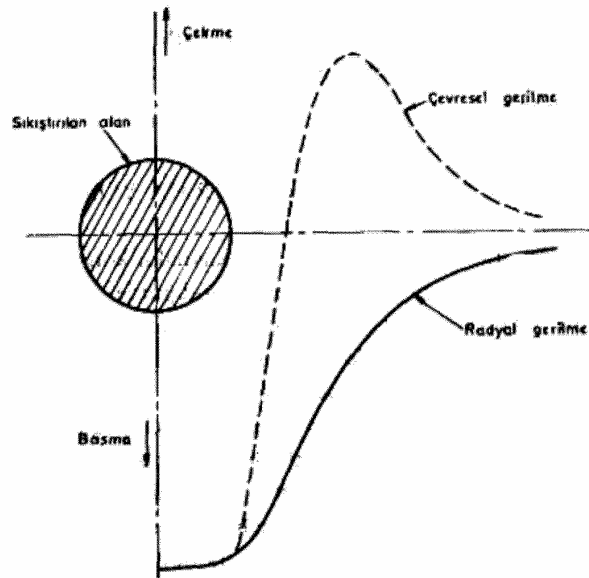
Doğal olarak, köşe kaynaklı konstrüksiyonların ıslâhına büyük ilgi gösterilmektedir; muhtemelen en ekonomik konstrüksiyon şekli olarak bunlar geniş ölçüde kullanılmakla birlikte ancak ılımlı yorulma mukavemeti arz ederler. Aynı zamanda alın kaynaklarının mukavemeti de basitçe kaynak kenarında (enlemesine birleşmelerde) veya kaynak yüzeyinde (uzunlamasına

birleşmelerde) gerilme yoğunlaşması yok edilerek veya azaltılarak ıslâh edilebilir. Bu gibi birleşmelerin örneğin talaş kaldırılarak işlenmesi ya da özenle taşlanması, mukavemet değerlerini kaynaklız levhaninkilere eşit duruma getirebilir; ancak burada bu sonucun kaynak metali kusurlarının bulunmaması halinde elde edilebileceği de önemle kaydedilecektir.

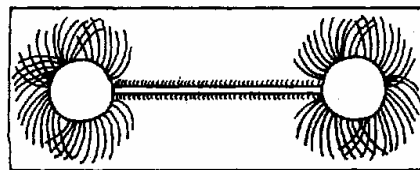
Bir başka işlem de alın kaynaklarına olduğu kadar köşe kaynaklarına uygulanan çekiçlemedir. Bu sonuncu kaynak tipi için iki başka ıslâh yöntemi geliştirilmiş olup bunlar yerel mekanik basma ile nokta ısıtma işlemleridir. Bunların genel prensipleri aşağıda verilmiştir.

#### *Yerel mekanik basma işlemi*

Kendilerinden itibaren yorulma çatlaklarının başlama ihtimali bulunan çentikler bölgesinde bir bakiye (arda kalmış) basma gerilmesinin meydana gelmesi halinde yorulma mukavemetinde önemli bir artışın vaki olduğu bilinir. Böyle bir gerilme durumu yerel olarak, malzemeyi plastik akış hasıl etmeye yetecek bir basınç altında iki kalıp arasında sıkıştırarak elde edilir. Elde edilen fiilî bakiye gerilme sistemi şek. 234'de görülür; yöntemin sadece basınç gerilmesinin radyal bileşkenine tabi kılınabilen yerelleştirilmiş çentiklerin işleminde etkin olabildiği açıktır. Bunun doğru bir uygulaması şek. 235'de gösterilmiş olup bunda uzunlamasına guse levhası bağlantısının uçları yerel mekanik basınç işlemine tabi tutulmuştur; basınç alanı çentikli bölgeyle aynı hiza ve gerilme uygulaması yönündedir. Guse levhasının gerilme yönüne dikey olması, böylece de levhanın bütün genişliği boyunca bir çentik etkisi arz etmesi halinde bu tür işlem etkin olmayacaktır.



Şek. 234 — Yerel mekanik basma işlemiyle elde edilen bakiye gerilme dağılımı

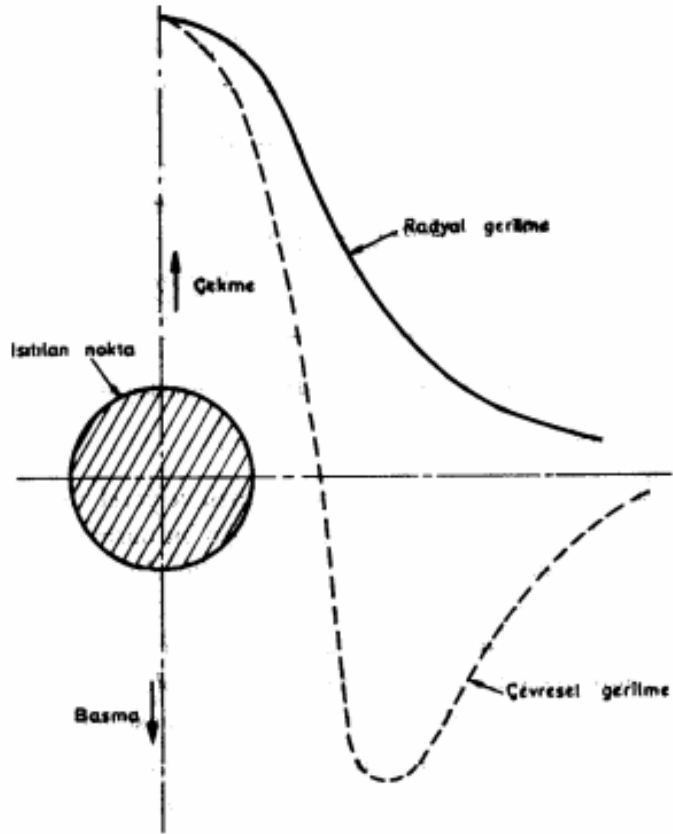


Şek. 235 — Yerel mekanik basma işleminden sonra uzunlamasına guse numunesi.

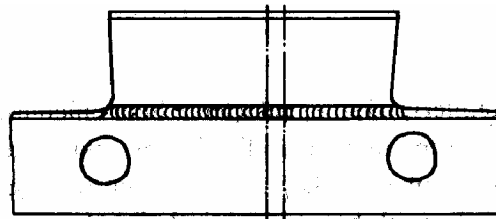
### Nokta ısıtma işlemi

Bir oksii-asetilen üfleci veya endüksiyonla hızlı ve yerel bir ısıtma aynı şekilde, soğumada, bir çentikli bölgeye yerleştirilebilen bir basma bileşkeni ile bakiye gerilme durumunun hasıl edilmesiyle sonuçlanabilir. Bu yöntemle çelik numuneler üzerinde yapılmış başarılı deneylerde yaklaşık 50 mm çapında, "mavi sıcaklığı" (280°C)'na tekabül eden ısı derecesinde ısıtma noktaları kullanılmıştır. Bakiye gerilme dağılımı şek. 236'da gösterilmiş olup yine ısıtılmış bölgenin yeri saptanmış çentiğe göre doğru bir konumda olması gerekir.

Uzunlamasına bir guse tipi numunesine uygulandığı haliyle, ısı noktaları, şek. 237'de gösterilen yerde olacak, şöyle ki guse levhasının uçları azami bakiye basma gerilmesiyle çevrili olacaktır. Bu yolla işleme tabi tutulmuş yumuşak çelikten benzer numuneler,  $2 \times 10^6$  sayklda, % 100'den fazla bir mukavemet artışı arz etmişlerdir.



Şek. 236 — Nokta ısıtma işlemiyle hasıl olan bakiye gerilme dağılımı.



Şek. 237 — Uzunlamasına alın kaynaklı guseye uygulanmış nokta ısıtma işlemi



### *Yüzey çekiçlemesi*

Yukardaki yöntemlerin aksine, çekiçleme hem enlemesine hem de uzunlamasına kaynak bölümlerine uygulanabilir. Birçok çekiçleme yöntemi mevcutsa da yüzey çekiçleme esas itibariyle kaynaklı birleşmelere uygulanmak üzere özel olarak tasarlanmış bir basınçlı hava çekicinin kullanılmasını öngörür. Yorulma mukavemetinin ıslâhı, kaynak kenarının düzeltilmesi ve daha önemli olarak, işleme tabi tutulan yüzeyde bakiye basma gerilmeleri yaratılmasından kaynaklanır.

### *Sınırlamalar*

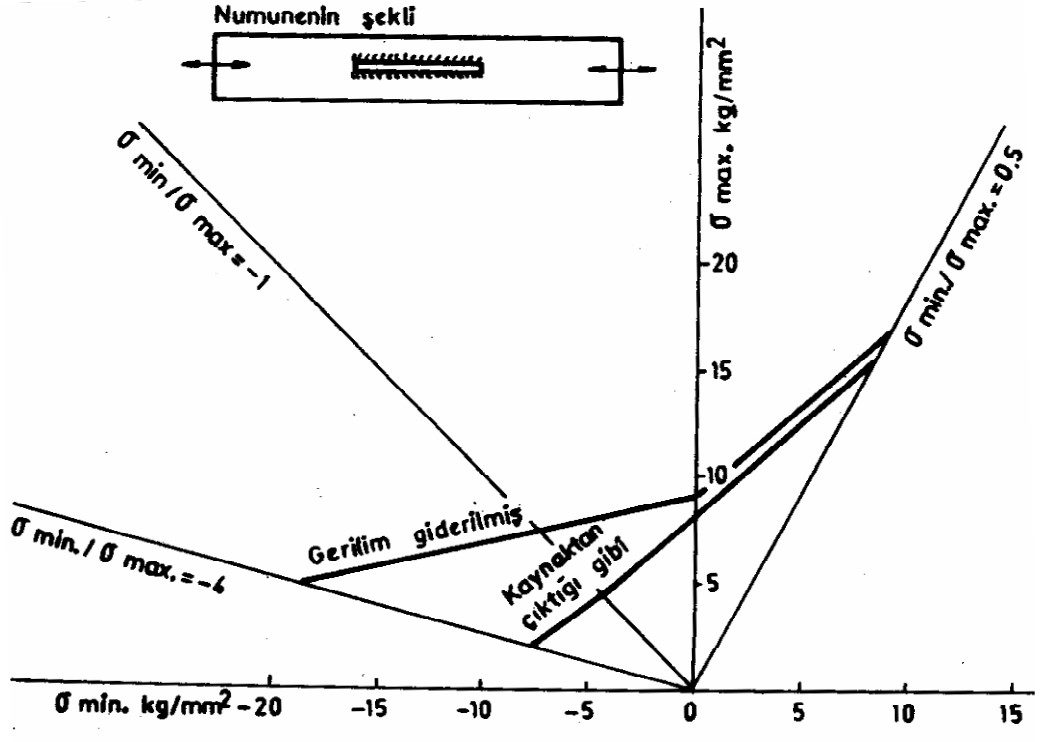
Yukarda sıralanan yöntemlerin tümü (talaş kaldırarak işleme ile taşlama dışında) tamamen ya da başlıca, hasıl edilen basma gerilmesinin elverişli etkisi kavramına bağlıdır. Bunların müşterek yanları uzun ömür süresinde yani milyonlarca sayklda maksimum mukavemet ıslâhı meydana getirmeleridir. Uygulanan gerilmelerin yüksek olması halinde bunlar hiçbir iyileştirme meydana getirmeyebilirler zira hasıl edilen gerilme sistemi plastik akış tarafından değiştirilmiştir. Bu itibarla, uygulanan gerilme tayfının arızî yüksek yüklemeler içermesi durumunda bu, her türlü başlangıç olumlu etkiyi nötralize eder. Ayrıca, yerel mekanik baskı ya da nokta ısıtması gibi işlemlerin, işleme tabi alanda artan gevrekleşme şeklinde zarar verip vermeyeceği de dikkate alınacaktır.

### ISIL GERİLİM GİDERMENİN ETKİSİ

Bakiye baskı gerilmesinin yararlı etkilerinden daha önce söz edildi. Kaynak daima bir bakiye gerilme durumu yaratır ama bu, maalesef, birleşme bölgesinde bir çekme bileşkeni şeklinde olur. Gerçekten bakiye çekme kaynak gerilmeleri, uygulanan yük saykllının basma ağırlıklı olması halinde, büyük ölçüde zarar verici olmazlar.

Bununla birlikte kaynaktan çıktığı gibi ve ısıl gerilim giderme (650°C) işlemine tabi tutulmuş çelik numuneler üzerinde yürütülmüş yorulma deneyleri, ortalama gerilmenin negatif olduğu hallerde gerilimi giderilmiş numunelerin mukavemetinin kaynaktan çıktığı gibi denenmiş olanlara göre daha büyük olduğunu göstermiştir (şek. 238). Bu, gerçekten, doğru basınç gerilmesi hasıl etmenin daha büyük yorulma mukavemeti (uygulanan gerilme alanı anlamında) verdiğinin bir ispatı olmaktadır şöyle ki, gerilimi giderilmiş numunelerde uygulanan gerilme uygulanan yükle denkleştirilebilir. Öbür yandan, bakiye gerilmeler içeren numunelerle birleşme yerine uygulanmış fiilî gerilme değişmesi orada ilk çekme gerilmesi yokluğundan etkilenmiş olup dolayısıyla uygulanan yükle denkleştirilemez.

Doğru basınç gerilmesi altında tutulmuş aslında daha büyük gerilme alanı, uygun yerde basınç gerilmesi hasıl eden işlem yöntemlerinin etkinliğinin esasını oluşturur; başka deyimle, bu yöntemler Goodman diyagramının basınç yüklemeli bölgesinde gerilimi giderilmiş numunelerin arz ettikleri geniş gerilme alanının çekme bölgesinde bir değişme hasıl ederler.



Şek. 238.