

67579

T. C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SAE 8620 (DIN 21Cr Mo2) ÇELİĞİNDE SIVI
SEMANTASYONLA ELDE EDİLEN YÜZEY SERTLİK
DERİNLİĞİNİN EĞMELİ YORULMA
MUKAVEMETİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Hüseyin ÖZKAYA

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : KONSTRÜKSİYON

Bu tez/....../19.... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oy birliği/Oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı

Yrd. Doç. Dr. Fehim Fındık

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Ahmet ÖZÜR

Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Cuma BİNDAL

ÖNSÖZ

Yüksek lisans ve doktora çalışmalarının en büyük amacı yapılan araştırmalar ve çalışmaları endüstriyel alanda hayata geçirebilmektir. Yapılan bu çalışma dişli çark, aks gibi makina elemanlarının yüzey sertlik derinliğinin etkisi araştırıldı.

Bu çalışmanın yapılmasında benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Fehim FINDIK 'a ve her türlü çalışmalarında bana yardımcı olan Yük. Mak. Müh. Kenan GENEL 'e teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca bana hertülü imkanları açan TZDK Fabrikasına, Ermak 'a ve Ada Metalurji 'ye teşekkür ederim

Hüseyin ÖZKAYA
Adapazarı 1996

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ	VI
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. ÇELİKTE YÜZEY İŞLEMLERİ	5
2. 1. Sementasyon Yüzey Sertleştirme	5
2. 1. 1. Katı Karbon Veren Ortamda Sementasyon İşlemi	6
2. 1. 2. Sıvı Sementasyon Maddeleriyle Sementasyon İşlemi	11
2. 1. 3. Gaz Ortamda Sementasyon İşlemi	16
2. 1. 3. 1. Katı Sementasyon Maddeleriyle Gaz Sementasyon (Granül Yöntemi)	18
2. 1. 3. 2. Sıvı Sementasyon Maddeleriyle Gaz Sementasyon (Damla-Gaz Yöntemi)	18
2. 1. 4. Sementasyondan Sonra Sertleştirme İşlemi	18
2. 1. 4. 1. Direkt Sertleştirme	19
2. 1. 4. 2. Basit Sertleştirme	20
2. 1. 4. 3. Basit Sertleştirme (ara tavından sonra)	20
2. 1. 4. 4. Basit Sertleştirme (İzotermik dönüşümden sonra)	21
2. 1. 5. Menevişleme	21
BÖLÜM 3. YORULMA	24
3. 1. Yorulma Zorlaması ve Kırılması	24
3. 1. 1. Genel Tanımlar	24
3. 1. 2. Yorulma Zorlamasının Özellikleri	25
3. 1. 3. Yorulma Kırılmasının Nedeni	26
3. 1. 4. Yorulma Zorlamalarında Kırılma Olayı	27
3. 1. 5. Yorulma Kırılmasına Neden Olan veya Kırılmayı Kolaylaştıran Etkenler	28
3. 1. 5. 1. Dış Etkenler	28

3. 1. 5. 2. İç Etkenler	29
3. 2. Kırıklarının Makroskopik Görünümleri Oluşum Şekilleri	31
3. 2. 1. Yorulma Kırıklarının Görünümü	31
3. 2. 2. Yorulma Kırılmasının Oluşum Şekilleri	
3. 3. Yorulma Dayanımının Saptanması ve Gösterimi	36
3. 3. 1. Genel Tanım	36
3. 3. 2. Yorulma Dayanımının Saptanması	36
3. 3. 3. Sementasyonla Yüzey Sertleştirilmenin Eğmeli Yorulmaya Etkisi	40
BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
4. 1. Numune Hazırlama	47
4. 2. Yorulma Deneyi	52
BÖLÜM 5. SONUÇLAR	60
BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	66

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. Çeşitli sıcaklıklardaki tuz banyolarında sementede edilen ve yağda ani soğutulan 14 mm çapındaki yumuşak çelik parçalarda sertleşme derinlikleri	14
Şekil 2. 2. Direkt sertleştirme	19
Şekil 2. 3. Basit sertleştirme	20
Şekil 2. 4. Ara tavlamaadan sonra basit sertleştirme	20
Şekil 2. 5. İzotermik dönüşümden sonra basit sertleştirme	21
Şekil 3.1. Çekme zorlamaları ile tek taraflı eğme zorlamalarının ortak etkimesi sonucu yorulma kırıklarının oluşum şekilleri.	33
Şekil 3. 2. Çift taraflı eğme zorlamaları altında yorulma kırıklarının oluşumu	34
Şekil 3. 3. Dönen parçaların eğilmesi (çevresel eğilme sonucu oluşan yorulma kırıkları	35
Şekil 3. 4. Wöhler eğrisi ve hasar çizgisi	38
Şekil 3. 5. 20 MoCr 5 çeliğinden sementasyonla sertleştirilmiş (çentiksiz) deney parçalarında eğme değişken yorulma dayanımının su verme sıcaklığı ve sementasyon tabakası kalınlığı (STK) ile değişimi.	40
Şekil 3. 6. Çentikli ve çentiksiz 6 mm çapındaki sementasyon yapılmış deney numunelerinin yorulma mukavemeti üzerine yüzey sertliğinin etkisi.	40
Şekil 3. 7. Sementasyonla yüzey sertleştirmede meydana gelen aksel artık gerilme profili	41
Şekil 3 .8. Sertleşen kabuk derinliğinin artmasıyla, artan gerilme dağılımının değişimi.	43
Şekil 3 9. Çekirdek karbon oranına göre.	44
Şekil 3. 10. Sementasyon çeliklerinde çekirdek özellikleri ile yorulma mukavemeti arasındaki ilişki	45
Şekil 3. 11. Sementasyonla sertleştirilmiş çeliklerin yorulma mukavemeti ile toplam gerilme arasındaki ilişkinin şematik gösterimi.	46
Şekil 4. 1. Deney numunelerinin yüzey pürüzlülüğü grafiği	48
Şekil 4. 2. Deney numunesi	49
Şekil 4. 3. Eğmeli yorulma deney cihazının şematik görünüşü	51
Şekil 4. 4. Isıl işlem görmeyen $\sigma_{eğ} = 326.241 \text{ N/mm}^2$, $N = 274.980$ devirde kopmuş numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafı	53

Şekil 4. 5.	Isıl işlem görmeyen $\sigma_{e\dot{g}} = 326.241 \text{ N/mm}^2$, $N= 274.980$ devirde kopmuş numunenin parlatılmış % 2'lik Nital ile dağlanmış X13,97 büyütülmüş foğrafi	54
Şekil 4.6.	0.5 mm sementasyon derinliğine sahip, $\sigma_{e\dot{g}} = 1287.013 \text{ N/mm}^2$ $N= 1225$ devirde kopan numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafi	55
Şekil 4.7.	0.5 mm sementasyon derinliğine sahip, $\sigma_{e\dot{g}} = 1287.013 \text{ N/mm}^2$ $N= 1225$ devirde kopan numunenin parlatılmış % 2'lik Nital ile dağlanmış X13,97 büyütülmüş foğrafi	56
Şekil 4.8.	1 mm sementasyon derinliğine sahip, $\sigma_{e\dot{g}} = 1287.013 \text{ N/mm}^2$ $N=11695$ devirde kopan numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafi	57
Şekil 4.9.	1 mm sementasyon derinliğine sahip, $\sigma_{e\dot{g}} = 1287.013 \text{ N/mm}^2$ $N=11695$ devirde kopan numunenin parlatılmış % 2'lik Nital ile dağlanmış X13,97 büyütülmüş foğrafi	58
Şekil 4.10.	1.5 mm sementasyon derinliğine sahip, $\sigma_{e\dot{g}} = 1218.156 \text{ N/mm}^2$ $N=67299$ devirde kopan numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafi	59
Şekil 4.11.	1.5 mm sementasyon derinliğine sahip, $\sigma_{e\dot{g}} = 1218.156 \text{ N/mm}^2$ $N=67299$ devirde kopan numunenin parlatılmış % 2'lik Nital ile dağlanmış X13,97 büyütülmüş foğrafi	60
Şekil 5. 1.	Sertleşme derinliğine bağı olarak yorulma dayanımının değışimi	61

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2. 1. Sementasyon işleminde kullanılan banyolar için, banyo bileşimleri, ağırlık oranları ve kullanım sıcaklıkları	11
Tablo 2. 2. Siyanür banyolarında, sıcaklık ve zamanın, sementasyon derinliğine etkisi	12
Tablo 2. 3. Sementasyon Çeliklerinin Sınıflandırılması	22
Tablo 2. 4. Sementasyon çeliklerinin çeşitli standartlardaki karşılıkları	23
Tablo 3. 1. Düzgün deney parçalarında sementasyon sertleşmesinin eğme değişken yorulma dayanımına etkisi	39
Tablo 3. 2. Farklı sertlik derinlikleri için kabuk ve çekirdeğin artık gerilmeleri arasındaki ilişki	43
Tablo 4. 1. Kullanılan numunenin kimyasal kompozisyonu ağırlıkça (%)	47
Tablo 4. 2. Isıl işlem görmeyen numunelerin yorulma deney sonuçları	52
Tablo 4. 3. 0.5 mm sementasyon derinliğine sahip numunelerin yorulma deney sonuçları	55
Tablo 4. 4. 1 mm sementasyon derinliğine sahip numunelerin yorulma deney sonuçları	57
Tablo 4. 5. 1.5 mm sementasyon derinliğine sahip numunelerin yorulma deney sonuçları	59
Tablo 5. 1. Yorulma dayanımının sertlik derinliği ile değişimi	61

ÖZET

Anahtar kelimeler : Sementasyon çelikleri, Sıvı sementasyon, Eğilmeli yorulma mukavemeti

Uygun şekillendirme ve yüzey kalitesinin yorulma mukavemetini olumlu yönde etkilediği bilinen bir gerçektir. Dönen eğme gerilmeli parçalarda yorulma mukavemetini artıran bir diğer faktör de parçanın dış yüzeyinin sertleştirilmesidir. Sertleştirme sonucu yüzeyde basma gerilmeleri meydana gelir. Bu da yüzeydeki çatlak ilerlemesini sağlayan çekme gerilmelerinin etkinliğini azaltır. Böylece yüzeydeki kılcal çatlak oluşması veya varolan çatlağın yüklenmesi önlenmiş ve yavaşlatılmış olur. Yüzey setliğini arttırmak için sementasyon, nitrürasyon, alevle, indüksiyonla sertleştirme ve pekleşme gibi işlemler uygulanabilir. Bu çalışmada hadde mamulü SAE 8620 (DIN 21NiCrMo2) çeliği kullanılarak, farklı sertlik derinliklerinin malzemenin yorulma dayanımına olan etkileri araştırılmıştır.

SUMMARY

Keywords : Cementation steels, Liquid Carburizing, Bending fatigue Stength

It is a known fact that proper forming and surface quality affect the fatigue resistance positively. Another factor which increases the fatigue resistance in rotating and bending parts under stress is the hardening of the outer surface. As a result of the hardening process, impact resistance occurs on the surface. This reduces the effectiveness of the ultimate tensile strength that causes the cracks on the surface to progress. Thus the formation of micro cracks or the extension of those already developed are stopped and slowed down. Processes like carburising nitriding, hardening with flame or induction can be used.

In this study, rolled SAE 8620 (DIN 21NiCr Mo2) steel has been used and the effect of different hardening depths on fatigue strength have been examined.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Malzemenin tekrarlı gerilmeler veya birim şekil değiştirmeler sonucunda kırılmasına yorulma denir. Yorulma ömrü kırılmaya kadar uygulanan tekrar sayısı ile verilir. Bu ömür şekillendirme, mikro çatlak ilerlemesi, makro çatlak ilerlemesi ve kırılma ile dört safhada meydana gelir.

Yorulma, hem çekirdeklenme hem de çatlak ilerlemesi safhasında plastik deformasyon sonucu oluşur. Her safhaya karşılık gelen tekrar sayısı kolaylıkla saptanamaz. Kırılma ömrün en son tekrarında oluşur. Hasarın bu safhası yorulmadan ziyade yarı-statik bir kırılmadır.

Yorulma çatlağı genellikle malzeme yüzeyinde oluşur. Bunun nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Bazı yükleme hallerinde zorlanma olur. (Burulma ve eğilmede) gerilmeler yüzeyde en büyük değerleri alır.
- Yüzey dış ortamdan etkileşir. (Örneğin çentik etkisi yapan korozyon çukuru oluşabilir.)
- Yüzeylerde düzlem gerilme halinin olması nedeniyle burada plastik şekil değişimi daha kolaydır.

Yukarıdaki sebeplerden de anlaşıldığı gibi yorulma mukavemetini arttırmak için yüzey sertleştirme işlemlerine tabi tutulur. Bütün yüzey sertleştirme işlemlerinde yorulma mukavemeti değerinin yükselişi yüzey tabakalarının mukavemetlerinin artması ve basma iç gerilmelerinin meydana gelmesiyle açıklanır [1]

Yüzey sertleştirme işlemlerinden parça yüzeyinde artık çekme gerilmesi meydana getirenlerin yorulma mukavemetini düşürdüğü, artık basma gerilmesi meydana getirenlerin ise eğme ve burulma gerilmesinin etkisini azalttığından yorulma mukavemetini artırdığı belirlenmiştir. [2]

Yapılan araştırmalarda, çeşitli metodlarla yüzeyleri sertleştirilen parçaların yorulma mukavemetlerinin arttığı, yüzeyleri yumuşayan parçaların yorulma mukavemetlerinin düştüğü görölmüştür.

Sementasyon yapılmış parçalar temperlendiğinde yorulma mukavemetlerinde düşüş görölmüştür.

Sementasyonla yüzey sertleştirmede sementasyon yapılan parçanın yüzey sertliği, yüzey mikroyapısı, gerilme dağılımı ve sertlik derinliğinin herbiri parçanın yorulma mukavemeti üzerine etki eder.

Sementasyon esnasında meydana gelebilen iç oksitlenme, dekarbürizasyon ve artık ostenit, yüzey sertliğini ve yüzeydeki artık basma gerilmelerini düşürdüğünden yorulma mukavemetini de düşürür. [2]

Yorulmada çatlak yüzeyde birden fazla noktada çekirdeklenebilir. Genlik gerilmesi arttıkça, bunların sayıları artar. Ancak yorulma sınırına yakın gerilme değerlerinde tek bir çatlak çekirdeklenmesi olabilir. [3]

Tok malzemelerde ise, çekirdeklenme daha zor olup çatlak ilerleme hızı düşüktür. Gevrek malzemelerde ise, çekirdeklenme daha zor olup çatlak ilerleme hızı yüksektir.

Malzemede başlangıçta makro-çatlak sayılabilecek bir hata mevcut değilse, yorulma ömrünün neredeyse tamamı çekirdeklenme safhasında geçer. Çekirdeklenme safhasında yorulma hasarı malzemenin çok küçük bir haciminde oluştuğu için, büyük ölçüde malzemedeki yerel şartlara bağlıdır. Bu nedenle, bir malzemenin deneysel olarak elde edilen yorulma özelliklerinde, bir deney parçasından diğerine, önemli ölçüde dağılma oluşur. Buna karşılık bir makro çatlaktan başlayan yorulmalarda, yorulma özelliklerinde bir dağılma görölmez.

Yorulma çatlağının ilerlemesi sırasında yorulma yüzeyinde "ince yorulma çizgileri" adı verilen ve ancak elektron mikroskobuyla görölebilen çizgiler oluşur. [3] Bu çizgiler, yorulma yüzeyinde gözle görölebilen ve "durak çizgileri" veya "Yorulma çizgileri" adı verilen çizgilerle karşılaştırılmamalıdır. İki durak çizgisi arasında binlerce ince yorulma çizgisi olabilir. İnce yorulma çizgileri, her yük tekrarında, çatlağın belirli bir miktar ilerlemesi sonucu oluşur. Yani bu çizgiler arasında uzaklık, çatlağın boyunda bir tekrar sonunda oluşan artmayı verir. Çatlak ilerledikçe çatlak ucundaki yerel gerilmeler daha da artıp çatlak ilerleme hızını artırır. Bu ise her bir tekrarda çatlağın boyundaki uzama

miktarını arttırdığından, ince yorulma çizgileri arasındaki uzaklık çatlak boyu arttıkça artar.

Verilmiş bir ortalama gerilme için, sonsuz ömre karşılık gelen genlik gerilmesine "Yorulma sınırı" adı verilir. Pratikte malzemelerin yorulma sınırları, döner eğme makinalarında ve parlatılmış yüzeye sahip deney parçalarında elde edilir. Çeliklerde 10^6 tekrar sonucu hasar oluşturmeyen genlik gerilmesi yorulma sınırı olarak kabul edilir.

Pratikte, makina elemanları döner eğilmeye maruz ve parlatılmış deney parçalarından farklı şekillerde yüklenirler ve bunların yüzeyleride farklı özelliktedir. Aynı zamanda, bir çok makina elemanından sonsuz ömür istenmez. Elemanın çeşitli değişken yükleme şartları altında yorulma dayanımını saptamak için, yorulma sınırı aşağıdaki faktörler göz önüne alınarak tashih edilmelidir.

- a) Parça boyutları
- b) Yüzey boyutları
- c) Yüzey şartları
- d) Çentik
- e) Ortalama gerilme
- f) İstenen ömür

Ancak bu şekilde, belirli bir makina elemanının belirli çalışma şartlarına uyan yorulma dayanımı elde edilir.

Dönel eğilmeye maruz çelik numuneler 8-10 mm çapındada olup, ayna parlaklığında bir yüzeye sahiptir. Herhangi bir çentik içermezler. 10^6 ve daha büyük tekrar sayılarına karşılık gelen yorulma dayanımı yorulma sınırı olarak adlandırılır.

Yorularak hasara uğramış elemanların kırılma yüzeyleri yorulmaya has üç ayrı bölgeye sahiptir.

- Yorulma çatlağının çekirdeklendiği bölge
- Yorulma çatlağının ilerlemesi sonucu oluşan bölge
- Zoraki kırılma bölgesi

Bu bölgelerin herbiri elemandaki yorulma hasarı ile ilgili belirli bilgiler verir. Yorulma çatlaklarının hemen hemen tümü parça yüzeyinde çekirdeklenir. Yorulma çatlağının çekirdeklendiği bölgenin dikkatli biçimde incelenmesi nedenini ortaya çıkarır. Örneğin bu bir çentiğin, talaş kaldırma sırasında oluşan bir yüzey girintisinin veya bir korozyon çukurunun neden olduğu gerilme yığılması olabilir. Yorulma çatlağının ilerlemesi sonucu oluşan bölge, makroskobik olarak düz ve pürüzsüzdür. Bu bölgede parçanın yükleme geçmişindeki değişmelerden dolayı oluşan ve gözle görülebilen "durak çizgileri" veya "Yorulma çizgileri" mevcuttur.

Yorulma çizgileri yüklemenin değişmesi dışında, yükleme frekansının değişmesinden veya elemanın dinlenme safhasında yorulma çatlağının oksitlenmesi sonucunda oluşabilir. Yorulma çizgileri, yorulma çatlağının ilerlemesi sırasındaki çeşitli safhalarda, çatlak cephesinin aldığı şekiller hakkında bilgi verir. Çatlak cephesinin şekli yükleme şeklini belirtir.

Zoraki kırılma bölgesinin büyüklüğü, uygulanan yükün büyüklüğü konusunda bilgiler verir. Bu bölgenin büyük olması gerilmenin büyük olduğu veya malzemenin kırılma tokluğunun küçük olduğu veya her ikisinin de mevcut olduğu anlamına gelir.

BÖLÜM 2. ÇELİKTE YÜZEY İŞLEMLERİ

Yüzeyi sert ve aşınmaya dayanıklı, buna karşın sünek bir çekirdek arzu edildiğinde, çeliklerde yalnızca yüzeyin sertleştirilmesine gidilir. Bunun için, yüzeyde belirli bir derinliğe kadar sertleşme sağlayan yöntemler geliştirilmiştir.

Yüzeyin sertleştirilmesinde, normal şartlarda yeterli düzeyde sertlik elde edilemeyen çeliklerin yüzeyine karbon verilerek sertleştirme yapılabilir (Sementasyon ve sertleştirme) veya yüzeyden sertlik artırıcı element atomları nüfuz ettirilebilir (nitrasyon). Ayrıca, iyi sertleşme kabiliyeti olan çeliklerin yüzeyinde, arzu edilen sertleşme derinliğine kadar olan kısmı ostenitleştirme sıcaklığına ısıtılarak ve ardından ani soğutma ile yalnızca bu bölgenin sertleştirilmesi yapılabilir (Alevle ya da indüksiyonla yüzey sertleştirme). Yaygın olarak kullanılan bu yöntemlerin dışında, yüzeye çelik püskürterek, baskı parlatması yaparak, özel haddeleme uygulayarak soğuk şekillendirme ile bu yüzey sertliği artırılabilir. Yüzeyin kaynakla, püskürtmeyle ya da galvanik kaplama (kromlama) ile kaplanmasıyla da yüzeyde sert tabaka oluşturmak mümkündür.

2. 1. SEMENTASYONLA YÜZEY SERTLEŞTİRME

Sementasyonla yüzey sertleştirme işlemi, çelik yüzeyinden karbon atomları difüzyonuyla karbon içeriğinin artırılması olan sementasyon ve ardından sertleştirme olarak iki aşamada gerçekleştirilir. Her ne kadar basit yöntem olarak, bu iki işlem birbirini takiben birlikte uygulanırsa da, işlemlerin ayrı ayrı açıklanması gerekir.

Ülkemizde, karbürleme ya da karbürizasyon adı da verilen sementasyon işleminde, normal şartlarda yeterli düzeyde sertleşmeyen ve karbon miktarı en fazla % 0,22 olan çeliklere, yüzeyden difüzyonla belirli bir derinliğe kadar karbon nüfuz ettirilir. Demir içerisinde karbonun difüzyon hızı oda sıcaklığında çok küçük, hatta sıfır olduğundan, karbonun kolayca nüfuz edebileceği ostenitik sahaya kadar çelik ısıtılmalıdır.

Oda sıcaklığından itibaren sıcaklığın artmasıyla karbonun demir içerisindeki difüzyon hızının iyileşmesine ve ferrit içerisinde difüzyon hızının ostenite nazaran yaklaşık 40-50 kat yüksek olur. Buna karşın ferritte karbonun çözünürlüğünün çok az olması nedeniyle, tam ostenitik sahaya çıkılması zorunludur. Krom ve benzeri alaşım

elementleri, karbonun difüzyon hızını azaltırken, azot ortamdan çeliğe karbon geçişini kolaylaştırır ve karbonun difüzyon hızını yükseltir.

Sementasyon işlemi katı, sıvı ve gaz halindeki karbon verici ortamlarda yapılabilir. Her üç durumda da, karbon moleküller değil, atom olarak demir kafesine nüfuz eder.

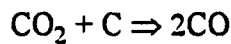
Tavlanmış çeliğin yüzeyine karbon verici maddelerin (sementasyon tozu) serpilmesi ile pek az derinlikli yüzey sertleştirmeye ulaşmak, çok eskiden beri bilinen ancak bugün pek az kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, ostenitleştirme sıcaklığına ısıtılmış çelik yüzeyine, potasyumferrosiyanür $K_4(Fe[CN]_6)$ ya da potasyumferrisiyanür $K_3(Fe[CN]_6)$ tuzları serpilir ve ardından ani soğutma yapılır. Yüksek sıcaklıkta bu tuzların parçalanmasıyla serbest hale geçen karbon, çeliğe nüfuz eder. Bu yöntem, pek az zorlamalar için yararlanılabilecek parçalarda kullanılabileceğinden nadiren uygulanır.

Endüstride yaygın olarak kullanılan katı, sıvı ve gaz halindeki karbon verici ortamlar, genel olarak her tür parça için kullanılabilir. Ancak, büyük boyutlu parçalarda ve düşük kapasitelerde daha çok katı ortam, küçük parçalarda ve seri üretimde ise daha çok sıvı ve gaz ortamları tercih edilmektedir. Gaz ortamda sementasyon işlemi, daha iyi kontrol temiz çalışma olanağı sağladığı için, daha pahalı yöntem olmasına karşın her geçen gün daha çok artan oranda tercih edilmektedir.

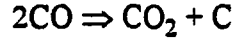
2. 1. 1. KATI KARBON VERİCİ ORTAMDA SEMENTASYON İŞLEMİ

Katı karbon verici madde olarak daha çok odun kömürü, aktiviteyi artırıcı, maddelerle birlikte kullanılır. Deri kömürü kullanılmasıyla sementasyon hızlanır (Burada, karbon dışında azot difüzyonu da olur.). Aktifleştirici maddeler, karbon verici ortamlarda, çeliğin karbon alma olayına yardım ederler.

Herhangi bir aktifleştirici bulunmadığında, odun kömürü ile yapılan kutu sementasyonda reaksiyon, kutu içerisinde mevcut oksijenin yardımıyla meydana gelir ve ısıtma sırasında CO_2 'ce zengin bir karışım oluşur. Bu karışım kömürle aşağıdaki reaksiyona göre etkileşime devam eder:

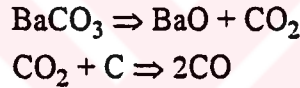


Sıcaklık arttıkça reaksiyonun dengesi yukarıdaki bağıntıda sağa doğru kayar (gaz karışımı CO 'ce yavaş yavaş zenginleşir). Çeliğin yüzeyindeki CO, aşağıdaki reaksiyona göre ayrışır:

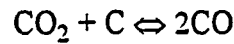


İkinci reaksiyon sonucu atomal karbon, çeliğin ostenit fazında kolayca çözünür ve çeliğin bünyesine girer. İkinci belirtilen reaksiyonda meydana gelen CO₂, ilk bağıntıda belirtildiği gibi kömürle (C) tekrar reaksiyona girer ve bu olay işlem süresince sürekli devam eder.

Kömür tozları arasındaki atmosferik oksijenin miktarı, sementasyon için gerekli olan gaz ortamı oluşturmak için yetersiz kalabilir. Bu nedenle, ilave aktifleştirici maddeler, daha çok da karbonatlar kullanılır. En çok kullanılanı da baryumkarbonattır. BaCO₃ aşağıdaki reaksiyonlara göre ayrışır:



Oluşan CO₂ kömürün karbonu ile reaksiyona girerek, aktif CO meydana getirir ve bu reaksiyonlar tersinir olarak sürekli devam eder. Bu nedenle, yukarıda belirtilen reaksiyonlar, çift yönlü sürekli olarak gerçekleşirler.



Odun kömürü ve baryumkarbonatın, alışılmış karışım oranı 60:40 ilâ 80:20 arasındadır. Baryumkarbonatın daha yüksek değerlerine, büyük sertleşme derinliği istendiğinde gidilir. Yukarıda da belirtildiği gibi, aktifleştirici maddelerin etkisi, karbonmonoksit (CO) teşekkülünde olmaktadır. Özellikle, ısınma ve karbon verme esnasında, karbonmonoksidin teşekkülü için gerekli oksijen, aktifleştirici maddelerin parçalanmasıyla oluşan karbonat ve oksitlerden sağlanmaktadır. Sementasyondan sonra soğumada ise, sementasyon için zararlı olan karbondioksit (CO₂), daha önce teşekkül etmiş baryumoksit tarafından yok edilir. ($\text{BaO} + \text{CO}_2 \Rightarrow \text{BaCO}_3$).

Çeliğin etrafını sarmış, değişik karbon bağlantılı gaz formundaki atmosferin durumu, sementasyon olayının seyrine büyük etki yapar. Katı karbon verici ortamdan oluşan, karbonmonoksit (CO) ve karbondioksit (CO₂) miktarları özellikle önem taşır.

Karbonmonoksit, yüksek sıcaklıklarda demirin karbon almasını sağlar. Karbondioksit ise çeliğin karbonunu alarak, yüzeyde karbon azalması yapar. Karbonmonoksit ve karbondioksidin ortamdaki oranına göre, çeliğe karbon verme ya da çelikten karbon alma olayı meydana gelir. Karbonmonoksit ve karbondioksidin çeliğe karşı nötr olma koşulları, sıcaklıkla, basınçla ve çeliğin karbon miktarıyla alakalıdır. Karbonmonoksit, karbondioksit ve tavlınmış kömürün kapalı kutu içerisindeki denge haline Boudouardik Denge adı verilir. Tam denge halinde, yukarıda verilen tersinir reaksiyon geçerlidir.



Bu dengeye göre, sementasyon için alışılmış sıcaklıklarda, CO ve CO₂ oranları şöyle olmalıdır:[4]

Sıcaklık (°C)	CO miktarı (%)	CO ₂ miktarı (%)
800	88	12
900	97	3
1000	99,96	0,04

Bu oranlar sementasyon ortamında çeliğin mevcut olmadığında, sıcaklığa bağlı olarak CO ve CO₂ miktarlarıdır. Çeliğin mevcut olması halinde, gaz atmosferin dengesi karbon miktarına bağlı olur.

Karbon verici atmosfer, CO-CO₂ gaz karışımı yanında, karbon verilen yüzeyin özelliklerini etkileyen ve difüzyon yapabilen diğer gazları da içerir. Bazı alaşımlı çeliklerde, özellikle alüminyum içeren ince taneli çeliklerde, yumuşak noktacıklar görülebilir. Bu şekilde homojen olmayan, bölgesel ve yetersiz sertlik artışı, nüfus eden oksijen ve azotun, alaşım elementleriyle birleşmesinde de görülebilir. Bu durumda alaşım elemanları, beklenen sertlik artışını sağlayamazlar.

Sementasyon esnasında, bir taraftan karbon verici ortamın karbon verme gücü, diğer taraftan bu karbonun çelik yüzeyinden malzeme içlerine ilerleme hızı birlikte anlam taşır. Eğer ortamın karbon verme gücü çok yüksek, ancak çelik içerisinde difüzyon hızı çok azsa, cidarda aşırı karbon yığılması ve cidarla çekirdek arasında karbon miktarı bakımından keskin geçiş doğar. Bundan başka, karbon miktarının % 0,8 'i aşması, ötektoidüstü çeliklerde olduğu gibi, serbest sementit meydana getireceği için istenmez. Teşekkül eden sementit tane sınırlarında ağ yapısı meydana getireceğinden,

yüzey tabakasının sünekliliğini düşürür ve sertleştirmeden sonra sementasyon tabakasında pul pul dökülmeler olur.

Birkaç ondabir milimetre gibi küçük sementasyon derinliklerinde, normal sementasyon çelikleri kullanıldığında da, % 0,8 karbon değeri aşılmamasına karşın güçlü sement edici ortam kullanılırda, cidar ve çekirdek arasında keskin güçlü olur. Büyük sementasyon derinlikleri istendiğinde, dış yüzeydeki karbon difüzyonu hızı frenlenir. Aşırı karbon, bileşimin keskin değişmesine neden olur. Yüzeyde çok fazla karbon zenginleşmesi, dış yüzeyde sementit teşekkül ettirir. 1 mm 'ye kadar sementasyon derinliklerinde, karbon miktarının % 0,80 'in üzerine çıkmasına engel olmak mümkündür. Daha büyük sementasyon derinliklerinde, daha az güçlü karbon verici ortam kullanılmalıdır. Ancak 3 mm 'nin üzerindeki sementasyon derinliklerinde daha az güçlü ortam kullanılsa bile, yüzeyde sementit teşekkülüne engel olunamaz. Çok yumuşak karbon verici ortamlar kullanılırsa, bu durumda da sementasyon süresi çok fazla artar ve ekonomik olmaz.

Sementasyon süresi en fazla sementasyon sıcaklığına, pek az da karbon verici ortama bağlıdır. Alışılmış odun kömürü-baryumkarbonat sementasyon maddesinde 930 °C sementasyon sıcaklığında, 1 mm sementasyon derinliği için 4 saat süre hesaplanır. Birinci saatin sonunda, yaklaşık 0,5 mm sementasyon derinliğine ulaşılır ve zamanın artmasıyla, sementasyon derinliği artma hızı azalır. Çok büyük derinliklerde süre çok fazla artar. Daha çok tercih edilen 1,5 mm sementasyon derinliği için 1 mm 'ye nazaran iki kat süre beklemek gerekir.

Nüfuz derinliğinin, zamanın karesi oranında hesaplanması genel kuraldır. çok kullanılan 930 °C sementasyon sıcaklığı için 1 mm derinliğe 4 saat gerekli olduğuna göre diğer derinlikler için süre şöyle hesaplanabilir:

Sementasyon süresi (saat) :	4	9	16
$\sqrt{\text{Sementasyon süresi}}$:	2	3	4
Nüfus derinliği (mm) :	1	1,5	2

Nüfuz derinliğine bağlı olarak, gerekli süreler 930 °C -4 saat 1 mm esasına göre:

Nüfus derinliği (mm) :	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
$(\text{Nüfus derinliği})^2 \cdot 4$:	$0,5^2 \cdot 4$	$1^2 \cdot 4$	$1,5^2 \cdot 4$	$2,0^2 \cdot 4$	$2,5^2 \cdot 4$
Sementasyon süresi (saat) :	1	4	9	16	25

Karbon veren ortamın karbon verme gücünün yüksek olması, yüzeyde karbon miktarının kısa zamanda artması yanında, karbonun cidardan itibaren içeriye nüfuzuna da olumlu etkisi vardır. Eşit zaman sonunda, yüzeyden belirli bir derinlikte daha yüksek karbon miktarına, karbon verme gücü daha yüksek ortamlarda ulaşılır. Ancak güçlü ortam kullanıldığında, tane sınırı sementitini yok etmek için işlemin sonuna doğru karbon verme gücü düşürülmelidir.

Uzun sementasyon süresinin yöntemi pahalılaştırmasının yanında, tane kabalaşmasına yol açacağı ve bu nedenle de sünekliliği düşüreceği unutulmamalıdır. Tane kabalaşmasını azaltmak için, sementasyon sıcaklığı 830-850 °C 'ye düşürülebilir. Düşük sementasyon sıcaklığı, sementasyon süresini çok arttıracığından, aynı şekilde tane kabalaşması görülebilir. Bu nedenle, daha yüksek sıcaklık ve kısa süre tercih edilir. Son durum daha ekonomik olduğundan, bugün daha çok 900-950 °C sıcaklıkları seçilmektedir. Çok büyük sementasyon derinliklerinde, 1000 °C 'ye kadar çıkılabilir.

Oldukça ekonomik çalışılmak istendiğinde, eşit sementasyon derinliğine 1000 °C 'de, 930 °C 'ye nazaran yarı zamanda ulaşılabilir. Ancak yüksek sementasyon sıcaklıkları, büyük ölçüde ve form değiştirmesine de neden olurlar. Ayrıca yüksek sıcaklıklar, uzun bekleme süresinde de olduğu gibi, sertleştirme sonrası yapıda kalan artık ostenit miktarını da artırır. Bu taneli çeliklerde de 1000 °C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda tane kabalaşması olacağından, tane kabalaşmasını engelleyen alüminyumnitürlerle bu durum azaltılmaya çalışılmalıdır.

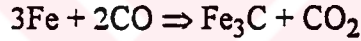
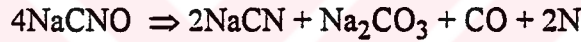
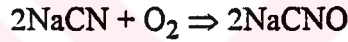
Cidar ve çekirdek arasındaki keskin konsantrasyon değişimine, sıcaklıkla etki edilebilir. Sıcaklık ne kadar yüksekse, demir içerisinde karbonun difüzyon hızı o kadar yüksek olacağından, cidar ve çekirdek arasındaki geçiş daha uygun hale gelebilir. Bu nedenle, yüksek sementasyon sıcaklıkları kullanılması, sertleştirme cidar ve çekirdek arasında oluşan gerilmelerin de azalmasını sağlar. Katı sementasyon maddeleri (odun kömürü) ısıyı kötü iletmediğinden ve semente edilen parçanın bu maddelerle çevrelenmesi gerektiğinden dolayı, dengesiz ısınmalardan kaçınmak için, gerekli olan sıcaklığa ısıtma için geçen süre uzun tutulmalıdır, yani ısıtma hızı yavaş olmalıdır.

Katı ortamda sementasyon yapılırken, sementasyon kutularına parçalarla birlikte konan sementasyon maddesinin kuru olması gerekir. Islak maddeler, parça yüzeyinde bozulma yapabilir. Kurutma için, havayla temas edebilen saç kutularda tavlınır. Sementasyon maddesi ne kadar küçük partiküller halinde ise, reaksiyon yüzeyi o kadar

artacağından, işlem hızlanır. Parçaların sandıkların içerisine yerleştirilmesinde, sementasyon maddeleri parçaları tam sarmalı ve yeterli miktarda olmalıdır.

2. 1. 2. SIVI SEMENTASYON MADDELERİYLE SEMENTASYON İŞLEMİ

Karbonun difüzyonu için yüksek sıcaklıklar gerekli olduğundan, sıvı sementasyon ortamı olarak ergiyik tuzlar kullanılır. Daha çok sodyumsiyanürlü (NaCN), pek az da potasyumsiyanürlü (KCN) tuz banyoları tercih edilir. Banyolar bundan başka, ayrıca klorürler ve toprakalkali metaller içerirler (Tablo 2. 1). Aktifleştirilmiş banyolarda, aktifleştirici madde olarak baryumklorür ya da stronsiyumklorür veya her ikisi birlikte kullanılır. Aktifleştirme etkisi siyanür (NaCN) ve toprakalkaliklorürlerin (BaCl_2 , SrCl_2) yüzde miktarına bağlıdır. Bu yöntemde sementasyon işlemi, şu reaksiyonlara göre olur:



İlk reaksiyon siyanür tuzu ile havanın ara yüzeyinde oluşur. Diğer iki reaksiyon ise, tuz banyosu ile çelik arasında meydana gelir.

Tablo 2. 1 Sementasyon işleminde kullanılan banyolar için, banyo bileşimleri, ağırlık oranları ve kullanım sıcaklıkları

Sementasyon için kullanılan tuzların ağırlık oranları	Kullanım sıcaklığı °C
A) 0,5 ... 1 mm sementasyon derinliği için:	
Potasyumklorür-Sodyumklorür-Sodyumsiyanür (1:1:8)	850...1000
Potasyumklorür-Sodyumklorür-Sodyumsiyanür-Baryumklorür (3:2:16:6)	800...980
Sodyumklorür-Sodyumsiyanür (1:3)	825...950
B) 2 mm 'ye kadar sementasyon derinliği için:	
Potasyumklorür-Sodyumklorür-Sodyumsiyanür-Potasyumsiyanür- Kalsiyumklorür (17:3:3:1:9)	850...1000
Sodyumklorür-Baryumklorür-Sodyumsiyanür-Baryumkarbonat (1:2:6:4)	800...950

Aktifleştirilmemiş banyolara, havanın oksijeni reaksiyon için gerekli olduğundan, banyonun üzeri örtülmez. Aktifleştirilmiş banyolar ise, grafit ya da kömürle örtülür.

Eğer çelikte pek az sementasyon derinlikleri isteniyorsa, banyoda siyanür miktarı yüksek tutulur. Büyük sementasyon derinliklerinde ve uzun sementasyon sürelerinde, klorürlerin ilavesiyle siyanür tuzlarının parçalanmasına ters etki yapılır. Siyanür banyolarındaki sementasyonda sodyumsiyanürün parçalanmasının nedeni, yüksek sıcaklık ve demirin mevcudiyetidir. Siyanür banyolarında, sıcaklık ve zamanın, sementasyon derinliğine etkisi tablo 2. 2'de verilmiştir. [4]

Tablo 2.2 Siyanür banyolarında, sıcaklık ve zamanın, sementasyon derinliğine etkisi

Sıcaklık (°C)	Zaman (saat)	Sementasyon derinliği (mm)
840	1	0,25
840	2	0,35
840	4	0,46
840	6	0,52
880	1	0,29
880	2	0,40
880	4	0,70
930	1	0,35
930	2	0,67
930	4	0,90

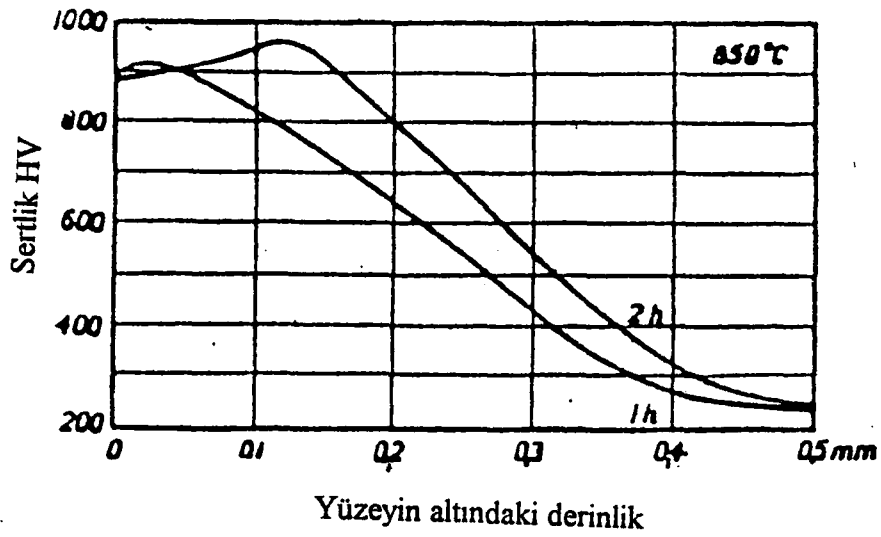
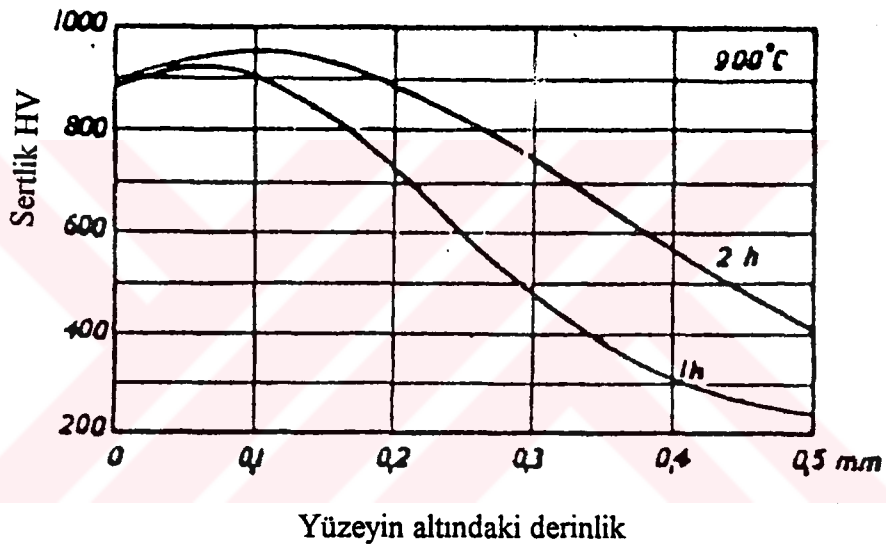
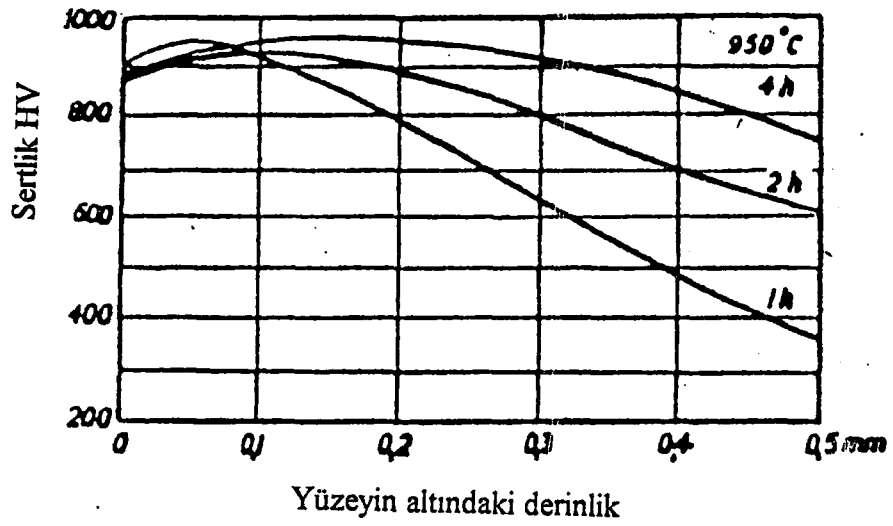
Siyanür banyolarında difüzyon seyri oldukça karışıktır. Siyanürden direkt karbon alınabileceği gibi, baryumklorür ve strosyumklorürün sodyumsiyanürle meydana getirdiği baryumsiyanür ve stronsiyumsiyanürden de karbon alınabilir. Serbestleşen atomal karbon, demire nüfuz eder. Düşük (850 °C 'ye kadar) sementasyon sıcaklıkları kullanılırsa, sementasyon hızı katı sementasyondan pek farklı değildir. Fakat daha yüksek sementasyon sıcaklıklarında tuz banyosundaki sementasyon hızı, yukarıdaki tabloda da görüldüğü gibi, katı ortama nazaran çok yüksektir. Tablodaki verilen değerler, C 15 çeliğinde (% 0,15 C 'lu alaşımsız kaliteli çelik) alınmış ve banyo konsantrasyonu sürekli aynı tutularak deneyler yürütülmüştür. Sementasyon süresi olarak, 200 °C 'ye ısıtılmış parçaların tuz banyosuna daldırılması ve alınması arasında geçen süre verilmiştir.

Diğer banyo konsantrasyonlarının seçilmesiyle, tabloda verilen sementasyon derinlikleri değerleri değişir. Tablo yalnızca, yükselen sıcaklıkla sementasyon derinliğinin arttığı ve artan sementasyon sürelerinde, sementasyon derinliğinin zamanla doğru orantılı artmadığını, artmanın azaldığını göstermektedir. Şekil 2. 1 'de de, tuz banyosunda semente edilmiş ve ardından ani soğutmayla sertleştirilmiş parçaların yüzeyinden itibaren çekirdeğe doğru sertlik dağılımına, sementasyon sıcaklığı ve

sementasyon süresinin etkileri verilmiştir. Şekillerde verilen bilgiler, yalnızca karşılaştırma içindir, gerçekte banyo konsantrasyonuna göre farklar olabilir.

Tuz banyolarındaki sementasyonda, katı ortama nazaran bazı üstünlükler vardır. Parçanın işlem sıcaklığına ısıtılması, katı ortamda gerekli olan uzun ön ısıtma süresi çok azaldığından, işlemin toplam süresi oldukça kısadır. Gerekli sementasyon süresi daha kolay ayarlanabilir. Tuz, malzemeyi tam olarak sardığından ve kullanılmış tuzlar, diğer tuzlarla banyo içerisinde hızlı karışabilmesinden dolayı, sementasyon çok homojendir. Daha az yumuşak nokta (leke) oluşur. Malzemenin yüzeyi temiz kalır, pek az temizleme gerekir. Parçaların banyoda asılı durması ve homojen ısıtma nedeniyle, katı ortamda yerleştirilmeye nazaran daha az deformasyon olur. Toplam ısınma süresinin kısa olması ve sementasyonun daha hızlı olabilmesi, tane kabalaşması tehlikesini azaltır. Bundan başka, banyoda sementasyonun en önemli üstünlüğü, banyoda sementasyondan sonra parçaların ani soğutmayla direkt sertleştirilebilmesidir. Tuz banyolarında sementasyonun üstün olmayan en önemli yanı, özellikle büyük sementasyon derinliklerinde maliyetlerin çok yüksek olmasıdır. Ayrıca, siyanür tuzlarının çok zehirli olması da büyük sorundur. Parçaların tuzlardan temizlenmesi de maliyeti yükseltmektedir. Alaşımlı çeliklerde, işlem esnasında azot difüzyonu da olur ve artık ostenit miktarının artmasıyla, sertleşmede maksimum sertliğe ulaşılamaz.

Semente edilen parçaların ağırlığı da katı ya da sıvı sementasyon kullanılmasında tercih nedeni olmaktadır. Küçük parçalarda ve az sementasyon derinliklerinde, tuz banyoları katı ortama nazaran daha ekonomiktir. Küçük parçalarda ve az sementasyon derinliklerinde, kutularda bulunan sementasyon maddelerinin çok olması ve bunların ısıtılma ve soğutulmaları, büyük enerji kaybına sebep olur. Büyük sementasyon derinliklerinde ve uzun sementasyon sürelerinde de katı ortam ekonomik olabilmektedir. Az sementasyon derinlikli küçük parçalarda, parçaların sepete konarak banyoya, daha sonra da sepetle sertleştirmeye uygun olması bir üstünlük sayılır. Bu tarz parçalarda odun kömürü ile sementasyon işleminde, daha fazla enerji gerektirmesi, parçaların kutuya düzgün ve belirli aralıklarla yerleştirilmesi, sementasyondan sonra soğutma, kutudan tek tek alınması ve sertleştirme için tekrar ısıtılması gerekir. Ayrıca, banyo sementasyonda parçaların bir bölümünün ısıtılarak semente edilmesi mümkündür. buna karşın, tuz banyolarında semente edilmek istenmeyen parça yüzeylerinin şamot çamuru ya da pastayla örtülerek korunması olanaksızdır. Galvanik bakır kaplama da, ancak kısa süreli ısıtılmalarda koruma sağlayabilir. Parçalar kendi ağırlıklarıyla banyo içerisinde sallandıklarından, tuz banyoları, gerek katı ortamda ve gerekse gaz ortamda sementasyona nazaran daha az deformasyon yaparlar.



Şekil 2. 1 Çeşitli sıcaklıklardaki tuz banyolarında sementelenen ve yağda ani soğutulan 14 mm çapındaki yumuşak çelik parçalarda sertleşme derinlikleri

Çelik parçalar tuz banyosunda sementasyondan önce yağdan, yapışmış talaşlardan ve taşlama tozlarından temizlenmiş olmalıdır. Tuz banyosuna daldırmada, parçalar ıslak olmamalıdır. Isıtma esnasında oluşan gerilmeleri azaltmak için, parçaların 300-600 °C arasında ön ısıtılması yararlıdır. Normal banyo sıcaklığı genellikle 930 °C seçilir, bazı hallerde ise 850 °C 'yi aşmaz. Sementasyon esnasında parçaların birbirleriyle temas etmesi sorun değildir. Parçalar tuz banyosundan alındığında, direkt sertleştirme yapılmayacaksa, 200 °C 'deki banyoda soğutulması yararlı olur. Parçaların açık havada soğutulmasında, siyanür tuzlarının havada okside olması ve diğer karbonsuz tuzların demirle reaksiyonu sonucu, yüzeyde aşınmalar (korozyon) olur. Bu durum, özellikle banyo artığının fazla miktarda olması ya da parçalar arasında banyo tuzu kalmasında görülür. Soğutmanın yağda (yaklaşık 100 °C) yapılması, yapışan tuzların daha sonra temizlenmesini güçleştirdiği için uygun değildir.

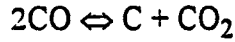
Siyanür tuzları, çalışma yerinde kilitli depolarda depolanır, kurutulur ve havalandırılır. Tuzların giriş ve çıkışı çok sıkı kontrol edilmelidir. Atık sular da zehirli olduğundan, sertleştirme atölyesinin tabanları su ile kesinlikle temizlenmemelidir. Çalışma esnasında maske ve eldiven kullanılması zorunludur. 16 yaşından küçük çocuk ve kadınların, kesinlikle çalıştırılmaması gerekir.

Banyonun sementasyon koşullarının kontrolü, gaz sementasyonda olduğu gibi folye yöntemi ile yapılır. Bu deney yönteminde, % 0,1 karbonlu alaşımsız çelikten, 0,05 mm kalınlığındaki folyeler banyo içerisine daldırılır ve semente edilir. Belirli bir sürede, tüm kesitinde ulaşılan karbon miktarı, banyonun o sıcaklıkta karbon verilebilirliğini belirtir. Bu yöntem, aktifleştirilmiş banyolarda daha çok anlam taşır. Bu banyolarda, ince folyelerin karbon alması ve parçalardaki sementasyon değerlerinin karşılaştırılabilir oranları, banyo hakkında bilgi verir. Deneye, folyeler belirli bir süre, örneğin 930 °C 'de 15 dakika banyo içerisinde kaldığında, tüm kesiti eşit karbon miktarına ulaşır. Folyeler, itinalı bir şekilde tuzlarından temizlendikten sonra, karbon miktarı analizle tesbit edilir. Karbonlaşma deneyinde folyeler yerine, semente edilen parçaların talaşları da kullanılabilir (Ancak, keskin köşeli olmamalarına dikkat edilmelidir.). Bu amaçla, katı ortamda olduğu gibi teller de kullanılabilir. Ayrıca, banyonun direkt analizinin yapılmasında mümkündür, hatta bu yöntem daha kesin sonuç alınmasını sağlar.

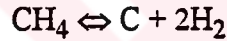
2. 1. 3. GAZ ORTAMDA SEMENTASYON İŞLEMİ

Katı karbon verici maddelerle sementasyonda, sementasyon maddelerinden oluşan gazlar, gaz sementasyon işleminde de söz konusudur. Burada, katı sementasyon maddeleriyle reaksiyon olmaksızın, gaz formundaki karbon bağlantıları direkt olarak sementasyon için kullanılır. Gaz olarak, doğalgaz, metan, propan ve havagazı kullanılabilir. Gazların sementasyon amacıyla kullanılabilmesi için, gaz jeneratörlerinde bazı ön hazırlıkların yapılması zorunludur.

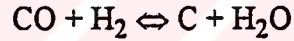
Bu gazlarda mevcut olan hidrokarbon, örneğin metan (CH₄) yüksek sıcaklıklarda parçalanır ve demire karbon verir. İşleme hidrokarbon girdiği için, aynı anda birkaç reaksiyon cereyan eder:



Reaksiyona ilave olarak, örneğin metanın ayrışma reaksiyonu:



ve su-gaz reaksiyonu:



meydana gelir.

Bu reaksiyonlarda atomal hale geçen karbon, çeliğin yüzeyinden katı ortamda sementasyona benzer şekilde nüfuz eder. Bu esnada, metanın çok kuvvetli parçalanmasında moleküler karbon meydana gelir ve kurum (is) halinde çelik yüzeyinde yapışır, karbon verici gazı çelik yüzeyinden uzaklaştırır. Bu nedenle, gazın parçalanmasıyla meydana gelen karbon atomlarının, demirin alabileceğinden fazla olmaması gerekir. Bundan başka, havagazı, diğer gazlara nazaran önemli miktarda karbondioksit (CO₂) içerir. CO₂ yüksek sıcaklıklarda karbon azaltıcı olarak rol oynar. Metanın parçalanmasını kolaylaştırmak ve karbonu, karbonmonoksit (CO) haline dönüştürmek için gazla birlikte hava da verilir. Bu durum, katalizör olarak nikel etkisiyle 1000 °C 'deki jeneratörlerde yapılır. Gaz jeneratörden geçtiğinde, CH₄ yanında az miktarda CO ve hidrojen (H₂) içerir. Havagazındaki CO₂ miktarı çok düşürülmelidir. CO₂, CO 'i redükler. Sementasyon etkisini sağlamak ve yükseltmek için, bu gazlara taşıyıcı olarak az miktarda hidrokarbon (daha çok propan) ilave edilir.

Küçük sementasyon tesislerinde, direkt hava ve propanla çalışılabilir. Bu yöntemde kurum oluşmasını önlemek için, gaz-hava karışımına amonyak (NH_3) ilave edilir.

Katı ve sıvı sementasyona nazaran, gaz sementasyon şu üstünlüklere sahiptir:

Çeliğin karbon alması daha hızlıdır ve karbonun çelikteki dağılımı, geniş sınırlar içerisinde daha iyi ayarlanabilir. Konsantrasyon değişimi ile gazların etkisi, çok kuvvetli ile çok zayıf arasında ayarlanabilir. Hatta, nötr ya da karbon azaltıcı olarak düzenlemek olanağı vardır. Bu ayarlama, taşıyıcı gazlardan çok, propan miktarının düzenlenmesi ile yapılır. Böylece, çekirdek ve cidar arasındaki geçiş sert ya da daha yumuşak yapılabilir. Bundan başka, karbon miktarı istenilen seviyede (% 0,6 - 0,8 C) tutulabilir. Bir diğer üstünlüğü de, sıcaklık kontrolü ve ayarlamasının çok kolay yapılabilmesidir. Sıcaklık homojen olarak dağılır. Katı ortamda sementasyona nazaran enerji gereksinmesi daha azdır, uzun sementasyon sürelerinde de bu yöntem ekonomik olabilmektedir. Isıtma tesisi (fırın) daha küçüktür.

Gaz sementasyon yöntemi, yüzeyde imalat kalitesini bozmayacak temiz bir yöntemdir. Tuz banyoları ile karşılatırıldığında, sementasyon maddesi gereksinmesi azdır. Diğer yöntemlere göre üstün olmayan yönleri, gaz hazırlama tesislerinin ve kontrol atmosferli fırının tesis maliyetinin yüksek olmasıdır. Bu amaçla, trikloretilen ile yıkanır. Oksitlerden kesinlikle sakınılmadığında, fırın atmosferi değişir. Sementasyon süresi, diğer yöntemlere göre oldukça kısadır.

Gaz sementasyonda taşıyıcı gazların üretimi, büyük işletmelerde genellikle santralda, jeneratörlerde yapılır. Karbondioksitin kontrolü çok önemlidir. Mevcut konsantrasyon sahasında, karbondisoksit ve su buharı yaklaşık orantılı değiştiğinden, genellikle su buharının belirlenmesi yapılır. Buradan, karbondioksit bulunur.

Fırın olarak, atmosfer kontrollü kapalı hücre fırın veya sürekli fırın kullanılabilir. Sürekli fırınlarda sementasyon gazı gereksinmesi daha büyüktür. Bundan başka, gaz sızdırmaz kapalı fırınlarda gaz, birçok fırına iletilebileceğinden, taşıyıcı gaz gereksinmesi azaltılabilir. Parçaların semente edilmeyecek bölümleri, katı ortamda sementasyonda olduğu gibi, pastalarla kapatılabilir. Parçaların sertleştirilmesi, fırından direkt yapılabilir. Havada ve yağda sertleştirme olanaklıdır ve çok daha temiz yüzey elde edilir. Yağın temizlenmesi için özel uygulamalara gerek yoktur.

2. 1. 3. 1. Katı Sementasyon Maddeleriyle Gaz Sementasyon (Granül Yöntemi)

Bu yöntemde sementasyon gazı, gaz sızdırmaz sementasyon fırınlarının içerisinde üretilir. Burada da sementasyon maddesi katı ortamda sementasyonda olduğu gibi, odun kömürü ve aktifleştirici maddelerin granül halinde olanıdır. Granüller, fırının bir bölümünde bulunur. Fırında bulunan havanın oksijeni granüllerle reaksiyona girerek, sementasyon potansiyeline birkaç saat içerisinde ulaşıldığından, granül sementasyonu 0,5 mm 'nin üzerinde sementasyon derinlikleri için daha uygundur. Aşırı karbonlaşmada, daha büyük sementasyon derinliklerine (1 mm 'ye kadar) ulaşmak olanaklıdır.

Granül yönetimi, çok yüksek tesis maliyeti gerektirmez, sementasyon maddesi gereksinmesi de azdır. Özellikle küçük işletmelerde, pratik ve ekonomik olarak kullanılabilir.

2.1.3.2. Sıvı Sementasyon Maddeleriyle Gaz Sementasyon (Damla-Gaz Yöntemi)

Damla-gaz yönteminde, sıvı sementasyon maddesi (hidrokarbon) gaz sızdırmaz fırına damlatılarak ya da püskürtülerek verilir. Kapalı hücre fırın yerine sürekli fırında da uygulanabilir. Doyma sınırının altında karbon potansiyelinin ayarı biraz güç olduğundan, 0,5 ilâ 1 mm arasındaki sementasyon derinliklerinde aşırı karbon verme olabilir. Damla-gaz yönteminde, granül yönetimine nazaran daha küçük sementasyon derinlikleri için uygundur. Bu nedenle, daha çok 0,5 mm 'ye kadar sementasyon derinliklerinde, damla-gaz yöntemi kullanılır. Damla-gaz yönteminde, derin sementasyon derinliklerine engel olmak için, sementasyon süresi ayarlanabilir ve difüzyon tavlama zor olduğundan, bu yöntemin uygulanması kolay değildir. Sementasyon maddesi, küçük miktarlarda ve aralıklı olarak verilmelidir. Bu nedenle, belirli bir atmosferin sürekli sağlanması güçtür. Sementasyon maddesi ile birlikte taşıyıcı gaz kullanılması, bu güçlüğü kısmen azaltır. Damla-gaz yönteminin masrafları da, taşıyıcı gaz kullanılması halinde azalır.

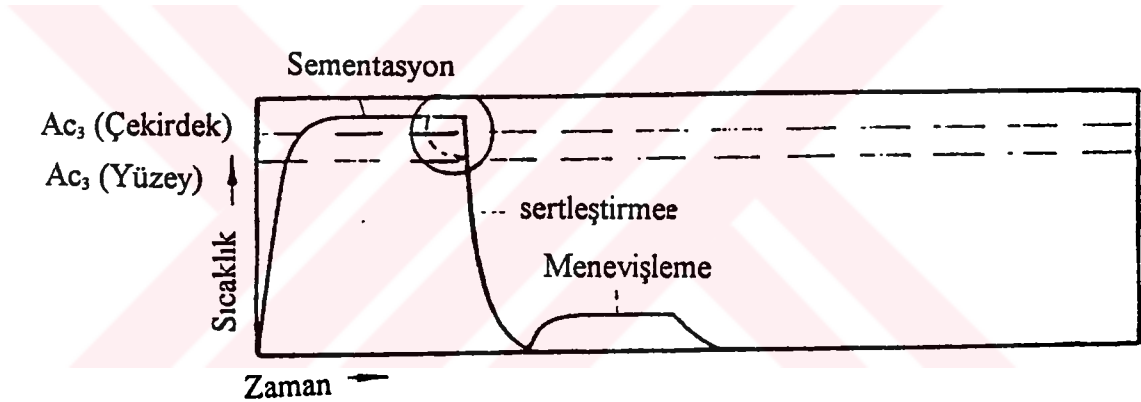
2. 1. 4. SEMENTASYONDAN SONRA SERTLEŞTİRME İŞLEMİ

Şimdiye kadar yapılan açıklamalarda, semente edilen parçaların sementasyon sıcaklığından direkt sertleştirilebildikleri belirtilmişti. Çeliğin taneleri kaba olduğu ve cidar bölgesi tane sınırı sementiti içerebileceğinden dolayı, bu uygulama yalnızca fazla zorlanmayan parçalarda ve küçük sementasyon derinlikleri için kullanılabilir. Gaz sementasyondan sonra direkt sertleştirme yapılacaksa, bu nedenle fazla sementasyon

derinliği istenmez. Alaşımlı eliklerde de, krom gibi karbür teşekköl ettirici elementler, cidar bölgesinde fazlar karbon zenginleşmesine ve küçük sementasyon derinliklerine neden olurlar.

Tane sınırlarındaki sementit, alaşımsız çeliklerde difüzyon tavlamaıyla ya da E-S dönüşüm hattının üzerinde tavlamakla, tane sınırlarında azaltılabilir. Alaşımlı karbürlerin dağıtılması, çözülebilirliğin az olması ve aşırı doymuş cıarda yeni karbürlerin oluşmasını önlemek, ancak difüzyon tavlamaıyla mümkündür. Alaşımsız eliklerde çözölmüş sementitler de, havada soğutmada tane sınırlarında tekrar kabuk formunda oluşabilir. Kabuk teşekkölü, biraz hızlı soğutmayla (yağda) önlenabilir. Bu uygulama, hızlı soğutmanın deformasyon meydana getirmediği, karışık formda olmayan parçalarda yapılabilir.

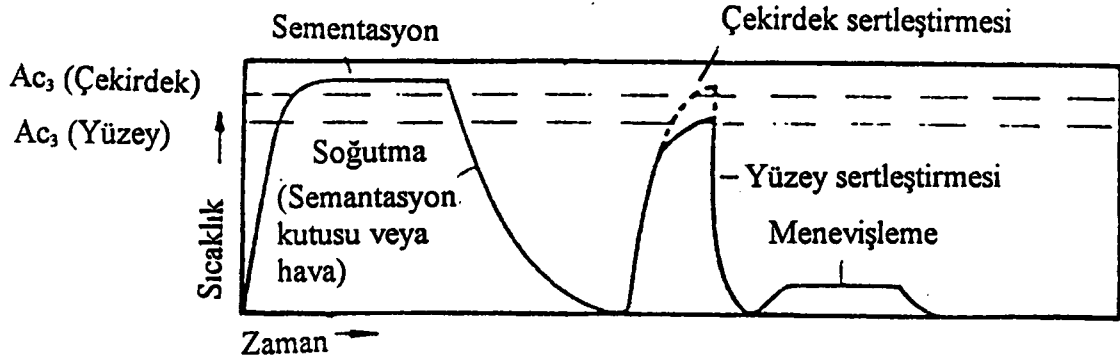
2. 1. 4. 1. Direkt Sertleştirme



şekil 2. 2 Direkt sertleştirme

Sementasyon sonrası, elik parça sementasyon sıcaklığından direkt olarak uygun ortamda (yağ, su, sıcak banyo) soğutularak sertleştirilir ve menevişlenir. şekil 2. 2 'de yuvarlak içine alınmış bölgede kesik çizgi ile belirtilen yol, sementasyon sıcaklığının uygun sertleştirme sıcaklığından yüksek olduğu durumlarda parçanın çarpılmasını önlemek için yüzey dönüşüm sıcaklığına kadar yavaş soğutulmasını ifade etmektedir. Bu yöntem ince taneli yapıdaki çelikler için uygulanır. Oldukça pratik ve ekonomik bir yöntemdir.

2. 1. 4. 2. Basit Sertleştirme

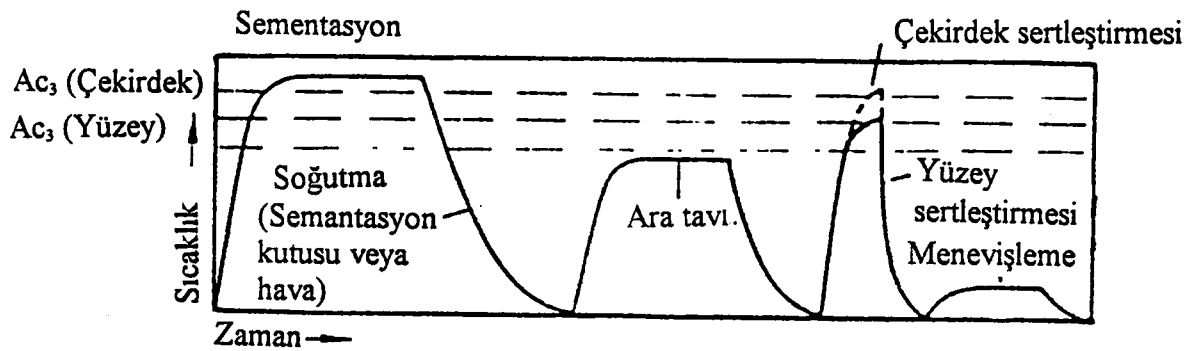


Şekil 2. 3 Basit sertleştirme

Sementasyon sonrası parça sementasyon fırınında veya havada soğutmaya bırakılır. Daha sonra, isteğe göre parçanın yüzeyinin sertleştirilmesi için, yüzey dönüşüm sıcaklığına veya yüzey ve çekirdeğin beraberce sertleştirilmesi için çekirdek dönüşüm sıcaklığına ısıtılır, uygun ortamda [yağ, su veya sıcak banyo] soğutulur ve menevişlenir.

Bu yöntem değişik kesitli parçalarda, çarpılmaların istenmediği hallerde uygulanır.[5]

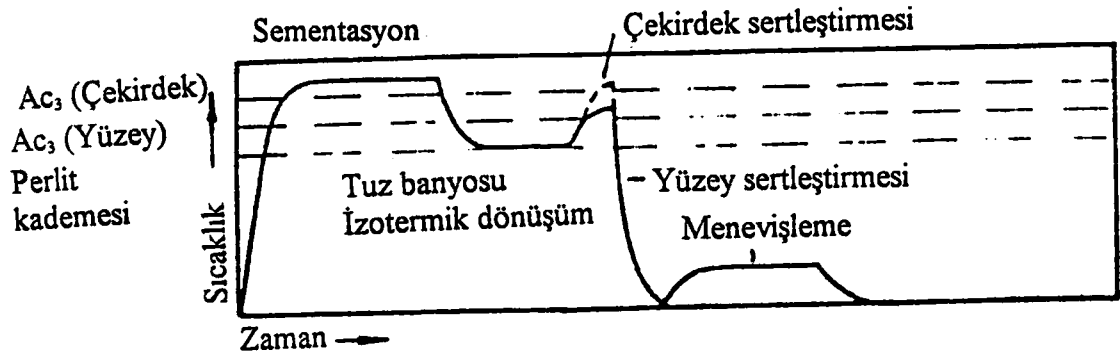
2. 1. 4. 3. Basit Sertleştirme (ara tavından sonra)



Şekil 2. 4 Ara tavlama sonrası basit sertleştirme

Çelik parçalar semente edildikten sonra, sementasyon kutusu veya havada soğutmaya bırakılır. Sonra, A_1 ötektoid sıcaklığı altında, genellikle 630-650 °C 'de aratavi yapılır. Bunu takiben yüzey veya beraberce yüzey-çekirdek sertleştirme için gerekli sıcaklığa ısıtılır, uygun ortamda [yağ, su veya sıcak banyo] soğutulur ve menevişlenir.

2. 1. 4. 4. Basit Sertleştirme (İzotermik dönüşünden sonra)



Şekil 2. 5. İzotermik dönüşümden sonra basit sertleştirme

Sementasyon sonrası, parçalar yüzey dönüşüm sıcaklığı altında (500-600 °C) perlit yapının izotermik dönüşümü tamamlanıncaya kadar ısıtılarak tekrar sertleştirilir ve menevişlenir. Bu yöntemle çok iyi neticeler elde edilebilir. Ancak, ard arda yapılan sertleştirmelerle parçada çarpılmalar olabilir.[5]

2. 1. 5. Menevişleme

Bu işlemin gayesi, sertliği bir miktar düşürerek sertleştirme sonrası çelik parçadaki gerilimleri gidermektir. Sertleştirme sonrasında çelik parçalar genellikle 160-220 °C arasındaki sıcaklıklarda menevişlenirler. Menevişleme zamanı 1-2 saattir. Eğer sonuçta parça yüzeyindeki sertlik 60 HRC 'den düşük istenmiyor ise, menevişleme sıcaklığı 180 °C 'den fazla olmamalıdır.

Tablo 2. 3 : Sementasyon çeliklerinin sınıflandırılması

Kısa ÇELİK İşareti		KİMYASAL BİLEŞİM (% Ağırlık)							
Malz.No		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
KALİTE ÇELİKLERİ									
C 10	1.0301	0.07 0.13	0.15 0.35	0.30 0.60	- 0,045	- 0,045	-	-	-
C 15	1.0401	0.12 0.18	0.15 0.35	0.30 0.60	- 0,045	- 0,045	-	-	-
ASAL ÇELİKLERİ									
Ck 10	1.1121	0.07 0.13	0.15 0.35	0.30 0.60	- 0.035	- 0.035	-	-	-
Ck 15	1.1141	0.12 0.18	0.15 0.35	0.30 0.60	- 0.035	- 0.035	-	-	-
15 Cr 3	1.7015	0.12 0.18	0.15 0.40	0.40 0.60	- 0.035	- 0.035	0.40 0.70	-	-
16 MnCr 5	1.7131	0.14 0.19	0.15 0.40	1.00 1.30	- 0.035	- 0.035	0.80 1.10	-	-
20 MnCr 5	1.7147	0.17 0.22	0.15 0.40	1.10 1.40	- 0.035	- 0.035	1.00 1.30	-	-
20 MoCr 4	1.7321	0.17 0.22	0.15 0.40	0.60 0.90	- 0.035	- 0.035	0.30 0.50	0.40 0.50	-
25 MoCr 4	1.7325	0.23 0.29	0.15 0.40	0.60 0.90	- 0.035	- 0.035	0.40 0.60	0.40 0.50	-
13 NiCr 6	1.5713	0.10 0.17	0.15 0.35	0.40 0.70	- 0.035	- 0.035	0.65 0.85	-	1.35 1.50
14 NiCr 14	1.5752	0.10 0.17	0.15 0.35	0.40 0.70	- 0.035	- 0.035	0.55 0.95	-	3.25 3.75
15 CrNi 6	1.5919	0.12 0.17	0.15 0.40	0.40 0.60	- 0.035	- 0.035	1.40 1.70	-	1.40 1.70
18 CrNi 8	1.5920	0.15 0.20	0.15 0.40	0.40 0.60	- 0.035	- 0.035	1.80 2.10	-	1.80 2.10
17 CrNiMo 6	1.6587	0.14 0.19	0.15 0.40	0.40 0.60	- 0.035	- 0.035	1.50 1.80	0.25 0.35	1.40 1.70
21 NiCrMo 2	1.6523	0.17 0.23	0.15 0.40	0.60 0.90	- 0.035	- 0.035	0.35 0.65	0.15 0.25	0.40 0.70
ASAL ÇELİKLER (Kükürt Miktarı Belli Sınırlar İçinde Olanlar)									
Cm 15	1.1140	0.12 0.18	0.15 0.35	0.30 0.60	- 0.035	0.020 0.035	-	-	-
16 MnCrS 5	1.7139	0.14 0.19	0.15 0.40	1.00 1.30	- 0.035	0.020 0.035	0.80 1.10	-	-
20 MnCrS 5	1.7149	0.17 0.22	0.15 0.40	1.10 1.40	- 0.035	0.020 0.035	1.00 1.30	-	-
20 MoCrS 5	1.7323	0.17 0.22	0.15 0.40	0.60 0.90	- 0.035	0.020 0.035	0.30 0.50	0.40 0.50	-
25 MoCrS 5	1.7326	0.23 0.29	0.15 0.40	0.60 0.90	- 0.035	0.020 0.035	0.40 0.60	0.40 0.50	-

Not: Direkt sertleştirilecek alaşımlı çeliklerde ağırlık olarak en az % 0.02 metalik alüminyum bulunmalıdır.[5]

Tablo 2. 4 Sementasyon çeliklerinin çeşitli standartlardaki karşılıkları

ALMAN STANDARDI DIN		AMERİKAN STANDARDI SAE/AISI	İNGİLİZ STANDARDI BS/En
Kısa İşareti	Malz. No		
C 10	1.0301	~ 1010	050 A 10
C 15	1.0401	~1015	050 A 15
Ck 10	1.1121	1010	~040 A 10 045 M 10
Ck 15	1.1141	1015	~040 A 15
15 Cr 3	1.7015	5015	~523 M 15
16 MnCr 5	1.7131	5115	~527 A 19 (~En 207)
20 MnCr 5	1.7147	5120	-
20 MoCr 4	1.7321	-	-
25 MoCr 4	1.7325	-	-
13 NiCr 6	1.5713	3115	-
14 NiCr 14	1.5752	~3316	655 A 12 (En 36 B)
15 CrNi 6	1.5919	~3115	~637 A 16 (~En 352)
18 CrNi 8	1.5920	-	~ En 320
17 CrNiMo 6	1.6587	-	-
21 NiCrNo 2	1.6523	8620	-
Cm 15	1.1140	~1015	-
16 MnCrS 5	1.7139	~ 5115	-
20 MnCrS 5	1.7149	~ 5120	-
20 MoCrS 5	1.7323	-	-
25 MoCrS 5	1.7326	-	-

BÖLÜM 3. YORULMA

3. 1. YORULMA ZORLAMASI VE KIRILMASI

3. 1. 1. Genel Tanımlar

Uygulamada statik zorlamalara ender olarak rastlanır. Makinalara ve dolayısıyla makina parçalarına, genellikle büyüklüğü ve yönü düzenli veya düzensiz olarak sürekli değişen kuvvetler ile eğme ve burma momentleri etki ederler. Değişen zorlamalardan dolayı kırılma, sözkonusu malzemenin akma sınırının çok altındaki gerilmelerde oluşabilir. Bu tür kırılmalara yorulma kırılması adı verilir. Tasarım sırasında mukavemet bilgisinin temel denklemleri yardımıyla sadece anma gerilmelerin kesitteki dağılımlarının ve zamanla değişimlerinin de dikkate alınması gerektiği ancak belirli aşamalardan sonra anlaşılmıştır.

Konstrüktörler tasarımlarında malzemelerin ekonomik olarak kullanımını gözönünde bulundurmamak zorundadırlar. Mukavemet ve elastisite bilgisinin gelişmesi, giderek daha düşük güvenlik katsayılarının seçimi ve yüklerin daha kesin olarak tahmin edilebilmesi ile, malzeme değişikliğine gitmeden de makina ve yapı elemanlarının daha küçük kesitli olarak boyutlandırılabilmesi mümkün olmuştur. Ancak bu durumda gerilmelerin akma sınırlarını aşmamasına yeterince özen gösterildiği halde, işletme sırasında makina parçalarında kırılmalar gözlenmeye başlanmıştır. herhangi bir şekil değiştirme yaratmadan ortaya çıkan bu kırıkların, yüksek yüklerin bir kez ve tek yönde uygulanması ile oluşan kırılma yüzeylerinden, görünüşleri bakımından tamamıyla farklı oldukları saptanmıştır. Bu gözlemlerin büyüklüğü ve yönünde zamanla değişmelerin sözkonusu olduğu durumlarda, statik deneylerle saptanan mukavemet değerlerinin malzemenin davranışını belirlemekte yetersiz kaldığı anlaşılmıştır.

Böylece bütün bu deneyimler yorulma dayanımı* kavramının doğmasına neden olmuş ve deneysel olarak yorulma dayanımının, statik dayanım değerlerinden çok daha düşük düzeyde olduğu saptanmıştır. Ancak işletme yüklerine göre hesaplanan gerilmeler, kullanılan malzemenin düzgün yüzeyli ve parlatılmış deney parçaları

* Yorulma Dayanımı: Sonsuz sayıda tekrarlanmasına rağmen kırılmaya neden olmayan en yüksek gerilme.

yardımıyla bulunan yorulma dayanımının çok altında kalmasına rağmen, makina parçalarının gene hasara uğradığı gözlenmiştir. Bunun üzerine yapılan deneylerle, şekil, yüzey durumu, kuvvet iletimi, makina parçasının bulunduğu ortam ve malzemelerin iç yapısı gibi değişik iç ve dış etkenlerin yorulma dayanımını değiştirdiği; dolayısıyla bu etkenlerin yorulma dayanımını değiştirdiği; dolayısıyla bu etkenleri dikkate almadan bulunan yorulma dayanımı değerlerinin mukavemet hesaplarında aynen kullanılamayacağı anlaşılmıştır.

İşletme koşullarında değişen zorlamaları ve malzeme davranışını hesapsal olarak kapsamayı amaçlayan çalışmalar henüz tatmin edici olmamakla birlikte, parçaların gittikçe daha iyi bir yaklaşımla tasarlanmasını sağlamaktadır. Şimdiye kadar çok sayıda yorulma deneyi sonucu ve değişik hesaplama yöntemleri yayınlanmıştır. Bu kuramsal yöntemler, sorunun matematiksel çözümü yanında tasarım kuralları ile kullanılan malzemenin özelliklerinin iyi bilinmesi halinde güvenle uygulanabilmektedir. Ancak yorulmaya etki eden faktörlerin fazlalığından ötürü günümüzde de gene çok sayıda yorulma hasarına rastlanmakta; makina, taşıt v.b. konstrüksiyonlarda görülen hasarın % 90-95 'i yorulmadan ileri gelmektedir.[6]

3. 1. 2 Yorulma Zorlamasının Özellikleri

Büyüklüğü ve yönü düzenli ya da düzensiz bir şekilde sürekli değişen kuvvet veya momentlerin (eğme, burma) etkimesi yorulma zorlaması olarak adlandırılır. Zorlama sırasında yük istendiği kadar tekrarlanabilir veya zorlamanın yapıldığı zaman aralıkları mevcut olabilir.

Yorulma zorlanmasında yükün zamana bağlı olarak nasıl değiştiğinden çok, en alt ve en üst sınır değerlerinin büyüklüğü önemli olduğundan, yük değişimi genellikle sönüzdoidal olarak kabul edilebilir. Birim zamandaki çevrim sayısı,* çok düşük (örneğin saatte bir kaç çevrim) veya malzemenin ısınmasına neden olacak kadar çok yüksek olmamak koşuluyla, yorulma ömrünü** önemli ölçüde etkilemez. Kuvvetin veya momentin en küçük ve en büyük değerleri sıfır konumuna göre ters veya aynı işaretli olabilir. Yorulma zorlamasının iki hali için özel isimler biri artı diğeri eksi işaretli iki sınır değeri arasında değişiyor ise değişken zorlama ve malzeme dayanımı bakımından değişken yorulma dayanımı değeri sözkonusudur. Kuvvet veya moment sıfır değeri ile belirli bir diğers sınır arasında değişiyor ise dalgalı zorlama ve malzeme dayanımı

* Cevrim: Periyot, yük tekrarı

Birim zamandaki çevrim sayısı: Frekans, yük tekrar hızı

** Yorulma Ömrü : Kırılmaya kadar geçen çevrim sayısı.

bakımından dalgalı yorulma dayanımı değeri deyimleri kullanılır. Yorulma zorlaması sadece dış kuvvetlerin değil, örneğin sıcaklık farkları nedeni ile oluşan iç kuvvetlerin etkimesi ile de görülebilir.

3. 1. 3. Yorulma Kırılmasının Nedeni

İşletme koşullarındaki zorlamalar sonucu ortaya çıkan gerilmeler mukavemet bilgisinin temel denklemlerine her zaman uymaz; dolayısıyla çekme veya basma gerilmeleri parça kesitinde eşit olarak dağılma, eğme ve burma gerilmelerinde yüzeyden ortaya doğru doğrusal bir azalma göstermeyebilirler. Uygulamada bu kuramsal gerilme dağılımlarında^{*} az veya çok sapmalar görülür. Parçanın şekli, yüzey kalitesi, ortamın korozif etkisi, kuvvet iletiminin türü, ön gerilme, malzeme hatası, mikroyapının büyük ölçüde heterojen olması gibi nedenler ile yerel gerilme yığılmaları oluşur. Yorulma çatlağı gerilme yığılmalarının bulunduğu bölgelerde başlar. Ayrıca bir makina veya yapı elemanının öztitreşim frekansına yakın bölgelerde zorlanması sonucu oluşan rezonans titreşimlerine veya her zaman önlenmesi mümkün olmayan aşırı yüklerle dayanacak şekilde tasarlanmış olmaması da yorulma çatlaklarına yol açabilir. Yorulma hasarının diğer bir nedeni de montaj hatalarıdır. Örneğin balansı bozulmuş bir milde, hesaplarda öngörülenden daha yüksek gerilmeler oluşabilir.

Ayrıca zorlanan bölgelerde dolgu kaynağı işlemlerinin uygun olarak yapılmaması halinde de yorulma çatlakları görülebilir. Aşırı zorlanan bir bölgede bir çatlağın başlaması durumunda yorulma kırılmasının önlenmesine çoğunlukla olanak yoktur. Çatlağın ilerleyerek kırılmanın oluşması ise çevrim sayısı yani (frekansa bağlı olarak) belirli bir zaman sorunudur. Bir yorulma çatlağının görülmesi kullanılan malzeme veya malzeme durumu için yerel bir gerilme yükselmesinin bulunduğu işaretler. Yorulma sonucu oluşan keskin çatlak ek bir çentik etkisi ortaya çıkaracağından, gerilmeler bakımından durum daha kötüleşecek, bu suretle yaratılan çok yüksek gerilme yığılmaları çatlağın hızlı ilerlemesi ve büyümesine neden olacaktır. Ayrıca yük taşıyan kesit sürekli küçüldüğünden, bu kesitte gerilmenin sınır değerleri giderek daha da yükselecektir. Gözlemler yorulma çatlağı ilerleme hızının çatlak derinliğinin karesi ile arttığını göstermektedir. Parçanın ikiye ayrılması çoğunlukla uzunca bir süreyi gerektirdiği ve zorlama sürekli değiştiği için olay yorulma kırılması olarak adlandırılır. Bazı hallerde ise yorulma çatlakları kesitin tam olarak ayrılması ile sonuçlanmaz; çatlak oluşması ile parça daha az zorlanır ve dolayısıyla gerilmenin üst sınırı malzemenin yorulma dayanımı değerinin altında kalırsa veya çatlağın çevresinde

* Çekme veya basma kesite eşit olarak dağıldığı varsayılan gerilmeye; eğme veya burmada doğrusal olarak değiştiği varsayılan gerilmenin maksimum değerine "Anma Gerilmesi" denir.

gerilme durumunun değişmesi ile yerel bir malzeme pekleşmesi oluşursa çatlak ilerlemesi durabilir.

3. 1. 4. Yorulma Zorlamalarında Kırılma Olayı

Sürekli artan zorlamalarda şekil değiştirmenin tek yönlü olmasına karşın, yorulma zorlamasında kuvvet veya moment, dolayısıyla şekil değiştirme sürekli yön değiştirmeler malzemenin kristal kafesi tarafından tam elastik olarak karşılanabildikleri sürece tehlikeli değillerdir. Küçük kalıcı şekil değiştirmeler de kırılma olmadan kristal kafesi tarafından taşınabilirler. Kalıcı şekil değiştirmeler kristal kafesin çarpılması ile değil, kafesin değişik bölümlerinin yeri bir denge durumu sağlanıncaya kadar ötelenmesi yoluyla oluşurlar. Kafes kısımlarının birbirlerine göre ötelenmelerine kayma adı verilir ve olay kayma düzlemleri olarak adlandırılan tercihli bazı düzlemlerde olur. Kayma düzlemlerinin kristal kafesindeki konumu kristal yapısı ile ilgilidir.

Yorulma zorlamaları sonucu meydana gelen kayma, tek yönlü zorlamalardaki gibi dislokasyonların oluşumu ve ilerlemesi ile açıklanır. Bu şekil değiştirme mekanizması, parlatılmış deney paaralarının yüzeyinde yorulma sınırına yakın zorlamalar altında kayma çizgileri oluşmasıyla görünür duruma gelebilir. tek yönlü zorlamalarda olduğu gibi yorulma zorlamaları sırasında da pekleşme olayı görülür. Pekleşme sadece şekil değiştirmenin miktarına değil, ayrıca az da olsa frekansa bağlıdır. Yorulma zorlaması uygulanan malzemelerde yapılan metalografik incelemeler, pekleşme sonucu yapı değişikliklerinin oluştuğunu kanıtlamıştır.[7] Bazı gözlemlerde ancak kayma ve yerel sıcaklık artışlarının varlığı ile açıklanabilecek çökelmeler görülmüştür. Tekrarlanan şekil değiştirmeler kristal kafes tarafından sürekli olarak taşınamadığı için, yorulma zorlamasının pekleşme dışında hasar etkisi de vardır. Kaymaların miktarına ve bir ölçüde de frekansa bağlı olarak belirli bir çevrim sayısından sonra ortaya çıkan hasara, yeterince araştırılmış ve tatmin edici bir kuramsal açıklama yapılmış değildir. Bununla birlikte örneğin X- ışını araştırmaları[8] hasar başlangıç kademeleri hakkında bazı bilgiler sağlamış ve yorulma sırasında iç gerilmelerin meydana geldiğini göstermiştir. -180 °C sıcaklıkta çekme - basma değişken yükleri ile zorlanan deney paaralarında yapılan mikroyapı gözlemleri de, gittikçe artan ölçüde ikiz oluşumunun varlığını ortaya koymuştur.

şimdiye kadar elde edilen bilgilere dayanarak, yorulma zorlaması sırasında tekrarlanan kalıcı şekil değiştirmelerin yeteri kadar birikimi sonucu, malzemenin ayrılma dayanımının aşıldığı noktalarda mikroskopik boyuttan da küçük çatlaklar oluştuğu

söylenbilir. Zorlama sırasında dışarıdan verilen enerjinin büyüklüğüne bağlı olarak bunlar mikro ve makroçatlaklar olarak birleşir ve sonunda bu çatlaklardan herhangi biri yorulma kırılmasına neden olur.

Hasar çok küçük ve sınırlı bir bölgede başlayıp çatlak olarak ilerlediğinden dışardan herhangi bir kalıcı şekilde değiştirme görülmez ve bu nedenle yorulma kırılmaları şekil değiştirmesiz olarak nitelenir. Hasarın ilk oluştuğu nokta çoğunlukla yüzeyde veya yüzeyin hemen altındadır, ancak heterojenliklerin veya malzeme hatalarının durumuna göre malzemenin iç kısmında da bulunabilir.

3. 1. 5. Yorulma Kırılmasına Neden Olan veya Kırılmayı Kolaylaştıran Etkenler

Yorulma kırılmasını kolaylaştıran etkenler [9] dış etkenler (şekil, yüzey durumu ve zorlama şekli) ile iç etkenler (malzemenin durumu) olarak ikiye ayrılabilir. Bir yorulma hasarının oluşmasında genellikle birçok etkenin aynı anda varlığı söz konusudur, ancak sadece tek bir olumsuz etkenin kırılmaya neden olduğu durumlarda görülmüştür.

Denetimlere göre yorulma kırılmalarının büyük çoğunluğu (yaklaşık % 85-90) malzeme hatalarından dolayı değil, çentik etkisi yapan şekil ve yüzey etkileri, aşırı yükleme montaj hataları, yetersiz bakım ve benzeri nedenlerle ortaya çıkmaktadır.

3. 1. 5. 1. Dış Etkenler

1. Konstrüksiyonla ilgili çentikler: Örneğin yağ delikleri, kama yuvaları, keskin kesit değişimleri, faturalar, enine delikler v.b.
2. Kuvvetlerin doğrultu değiştirdiği yereler: Örneğin civata kafaları, krank millerinin dirsekleri, sıkı geçmeler v.b.
3. Kuvvet etki noktaları : Örneğin toleranslı veya sıkı geçmeler, dingil başlıkları ve diğer noktasal veya çizgisel etkiyen kuvvetler.
4. Talaşlı işlemler sırasında oluşan yüzey zedelenmeleri: Örneğin taşlama izleri, taşlama çatlakları, torna izleri, yüzey çizikleri v.b.

5. Diğer yüzey zedelenmeleri: Örneğin korozyona uğramış noktalar (özellikle karıncalanma ve tane sınırı korozyonu), aşınmış bölgeler, sertleştirme çatlakları, hadde veya dövme hataları, katmerler, katlanmalar v.b.

3. 1. 5. 2. İç Etkenler

1. Çizgi halinde cürufalar, cüruf kalıntılarının yoğunlaştığı bölgeler veya tek tek iri cüruf kalıntıları: Cürufların, oksitlerin, nitrürlerin ve karbürlerin tane sınırlarına çökelmeleri
2. Her türden birikmeler (segregasyonlar)
3. Döküm esnasında yada soğuk şekil değiştirme sırasında oluşan mikroboşluklar
4. Yüzey kabarcıkları
5. Mikrolunkerler (örneğin döküm yapısındaki malzemelerde) veya soğuk şekil değiştirme sırasında sert kalıntılar içinde ve çevresinde oluşan mikroboşluklar (örneğin kaba lamelli perlit veya alüminyum oksit kalıntıları içeren çeliklerin soğuk şekil değiştirmesinde).
6. Tane sınırlarında oksitlenme (yanma) veya tanelerin içinde oksijen miktarının artması. Her ikisi de sıcak şekil verme veya ısıl işlem sırasında aşırı yüksek sıcaklıklar nedeni ile ortaya çıkabilir.
7. İç çatlak kümeleri: Haddelenmiş veya dövülmüş çeliklerde veya ark kaynağı dikişlerinde görülür.
8. Normalize edilmiş çelikte aşırı heterojen yapı, örneğin yapıda perlit ve ferrit bulunması halinde ferritin ağ şeklinde olması, düşük ferrit oranlarında ferrit dağılımının homojen olmayışı veya perlit ve ferrit kaba bant yapısı oluşturması
9. Sertleştirilmiş çeliklerde yapı farklılıkları: Örneğin martenzitte kısmen beynit, perlit veya ferrit bölgeleri; temperleme veya ostemperleme ısıl işleminden sonra yüksek oranda artık ostenit; ostemperlemeden sonra yüksek oranda ferrit veya perlit bulunması.

10. Aşırı ısıtılmış yapı: Örneğin Widmannstaetten yapısı veya kaba taneli yapılar. Pelit ve ferrit karışımlarında $800..2500 \mu m^2$, ince ilâ normal tane büyüklüğü olarak kabul edilebilir. Aşırı ısıtılmış yapılar yorulma dayanımını daima olumsuz yönde etkiler.
11. Bant veya ağ şeklinde veya bölge bölge yoğunlaşmış serbest karbürler: Örneğin takım çelikleri ve sementasyon çeliklerinde.
12. Sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş çelik parçaların yüzeyinde karbon azalması (dekarbürizasyon).
13. Yayınma tabakaları ile ana malzeme arasında keskin geçişler: Örneğin sementasyon çeliklerinde karbürize edilmiş yüzeyden ana malzemeye olan keskin geçiş bölgelerinde faz dönüşümü nedeniyle oluşan yapısal gerilmelere ek olarak iç çentik etkisi ile gerilme yığılmaları meydana gelir.
14. Bölgesel yüzey sertleştirilmesi yapılmış malzemelerin yük taşıyan bölgelerinde veya çentiklerde, sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş kısımlar arasındaki keskin geçişler.
15. Sementasyon ile sertleştirilmiş çelik malzemenin yüzeyinde artık ostenit bulunması
16. Sertleştirilmiş çeliklerde çeşitli nedenlerle yumuşak kalan bölgeler.
17. Çelik parçalarda yüzeyde veya yüzeyin hemen altında bulunan sertleşmiş küçük bölgeler: Örneğin manyetik parçacıklar yöntemi ile yapılan muayenede elektrod temas noktalarında aşırı ısınma veya punta kaynağı sonucu ortaya çıkan bölgeler.
18. Yük taşıyan kısımlarda yapılan dolgu kaynakları: Şayet kaynak öncesi, parça $200-300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa ön ısıtılmamış ve dolgu malzemesinin yavaş katılaşmamış ve dolgu malzemesinin yavaş katılmasından sonra bütün parça normalize veya ıslah edilmemiş ise.
19. Kaynak dikişlerinde gaz boşlukları, gözenekler cüruf kalıntıları, çatlaklar, erime oyukları bulunması. Yorulma zorlamasıyla karşılaşabilecek kaynak bağlantılarının gerilme giderme ve normalizasyon tavlalarının yapılmaması

20. Kaynak dikişi dışındaki elektrot ateşleme izleri
21. Soğuk şekil değiştirmiş küçük bölgeler: Bunlar örneğin montaj veya işletme sırasında darbe sonucu oluşabilir. Özellikle çeliğin yaşlanma özelliği varsa çatlamaya neden olur. (Perçin deliği çatlağı gibi).
22. Talaşlı veya talaşsız şekil verme veya ısıl işlemlerden kaynaklanan iç gerilmeler, özellikle bunların çekme gerilmesi olması durumunda.

Yukarıda belirtilenler dışında yorulma hasarını kolaylaştıran veya doğrudan hasara neden olan başka malzeme veya yapı hataları da bulunabilir. Verilen liste, çok rastlanılan hataları önem sırasını dikkate almadan kapsamaktadır. Esasen hataların yorulma hasarını kolaylaştırıcı etkilerine göre sıralanması da mümkün değildir. Malzeme ve yapı hatalarının değerlendirilmesi, daima zorlama şekli ve yorulma hasarının oluşumu ile bağıntı kurularak yapılmalıdır.

3. 2. KIRIKLARININ MAKROSKOPİK GÖRÜNÜMLERİ VE OLUŞUM ŞEKİLLERİ

3. 2. 1. Yorulma Kırıklarının Görünümü

Yorulma kırıklarının görünümü [10],[11], özellikle çelikler için, hemen hemen her olayda zorlamanın şekli ve seviyesi ile zorlamanın zamanla değişimi hakkında bilgiler verir. Kırılmanın başladığı yerler çoğunlukla saptanabilir. Yorulma kırılmasının ilerleyişinden de noktasal veya çevresel çentik etkilerinin var olup olmadığı anlaşılabilir. Çeliklerin çekme ve eğme zorlamalarında kırık yüzeyindeki görünümüleri bakımından birbirinden tamamen farklı iki bölge ortaya çıkar:

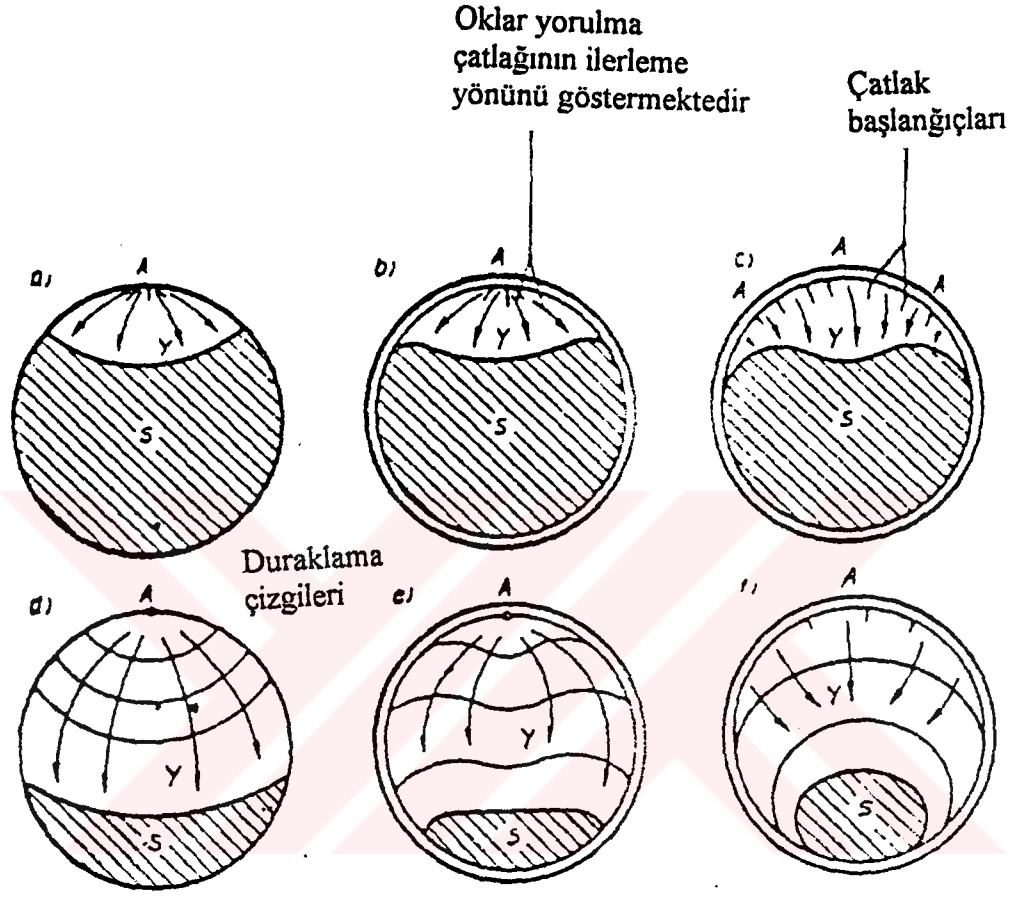
- a) Düzgün ve mat veya bazen sürtünerek parlamış bölge: Yorulma çatlağı
- b) Kaba kristalli, yarıklar içeren, kısmen kalıcı şekil değiştirmiş ve son çevrim sırasında sorunlu olarak ani kırılmış bölge: Son kırılma yüzeyi

Yorulma çatlağında zorlamanın durdurulduğu aralıklar veya zorlama seviyesinin değişimi nedeniyle, ağaçlarda görülen yaş halkalarına benzer duraklama çizgileri bulunabilir. Duraklama çizgileri yorulma kırılmasının kesin bir işaretidir ve bu çizgilerin şekinden yorulma kırılmasının başlaması ile ilerlemesi hakkında bilgiler elde edilir.

3. 2. 2. Yorulma Kırılmasının Oluşum Şekilleri

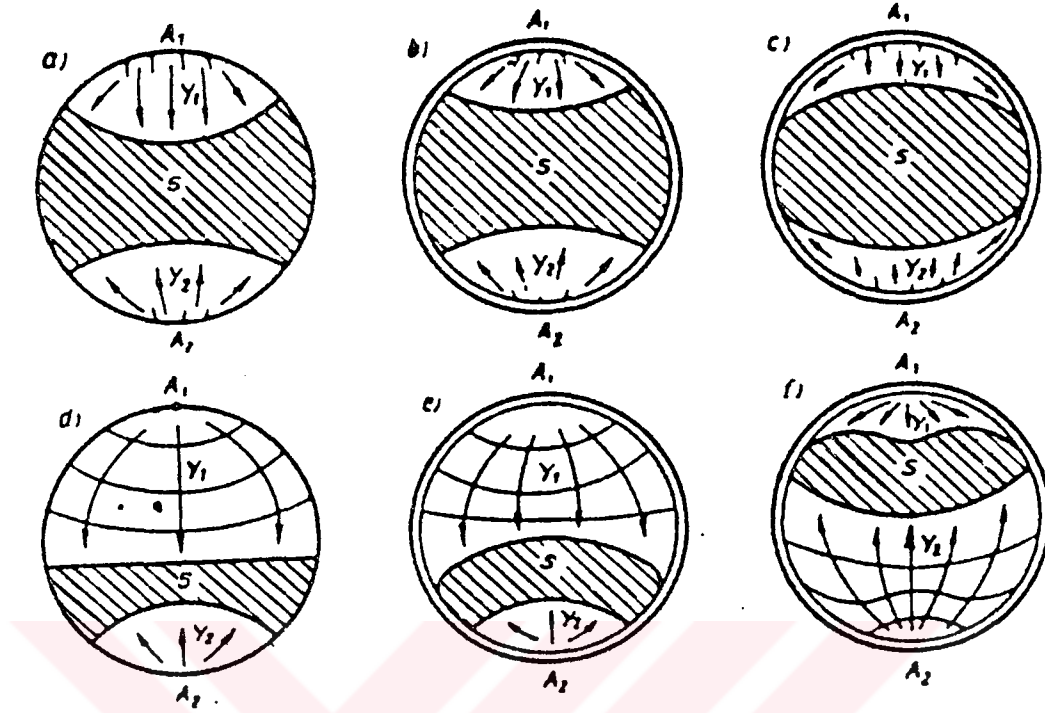
Şekil 3. 1-a. .. f'de çekme zorlamaları ile tek taraflı eğme zorlamasının ortak etkimesi sonucu görülebilecek yorulma kırılmalarının oluşum şekilleri şematik olarak gösterilmiştir. Çekme zorlamasının tek başına etkimesi çok ender rastlanan bir olaydır. Çoğunlukla kuvvet etkiye noktasının çok az da olsa eksenden kaçması ile çekme zorlamalarına ek olarak tek taraflı eğmelerin ortaya çıkması ve ayrıca yorulma çatlağının ilerlemesi ile eğme gerilmelerinin artması sözkonusudur. Yorulma kırılmasının oluşum şekilleri kolaylık bakımından dairesel kesitte gösterilmiş ve çevresel çentik etkisinin bulunduğu durumlar çift daire ile belirtilmiştir. Yorulma kırılması sırasında oluşan son kırılma yüzeyinin tüm kesite oranı, etki eden işletme zorlamasının seviyesine bağlıdır. Bu oranın büyük olması yüksek bir zorlamanın uygulandığını veya yorulma zorlaması için malzemenin uygun seçilmediğini gösterir.

Şekil 3-1 a... f'de verilen temel şekillerde çatlak başlangıcı olan A noktasının daima yüzeyde olduğu varsayılmıştır, ancak bu zorunlu bir durum değildir. Genellikle düşük anma gerilmelerinde (son kırılma yüzeyi küçük) tek bir başlangıç noktası, yüksek anma gerilmelerinde ise aynı düzlemde bir kaç çatlak başlangıcı bulunur.



Şekil 3-1.(a...f) Çekme zorlamaları ile tek taraflı eğme zorlamalarının ortak etkimesi sonucu yorulma kırıklarının oluşum şekilleri. Y: yorulma çatlağı;S: son kırılma yüzeyi.

- Çekme zorlaması altında yorulma kırılması: Anma gerilmesi yüksek, yerel çentik etkisi zayıf
- Çekme zorlaması altında yorulma kırılması: Anma gerilmesi yüksek tüm çevrede zayıf bir çentik etkisi, çatlak cephesinin kenarları daha hızlı ilerliyor.
- Çekme zorlaması altında yorulma kırılması: Anma gerilmesi yüksek, tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi. Cephe kenarları daha da hızlı ilerliyor.
- Çekme. Düşme anma gerilmesi. Küçük bir yerel çentik etkisi bulunan düzgün parça. Çatlak cephesi A etrafında daireler şeklinde ilerliyor.
- Çekme. Düşme anma gerilmesi. Zayıf çevresel olan çentik etkisi nedeniyle çatlak cephesi kenarları hızlı ilerliyor.
- Çekme. Düşme anma gerilmesi. Tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi.Son kırılma hemen hemen tümüyle yorulma çatlağı ile çevrilmiş.



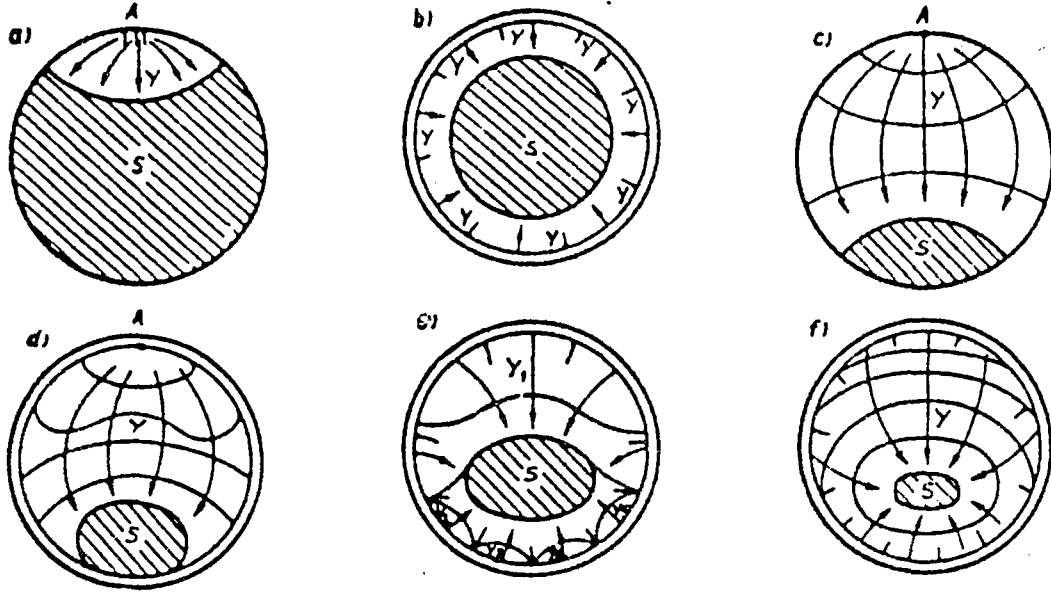
Şekil 3-2 (a...f) Çift taraflı eğme zorlamaları altında yorulma kırıklarının oluşumu

- a) Anma gerilmesi yüksek, yerel çentik etkisi zayıf.
- b) Anma gerilmesi yüksek, çevresel çentik etkisi zayıf.
- c) Anma gerilmesi yüksek, çevresel çentik etkisi kuvvetli.
- d) Anma gerilmesi yüksek, zayıf yerel çentik etkisi bulunan düzgün parça.
- e) Anma gerilmesi yüksek, tüm çevrede zayıf çentik etkisi
- f) Anma gerilmesi yüksek, tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi.

Şekil 3-2 (a...f) çift taraflı eğme zorlamaları sırasında yorulma kırıklarının oluşumunu şematik olarak göstermektedir. Bu yorulma kırılmalarında işletme gerilmelerinin yüksek olması halinde son kırılma yüzeyleri kesitin ortasında oluşmaktadır. Düşük anma gerilmelerinde ise, ikinci çatlağın oluşumu birinciye göre gecikme gösterdiğinden son kırılma yüzeyi genellikle ortada değildir.

Dönen parçaların eğilmesi (çevresel eğme), sonucu oluşan yorulma çatlaklarının temel şekilleri Şekil 3-3a...f'de gösterilmiştir. Bu şekiller çekme veya tek taraflı eğmeye çok benzer olabilirler, ancak çatlağın ilerlemesi her ikisinden de daha hızlıdır.

Çekme veya eğme zorlamalarında görülen yorulma kırılmalarında kırık yüzeyi daima gerilmelere dik yönde oluşur. Aynı anda etkiyen kayma gerilmelerinin yorulma çatlağının ilerlemesinde hiçbir katkısı yoktur. Buna karşın kayma gerilmeleri sünek malzemelerde son kırılmayı etkileyebilir. Bu durumda son kırılma normal gerilmeye göre 45° açı ile oluşur.



Şekil 3-3 (a...f) Dönen parçaların eğilmesi (çevresel eğilme sonucu oluşan yorulma kırıkları)

- a) Yüksek anma gerilmesi. Yerel çentik etkisi
- b) Yüksek anma gerilmesi. Tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi.
- c) Düşük anma gerilmesi. Yerel çentik etkisi.
- d) Düşük anma gerilmesi. Tüm çevrede zayıf çentik etkisi.
- e) Düşük anma gerilmesi. Tüm çevrede zayıf çentik etkisi. Çok sayıda çatlak başlangıcı.
- f) Düşük anma gerilmesi. Tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi.

Burma zorlaması sonucu meydana gelen yorulma kırık yüzeyleri, görünüşleri bakımından çekme ve eğme zorlaması kırıklarından çok farklıdır. Ayrıca gösterdikleri çeşitlilikten ötürü, şematik olarak karakteristik tiplerinin verilmesi de mümkün değildir. Düzgün şekilli gevrek malzemelerde ve düzgün şekilli olmakla birlikte enine delikleri veya yüzeyinde basma kuvvetlerinin etkideği bölgeler bulunan sünek malzemelerde burma yorulma çatlağı mil eksenine 45° eğimle başlar. Çatlak ilerlemesi spiral şeklinde devam edebilir veya malzemenin kaymaya duyarlılığı ile zorlama durumuna bağlı olarak parça eksenine dik ya da paralel yöne dönebilir. Spiral şeklinde ve yarıklar içeren çatlaklarda kırılan iki parça bir kavrama gibi çalışarak moment taşıyabilir. Böylece çok küçülen son kırılma yüzeyine bakarak işletme gerilmesinin seviyesi hakkında tahminde bulunulamaz.

Sünek malzemelerde görülen burma yorulması kırılmaları, eksene dik veya paralel yönde kayma kırılmaları olarak, yani kayma gerilmesinin en yüksek olduğu yönlerde ortaya çıkar. Çentik etkisinin çevresel olarak yüksek olduğu durumlarda ise (kanallar, derin boyunlar v.b.) kırılma, gevrek ve sünek malzemelerin her ikisinde de eksene dik düzlemlerde oluşur. Ayrıca çevresel çentiğin bir çok yerinde çatlak başlayarak halka şeklinde kesit ortasına ilerleyen bir yorulma çatlağı meydana gelir.

Burma yorulması çatlaklarının veya eğme ile burmanın ortak etkidiği durumlarda görülen yorulma çatlaklarının yorumlanması, bu konuda çok fazla deneyimi gerektirir.

3. 3. YORULMA DAYANIMININ SAPTANMASI VE GÖSTERİMİ

3. 3. 1. Genel Tanım

Yorulma dayanımı deyiminden düzgün veya çentikli parçalarda, belirli bir ortalama gerilme için parçanın kırılmadan veya belirli bir şekil değiştirmeyi aşmadan sonsuz çevrim sayısında taşıyabileceği gerilme genliği anlaşılır. Müsaade edilebilir şekil değiştirmenin miktarı yorulma deneyinin yapıldığı şartlara (örneğin deney sıcaklığı) veya deney malzemesi cinsine bağlıdır.

Sonsuz sayıda yük tekrarını kırılmadan veya aşırı şekil değişimine uğramadan taşıyabilen bir yapı elemanı, yorulmaya karşı dayanıklıdır denir. Taşınabilir en büyük anma gerilmesi genişliği de yapı elemanının yorulma dayanımı olarak sadece bir malzeme özelliği olmayıp, bunun yanında parçanın büyüklüğü, biçimi ve üretim şekline bağlı olduğundan, anma gerilmesi ile verilen yorulma dayanımı, belirli bir biçim ve yüzey kalitesindeki parçanın konstrüktif dayanımı diye de tanımlanır.

3. 3. 2. Yorulma Dayanımının Saptanması

Malzemelerin yorulma dayanımlarının saptanması için eksene paralel doğrultuda mekanik veya elektrolitik olarak palatılmış düzgün deney parçaları kullanılır. Çentik duyarlılığının araştırılması için de, çentik katsayıları belirli çentikli deney parçalarından yararlanılır. Günümüzde kullanılan yorulma deney makinaları çekme, çekme-basma, çevresel eğme, ileri-geri eğme ve burma yanında bileşik zorlamaları da mümkün kılmaktadır. Bu makinaların deney frekansları, yapılarına bağlı olarak 500...15000 dak.⁻¹ (8...250 Hz) arasındadır. Sözkonusu aralık için çelikten yapılmış düzgün parçaların yorulma dayanımları frekansa bağlı değildir. Ancak hafif metallerde ve çentikli çelik parçalarda yorulma davranışı frekansla değişir ve bu değişim sürekli yorulma durumunda daha fazladır. Deney parçası örneğin asit içermeyen bir yağla soğutulmazsa, ısınma nedeniyle zamanından önce çatlayabilir. Sürekli yorulma zorlamasında frekansın çok düşük veya çok yüksek olması, çeliklerde de düz veya çentikli tüm parçaların yorulma ömürlerinin azalmasına neden olur.

Yorulma dayanımı normal olarak Wöhler yöntemiyle bulunur. Bu yöntemde, malzeme, biçim ve yüzey kalitesi bakımından tümüyle aynı olan deney parçalarının

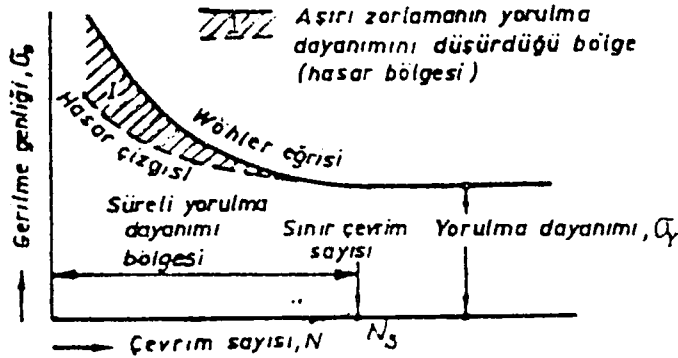
herbiri aralıksız şekilde ve farklı seviyelerde zorlanarak kırılmanın olduğu çevrim sayıları saptanır. Bir deney serisinde çoğunlukla 6...10 adet parça gereklidir. belirli bir deney parçası için başlangıçta ayarlanan yorulma zorlaması deney sırasında değiştirilmez, yani tek kademeli yorulma deneyi sözkonusudur. Buna karşın çok kademeli yorulma deneyinde zorlama sistematik olarak deney sırasında değiştirilir. Her bir zorlama kademesi belirli çevrim sayıları arasında sabit kalır; zorlamaların sırası istenildiği gibi seçilebilir; yani giderek artabilir, azalabilir veya karışık olabilir. Sadece iki zorlama seviyesinin bulunduğu deneyler iki kademeli yorulma deneyi olarak adlandırılır.

Yorulma deneyi zaman zaman durdurulursa, düzgün deney parçalarında toparlanma olayı görülür ve böylece aralıksız olarak yapılan deneyden daha yüksek yorulma dayanımları elde edilir. Çentikli deney parçalarında malzeme bünyesindeki değişik mekanizmalara bağlı böyle bir toparlama olayının etkisi görülmez.

Deneyin amacına, malzeme ve deney makinasına göre yük ve şekil değiştirme genlikleri kontrol edilir ve büyüklükler gerilme veya birim şekil değişimi değerlerine dönüştürülür. Wöhler yönteminde bir deney serisinde tüm parçalar için ortalama gerilme σ_{ort} veya alt gerilme σ_{alt} sabit tutularak her deney için aynı gerilme genliği σ_g seçilir. İlk deney parçası üst gerilme genellikle akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek düzeyde zorlanır. Daha sonraki deney parçalarında ise gittikçe daha düşük zorlama uygulanarak kırılma çevrim sayısının çok yüksek değerlere ulaşması sağlanır. Bir deney serisi sonunda uygulanan gerilme genlikleri ve kırılmanın görüldüğü çevrim sayılarının bir eğri olarak çizimi ile, eğer noktalar büyük dağılmalar göstermiyor ise, Şekil 3-4 'da verilen Wöhler eğrisi* elde edilir. Bu grafikte normal olarak apsis (çevrim sayısı) logaritmik, ordinat (gerilme genliği) ise metrik bölümlü olarak seçilir. Sonsuz çevrim sayısında kırılmanın görülmediği en büyük gerilme genliği yani eğrinin asimptotuna karşılık olan değer yorulma dayanımı olup σ_Y veya τ_Y ile gösterilir. Diğer yandan belirli bir çevrim sayısından sonra (N_S : Sınır çevrim sayısı) eğri sonsuz çevrim sayısına yaklaşıyor kabul edilebilir. Sınır çevrim sayısı oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıklarda çelikler için $10 \cdot 10^6$, ağır ve hafif metaller ile yüksek sıcaklıklarda çelikler için $100 \cdot 10^6$ veya daha fazla olarak alınır. Deney süresinin kısaltılması amacıyla çelik için $2 \cdot 10^6$ ve hafif metaller için $10 \cdot 10^6 \dots 50 \cdot 10^6$ sınır çevrim sayılarında kullanılmaktadır. Bu nedenle σ_Y sembolü yanında sözkonusu

* Ortalama gerilme veya alt gerilmenin herbir değeri için ayrı bir Wöhler eğrisi bulunacağı unutulmamalıdır.

sınır çevrim sayısı da verilmelidir. Örneğin sınır çevrim sayısının 10^6 olması halinde σ_Y (10^6) gibi.*



Şekil 3-4 Wöhler eğrisi ve hasar çizgisi

Yorulma dayanımından daha büyük gerilme genliklerinin bir süre uygulanmasının muhakkak hasara veya diğer bir deyişle yorulma dayanımının azalmasına yolaçağı söylenemez. Önemli olan bu aşırı yüklemelerin seviyesi ve bunlara ait çevrimlerin sayısıdır. Hangi koşullarda hasarın başlayacağını belirten ve görünümü bakımından Wöhler eğrisine benzeyen "Hasar Çizgisi" sürekli yorulma bölgesi için sözkonusu olup yüksek çevrim sayılarında wöhler eğrisi ile birleşir (Şekil 3-4) Hasar çizgisi yorulma dayanımı üzerinde bir zorlamanın, daha sonra aynı dayanımı üzerinde bir zorlamanın, daha sonra aynı parçada yorulma dayanımına eşit bir kaç çevrim sayısı taşıyabileceğini göstermektedir.

Yorulma dayanımını malzemeye bağlı, teknolojik ve deney tekniği ile ilgili çok sayıda faktör etkilediğinden, bu değer normal Wöhler yöntemi yani 6...10 deney parçası yardımıyla güvenilir şekilde bulunabilmesi oldukça güçtür. Wöhler eğrisini dağılma bantının ortalama eğrisi olarak veya yorulma dayanımını belirli bir yüzde olasılıkla verebilmek için çok sayıda deney yapılması ve bunların istatistik olarak değerlendirilmesi zorunludur.[10], [11]. Wöhler eğrisinin dağılımı bantının güvenli olarak saptanabilmesi, [11] 'ye göre en az 40 ve [12] 'ye göre en az 200 deney parçasını gerektirir. Hasar çizgisinin de kesin belirlenebilmesi için çok sayıda deney yapılmalıdır.

Sürekli yorulma ve yorulma dayanımlarını hesaplayabilmek amacıyla Wöhler eğrisi için bazı analitik ifadeler önerilmiştir. [13] Ancak gerçek malzeme davranışlarını

* Wöhler eğrisinin sınır çevrim sayısına kadar olan bölümüne "Sürekli Yorulma Bölgesi" denir. Bu bölgede herhangi bir N_1 çevrim sayısı için kırılmaya neden olacak gerilme genliği de "Sürekli Yorulma Dayanımı" adını taşır ve $\sigma_Y(N_1)$

içermeyen bütün bu ifadeler, yorulma dayanımı ile statik deneylerden elde edilen değerler (örneğin çekme dayanımı) arasında kurulan ampirik bağıntılardan daha iyi sonuç vermezler. İstatistiksel olarak güvenli yorulma dayanımı değerleri elde etmek için "Basamak Yöntemi" olarak adlandırılan yaklaşım kullanılabilir [14], [15], [16]. Bu yöntemde, saptanması istenen büyüklüğün beklenen dağılıma bölgesi-örneğin yorulma dayanımı veya sürekli yorulma bölgesinde belirli bir çevrim sayısına tekabül eden gerilme genliği-basamaklara bölünür. Deneyle beklenen dağılım bölgesinin ortasındaki bir zorlama ile başlar. Deney parçası kırılırsa, bir sonraki deney bir alt basamaklara bölünür. Deneyler beklenen dağılım bölgesinin ortasındaki bir zorlama ile başlar. Deney parçası kırılırsa, bir sonraki deney bir alt basamağın gerilmesine geçilir. Başlangıç deneyi dışında bütün deneylerde uygulanacak gerilme genliği bir önceki deney sonucuna göre seçilir. Gerilme genliği bu şekilde değiştirilerek belirli sayıda deney yapıldıktan sonra sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilir. Bu yönetim üstünlüğü tüm deneylerin hepsinin kendiliğinden ortalama değer etrafında toplanmasıdır. [15]. Bu arada her deney parçası sadece bir kez kullanılır. Sınır çevrim sayısı da dahil olmak üzere, çeşitli çevrim sayılarında dağılım bandının saptanması için en az 40 deney parçası gereklidir. Yöntem çentikli parçalar ve hasar çizgisine de uygulanabilir.

Tablo 3-1 'de çok kullanılan bazı sementasyon çelikleri için düz ve çentikli deney parçalarında saptanan eğme değişken yorulma dayanımı değerleri verilmiştir [17].

Tablo 3-1 Düzgün deney parçalarında sementasyon sertleşmesinin eğme değişken yorulma dayanımına etkisi

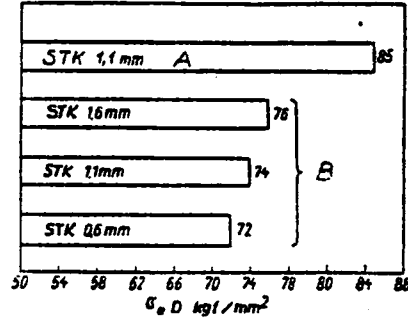
Malzeme	Deney parçası çapı, mm	Eğme değişken yorulma dayanımı, σ_{eD} , kgf/mm ²		Yorulma dayanımındaki artış, %
		A	B	
C 14	6,5	26	49	90
16 MnCr 5	6,5	41	84	105
20 MnCr 5	6,5	55	96	75
18 CrNi 8	5,0	45	91	100
20 MoCr 5	5,0	42	92	120

A- Sementasyonsuz sertleştirilmiş

B- Sementasyonlu sertleştirilmiş

Sementasyon edilmiş makina parçaları veya deney parçalarının yorulma dayanımlarına zorlama ve üretim koşullarının (ısıtma işlemi, sementasyon kalınlığı, sementasyon

tabakasındaki karbon yüzdesi v.b.) etkisi çok önemlidir. Şekil 3-5 'de doğrudan sertleştirilebilir 20 MoCr 5 sementasyon çeliğinde su verme sıcaklığı ve sementasyon kalınlığının eğme değişken yorulma dayanımına etkisi gösterilmiştir. Bu çelikten üretilen makina parçaları yüksek aşınma dayanımları elde etmek için diğer çeliklerden daha yüksek sıcaklıklarda menevişlenebilirler (Yaklaşık 300 °C) ve bu sırada mekanik özelliklerde olumsuz bir değişme görülmez. [18]



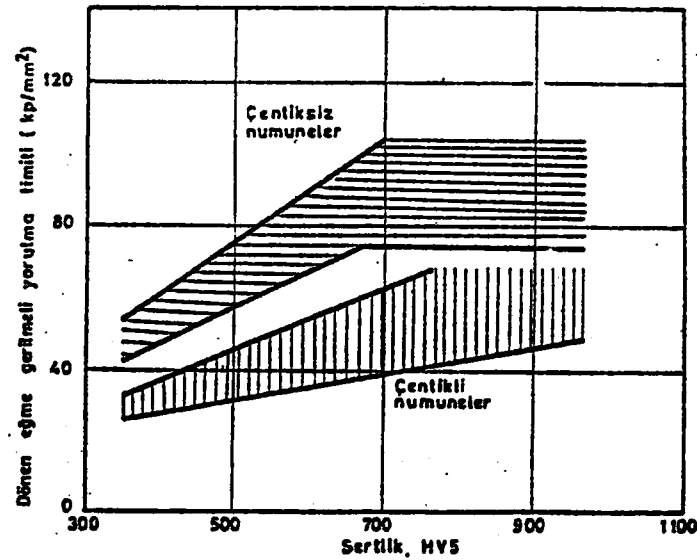
Şekil 3-5 20 MoCr 5 çeliğinden sementasyonla sertleştirilmiş (çentiksiz) deney parçalarında eğme değişken yorulma dayanımının su verme sıcaklığı ve sementasyon tabakası kalınlığı (STK) ile değişimi.

A: Önce soğutup, daha sonra 870 °C 'den sertleştirme

B: Sementasyon sıcaklığı 920 °C 'dan doğrudan sertleştirme

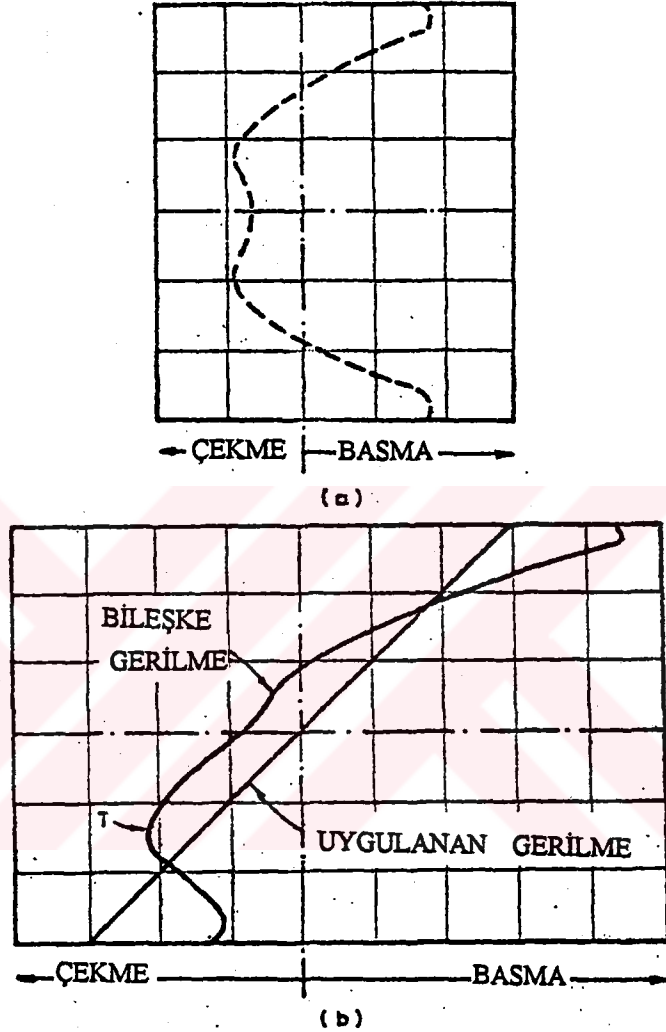
3. 3. 3. Sementasyonla Yüzey Sertleştirilmenin Eğmeli Yorulmaya Etkisi

Sementasyon işlemiyle yüzeyde meydana gelen martenzitik yapı ile artan yüzey sertliği, yorulma mukavemetini artırır(Şekil 3-6).



Şekil 3- 6 Çentikli ve çentiksiz 6 mm çapındaki sementasyon yapılmış deney numunelerinin yorulma mukavemeti üzerine yüzey sertliğinin etkisi [19].

Sementasyondan sonra su verme sırasında ostenit martenzit dönüşümünde hacim büyümesi ve dönüşüm zaman farklılığı sebebiyle yüzeyde basma iç gerilmeleri meydana gelir(Şekil 3-7).



Şekil 3. 7 Sementasyonla yüzey sertleştirmede meydana gelen eksenel artuk gerilme profili [20]

a) Parçada meydana gelen artuk gerilme profili

b) Eğme gerilmesi uygulanmasıyla bileşke gerilmenin profili.

Yüzeyi sementasyonla sertleştirilmiş bir parçaya eğme ile meydana getirilen çekme gerilmeleri uygulanması halinde, yüzeyinde oluşan basınç gerilmeleri dolayısıyla çekme gerilmeleri düşük seviyelerde kalır. Çatlağın başlamasına ve ilerlemesine sebep olan çekme gerilmelerinin azalmasının yorulma mukavemetine faydası açıktır. Artuk gerilme ve uygulanan gerilmenin meydana getirdiği bileşke gerilme eğrisi üzerindeki maksimum çekme değerine sahip tepe noktasının (T) (Şekil 3-7b) çatlağın yüzey altında veya yüzeyde başlaması açısından önemi büyüktür. Tepe noktasının yerine yüzey sertlik derinliği de etki eder. Bu yüzden yüzey sertlik derinliğinin optimizasyonu sözkonusudur.

Yüzeyi sementasyonla sertleştirilen parçalarda sertlik derinliğinin önemi büyüktür. Az bir sertlik derinliği yetersiz olduğu gibi fazla sertlik derinliği de zararlı olabilir. Yüzeyde meydana gelen artık basma gerilmesi uygulama çekme gerilmesinin şiddetini azalttığı ve yüzeyin mukavemetinide artırdığı için sementasyona tabi tutulan parça daha fazla gerilmeyi taşıyabilir. Su verme esnasında karbon oranına bağlı olarak meydana gelen ostenit - martenzit dönüşümü artık gerilmeleri oluşturur. Bu yüzden sementasyon veya sertlik derinliğinin artık gerilme profili üzerine etkisi olacaktır.

Sertleşen kabukla meydana gelen basma kuvveti (F_B), çekirdekteki çekme kuvveti (F_C) ile dengelenir.

Burada ;

σ_B - Artık basma gerilmesi

σ_C - Artık çekme gerilmesi

A_K - Sertleşen kabuğun kesit alanı

A_C - Sertleşmeyen çekirdeğin kesit alanı

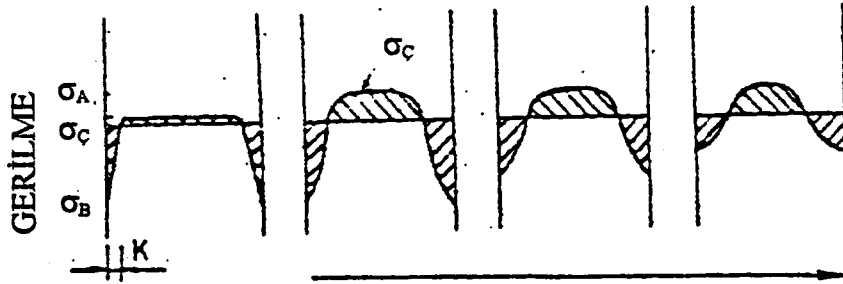
dır. Sertleşen kabuğun kesit alanı (A_K) artarken sertleşmeyen çekirdek kesit alanı azalacağından, eşitliğin bozulmaması için artık çekme gerilmesinin (σ_C) artması gerekir. Çekirdekteki artık çekme gerilmeside çekirdeğin akma gerilmesiyle sınırlı olduğundan, sertlik derinliğinin belli bir değerden fazla artması yüzeydeki artık basma gerilmesini düşürür. Durum Şekil (3-8) 'de şematize edilmiştir.

Sertlik derinliği arttıkça gerilme profili değiştiğinden bileşke gerilmenin tepe noktasının yeri de değişecektir. Yorulma çatlaklarının yüzeyden veya yüzey altından başlaması da tepe noktasının yerine bağlıdır.

Sertleşen kabuk derinliği SU 117008 'e göre yüzeyden itibaren 550 HV sertlik değerindeki bir düzleme kadar olan mesafe olarak tarif edilir.

$$\%SD = \frac{\text{Kabuk derinliği}}{\text{Kesit çapı}}$$

olarak tanımlanır. Farklı sertlik derinlikleri için kabuk ve çekirdek artık gerilmeleri arasındaki ilişki Tablo 3. 2 'de verilmiştir.



Şekil 3-8 Sertleşen kabuk derinliğinin artmasıyla, artan gerilme dağılımının değişimi[21]

σ_A - Kabuk altının akma mukavemeti
 σ_C - Artık çekme gerilmesi
 σ_B - Artık basma gerilmesi
 k - Sertleşen kabuk derinliği.

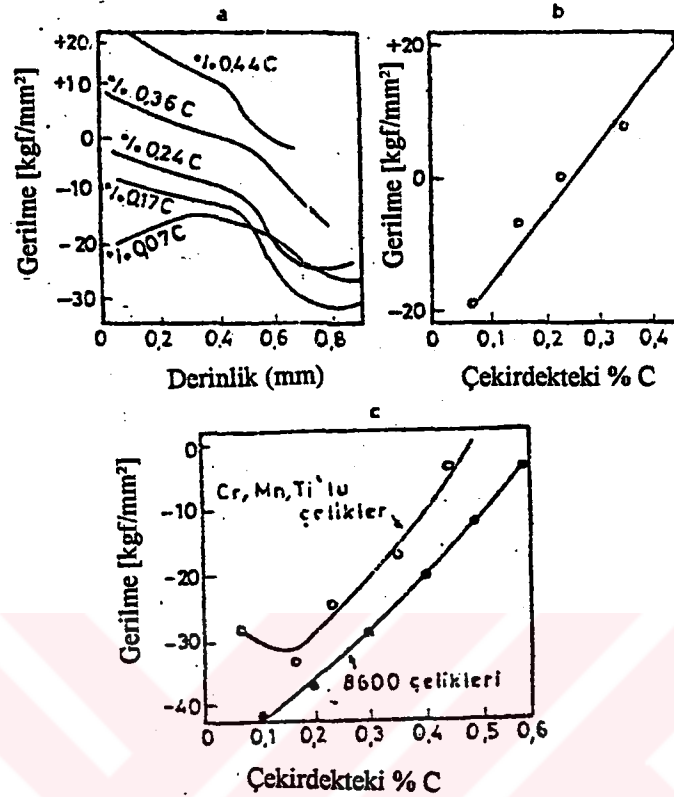
Tablo 3-2 Farklı sertlik derinlikleri için kabuk ve çekirdeğin artık gerilmeleri arasındaki ilişki[21]

Numune Çapı (mm)	Kabuk derinliği (mm)	Sertlik derinliği (%SD)	Yüzeydeki artık basma gerilmesi (kp/mm ²)	Çekirdekdeki artık çekme gerilmesi (kp/mm ²)
38,0	1,78	5	32,4	7,0
19,0	1,52	8	41,6	13,1
6,3	1,25	20	34,0	13,1

Tablodan da görüldüğü gibi, sertlik derinliği % 5 'den % 8 'e çıkarken, çekirdekdeki çekme gerilmesi yaklaşık iki misli olmuş, % 8 'den % 20 'ye çıkışında herhangi bir artış olmamıştır. Bunun sebebi, çekirdek malzemesinin akma gerilmesi ile artık çekme gerilmesi arasındaki ilişkidir.

Çekirdeğin karbon konsantrasyonu, dolayısıyla martenzit miktarı ve sertliği artarken, yüzeydeki basma gerilmesi azalmaktadır (Şekil 3-4). Belli bir çekirdek mukavemetinden sonra yüzeydeki artık gerilme, çekme gerilmesi olur ve yorulma mukavemetini düşürür.

Yorulma mukavemetinin düşmesi düşük karbonlu çeliklerde de görülebilir. Bu düşüş tepe noktasının çekirdek içinde meydana gelmesi yüzünden olabilir. Yapılan deney sonuçları bunu doğrulamaktadır [22].



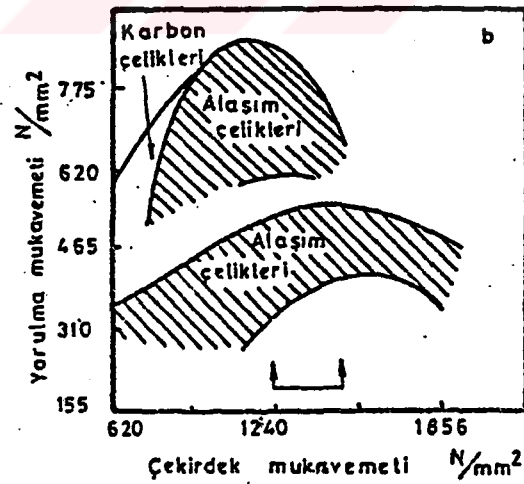
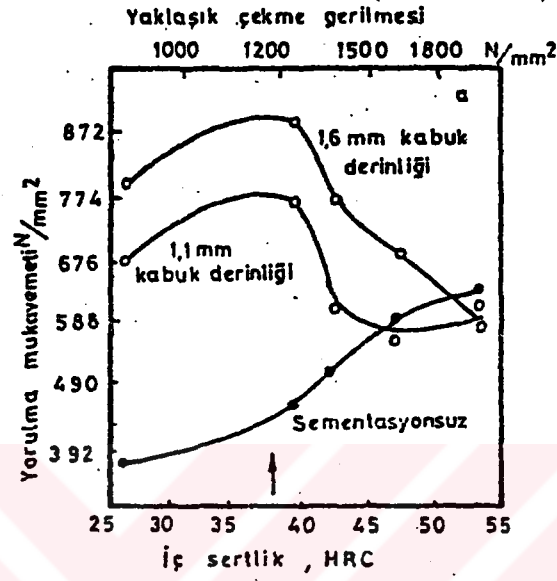
Şekil 3. 9 Çekirdek karbon oranına göre [22]

- a) Artık gerilme profilinin değişimi,
- b) Yüzeydeki basma gerilmesinin değişimi
- c) Bileşke gerilmenin tepe noktasının yerinin değişimi.

Tabii ki çekirdek sertliğinin veya mukavemetinin de artık gerilme ve dolayısıyla yorulma mukavemeti üzerine etkisi olacaktır. (Şekil 1-5). Bazı araştırmacılar optimum çekirdek mukavemetini 30-40 HRC kabul etmişlerdir. [22]

Yüzeyi sementasyonla sertleştirilen parçalarda optimum sertlik derinliği çekirdek mukavemetiyle ilgilidir. Parçaya etki eden bileşke gerilme yüzeyden çekirdeğe doğru değişirken, malzemenin mukavemeti de karbon oranına bağlı olarak değişmektedir. Parçanın herhangi bir noktasına etki eden gerilme, o noktadaki malzemenin mukavemetiyle karşılaşır. Parçanın hangi noktasında, uygulanan gerilme o noktadaki malzemenin mukavemetinden fazla ise çatlak oradan başlar. Şekil 1-6.a 'da ince kabuklu parçaların kabuk-çekirdek iç yüzeyinden hasara uğradıkları görülmektedir. Optimum kabuk derinliğine sahip parça, toplam gerilme altında ömrünü devam ettirir. Fakat ani bir şok, hem çekirdeğe hem de kabuğa zarar verebilir. Üçüncü eğri, aşırı kabuk derinliğini tanımlamaktadır. Burada hasarın (çatlak başlangıcının) çekirdekten daha ziyade yüzeyde oluşması muhtemeldir. Şekil 3-13.b 'de çekirdek mukavemeti

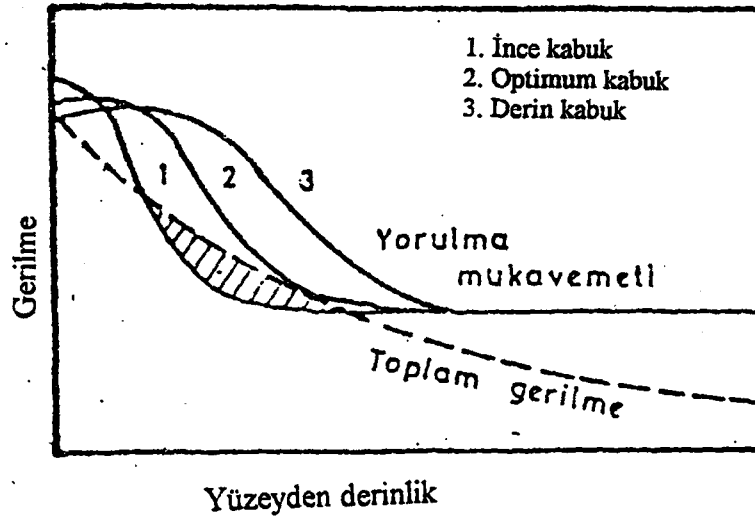
fazla olan çeliklerde, daha az kabuk derinliğinin yeterli olduğu görülmektedir. Optimum sertlik derinliği literatürde % 1,4 ile % 21 arasında verilmektedir.



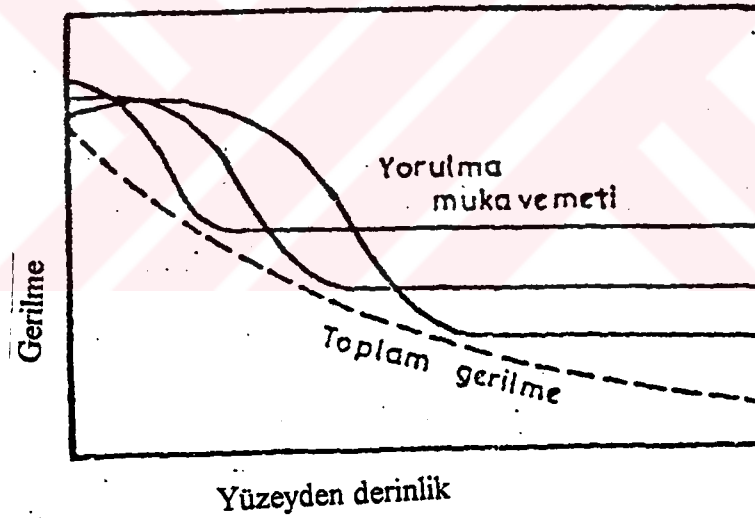
Şekil 3-10 Sementasyon çeliklerinde çekirdek özellikleri ile yorulma mukavemeti arasındaki ilişki[23]

- a) Çekirdek sertliği ile yorulma mukavemeti arasındaki ilişki,
b) Çekirdek mukavemeti ile yorulma mukavemeti arasındaki ilişki.

(a)



(b)



Şekil 3-11 Sementasyonla sertleştirilmiş çeliklerin yorulma mukavemeti ile toplam gerilme arasındaki ilişkinin şematik gösterimi[23]

- Çekirdek mukavemeti değişmeyen numunede kabuk derinliğinin etkisi,
- Çekirdek mukavemetinin artmasıyla kabuk derinliğinin azalması

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4. 1. Numune Hazırlama

Eğmeli yorulma deneyinde yüzey sertleştirmenin eğilme mukavemetine etkisini araştırmak için sanayide yaygın olarak kullanılan dişli çark, aks, mil, kamalı mil, v.b. imalatında kullanılan alaşımlı sementasyon çeliklerinden olan SAE 8620 (DIN 21 NiCrMo2) seçildi. Tablo 4.1’de SAE 8620 ve deney numunesinin kimyasal analizleri verilmiştir.

Tablo 4. 1 Kullanılan numunenin kimyasal kompozisyonu ağırlıkça (%)

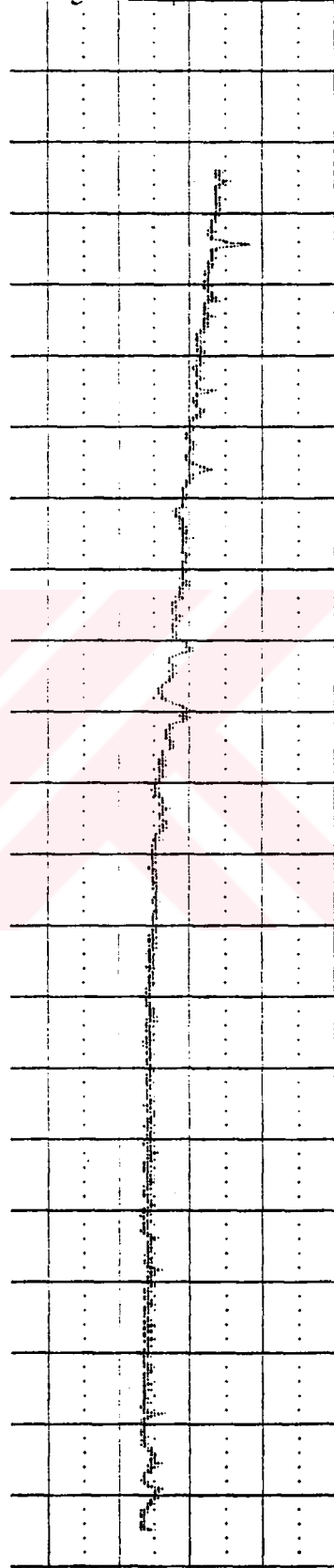
Malzeme Cinsi	C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	Ni
SAE 862	0.16	0.40	0.60	0.15	0.040	0.040	0.15	0.40
	0.24	0.60	0.90	0.35	en çok	en çok	0.35	0.70
Deney numunesi	0,24	0,519	0,698	0,234	0,0277	0,0356	0,226	0,451

Spektral analizi neticesinde kullanılan malzemenin kimyasal bileşiminin SAE 8620 çeliğine ait standartlar aralığında yer aldığı görülmektedir.

Deney numuneleri Asil Çelikte Üretilmiş 22 mm çapındaki çubuklardan soğuk olarak haddelenerek 16 mm çapa getirilmiş çubuklardır. Numunelerin dış kısımlarının sertliği 210 HV, iç kısımlarının sertliği 205 HV olarak ölçülmüştür.

Daha sonra 6m uzunluktaki çubuklardan deney numunelerinin hazırlanması için 212 mm boyda kesilmiştir. Numunelerin ısıtma işlem sonrası çarpılmalarını önlemek için kesilen parçalar 910 °C 'de normalize edilmiştir. Sonra kompüterli nümerik kontrollü (CNC) torna tezgahında kopya tornaya numune hazırlanmıştır. Şekil 4-2 'de görüldüğü gibi DIN 50113'e göre 32 adet numune kopya tornada işlenmiştir. Parça yüzeyleri $R_t = 6,4 \mu\text{m}$, $R_z = 3,8 \mu\text{m}$ olacak şekilde parlatılmıştır. Burada R_t pürüzlülük yüksekliğini R_z ise ortalanan pürüzlülük derinliğini göstermektedir.

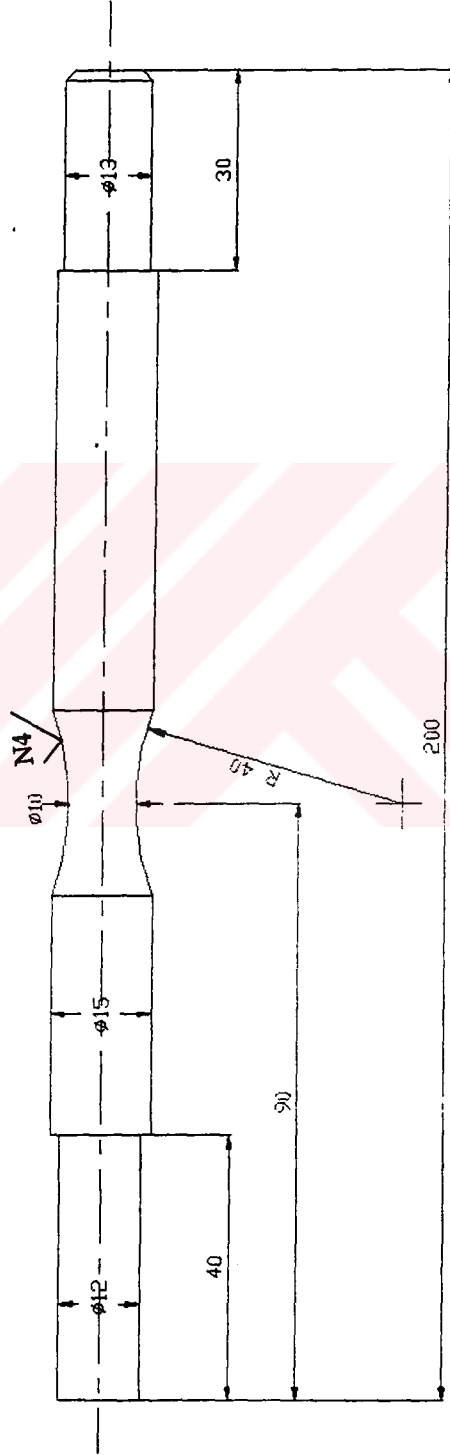
Profil yüksekliğinin durumu



Prüzlülük birim örnek uzunluğu (5 mm)

Şekil 4-1 Deney numunelerinin yüzey pürüzlülüğü grafiği

N4/ (N7)

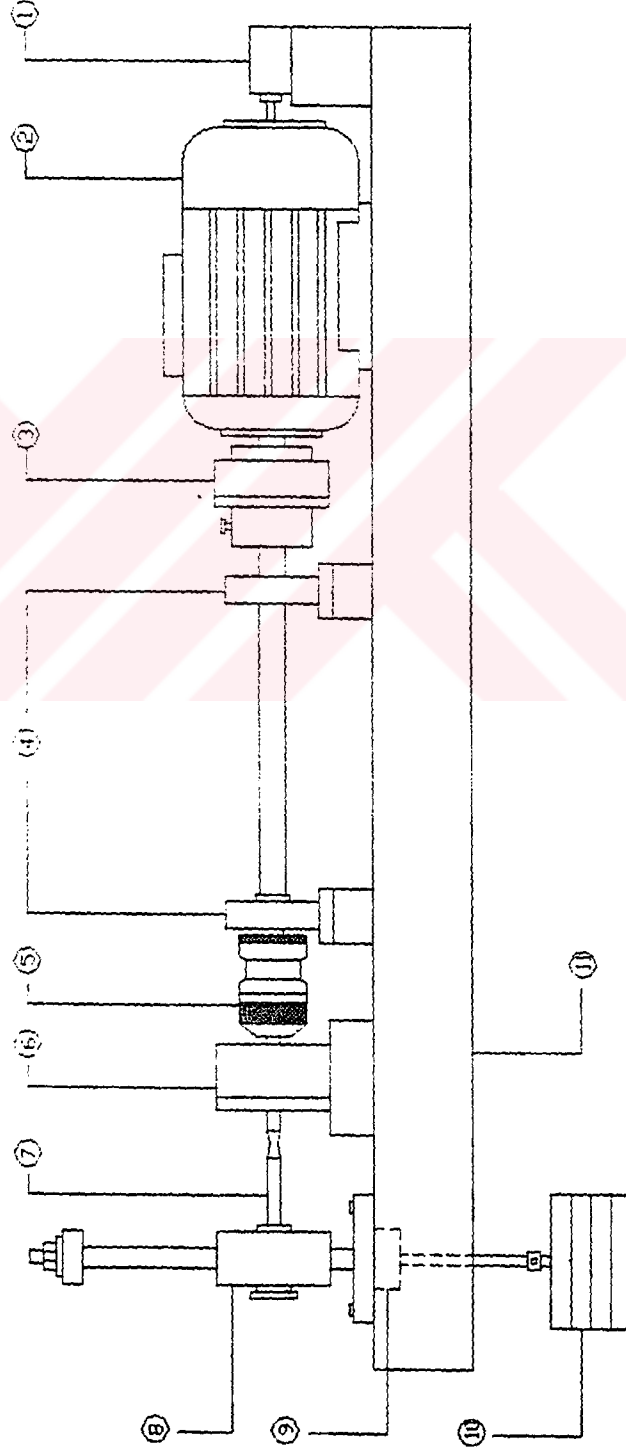


Şekil 4-2 Deney numunesi

Daha sonra numunelere 1 mm yüzey sertleştirme derinliği için 1 saat 300 - 400 °C ön ısıtma yapılmıştır. 890 - 910 °C sıcaklıkta % 10 KCN 'lü sementasyon banyosunda her grupta 8 numune olmak üzere gruplara 2.5, 5 ve 7.5 saatlik bekleme süresi verilmiştir. Numunelere yağda su verilmiştir. Sertleştirme sonrası numunelerdeki gerilmeleri gidermek için 180 - 190 °C sıcaklıkta 1 saat menevişleme yapılmıştır. Yüzey sertliği markası OFICINE GALILEO MICROSCAN, teknik özelliği 10 gr ile 5 kg arasındaki düşük ağırlıklarda baskı uygulayarak Vickers metodu ile ölçüm yapabilen sertlik ölçme cihazında ölçülmüştür. Her grup numuneden 3 'er tanesine her bir numuneye 3 'er adet ölçüm yapılmış ve yüzey sertliği 733 HV olarak ölçülmüştür. 2.5 saat bekletilen numunelerde 0.5 mm, 5 saat bekletilenlerde 1 mm, 7.5 saat bekletilenlerde 1.5 mm sementasyon derinliği elde edilmiştir.

Şekil 4 -3 'de eğme gerilmeli yorulma cihazı görülmektedir. Cihaz 1,1 kW gücünde 2815 devir/dakika kapasiteye sahiptir. Bu cihaz numunelerin mukavemetleri ve boyutları da dikkate alınarak özel olarak dizayn edilmiştir. Herbir deney numunesi deney cihazına bağlandıktan sonra, cihaz kırılma gerçekleşinceye kadar aralıksız olarak çalıştırılmıştır (Aksi halde numunelerin toparlanması söz konusu olurdu). Deney esnasında numunelerin kırılmasıyla cihaz otomatik olarak durduğundan; yorulma cihazı sayacından dönme sayısı hassas olarak belirlenmiştir.

- | | |
|----------------------------|--------------------|
| 1- Devir Sayacı | 7- Deney Çubuğu |
| 2- Elektrik Motoru | 8- Hareketli Yatak |
| 3- Kaplin | 9- Devre Kaskı |
| 4- Mil Yatakları | 10- Ağırlık |
| 5- Mandren | 11- Gövde |
| 6- Çift Sıra Bilyalı Yatak | |



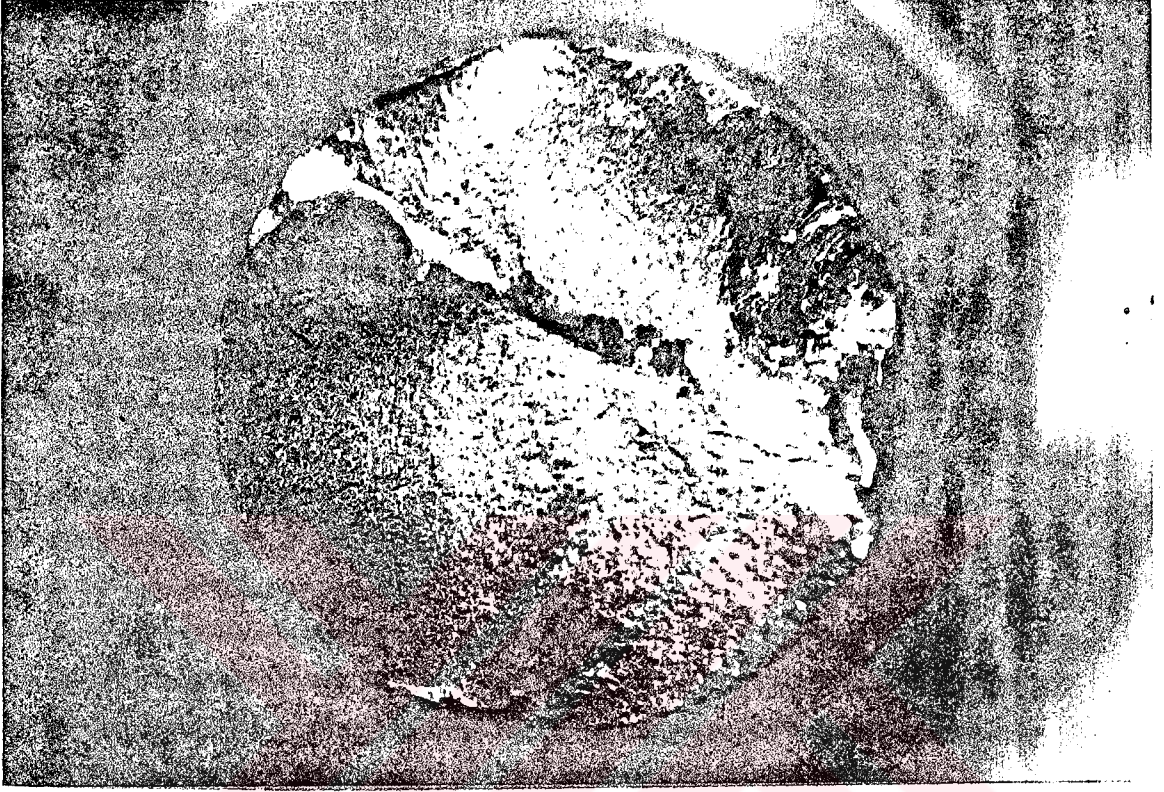
Şekil 4-3 Eğmeli yorulma deney cihazının şematik görünüşü

4. 2. Yorulma Deneyi

DIN 50113'e göre hazırlanan numuneler dönen eğme gerilmeli yorulma cihazında yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin sadece sertlik derinliklerinin mukayesesi yapılacağından yorulma mukavemeti için $N = 10^6$ devir sayısı seçilmiştir. $N \geq 10^6$ olduğu takdirde numuneler sonsuz ömürlü kabul edilebilirler. Yorulma mukavemetleri basamak metoduyla belirlenmiştir. Yani deney cihazına bağlanan yükün değeri deneyin verdiği sonuçlara bağlı olarak $N \geq 10^6$ olacak şekilde değiştirilmiş numunelerin sürekli mukavemetleri belirlenmiştir. Yorulma deney sonuçları her bir grup için tablo olarak gösterilmiştir. Her bir grupta bir numune için yorulma yüzey fotoğrafı X9 büyütme ile çekilmiştir. Aynı numunenin kırılan diğer yüzeyi ise bakalite alınarak parlatılmıştır. Parlatılan yüzey % 2 'lik Nital ile dağlanarak X13,97 büyütülmüş ve fotoğrafı çekilmiştir. Böylece, kırılan numunelerin sementasyon derinlikleri de görülebilmektedir (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5). Tablo 4.2'de ısıtma işlem görmemiş numunelerin devir sayısına bağlı olarak eğilmeli yorulma mukavemeti verilmiştir.

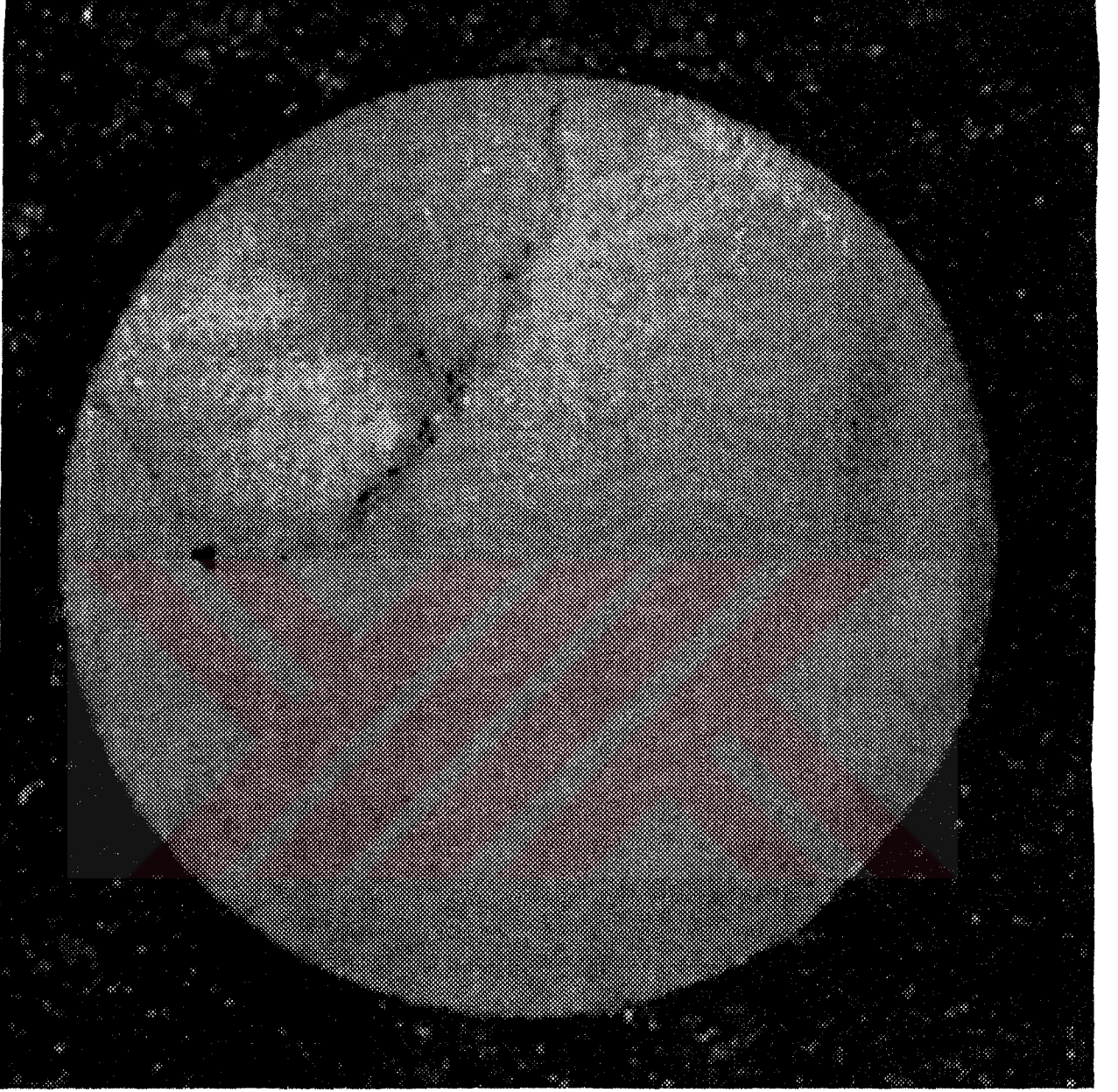
Tablo 4. 2 Isıl işlem görmeyen numunelerin yorulma deney sonuçları

$\sigma_{eğ}$ (N/mm ²)	670.052	384.650	345.233	326.241	310.094	287.776
N (Devir)	415	56828	198458	274980	1011750	1034150



Şekil 4-4 Isıl işlem görmeyen $\sigma_{eg} = 326.241 \text{ N/mm}^2$, $N = 274980$ devirde kopmuş numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafı

Şekil 4-4’de görüldüğü gibi yorulma dış cidardan üç noktada başlamıştır. Daha sonra üst kenardaki yorulma çatlakları birbirleri ile birleşmiş alt kısımdaki yorulma çatlığında merkeze doğru ilerleyince azalan kesitte yarı statik bir kopma meydana gelmiştir.



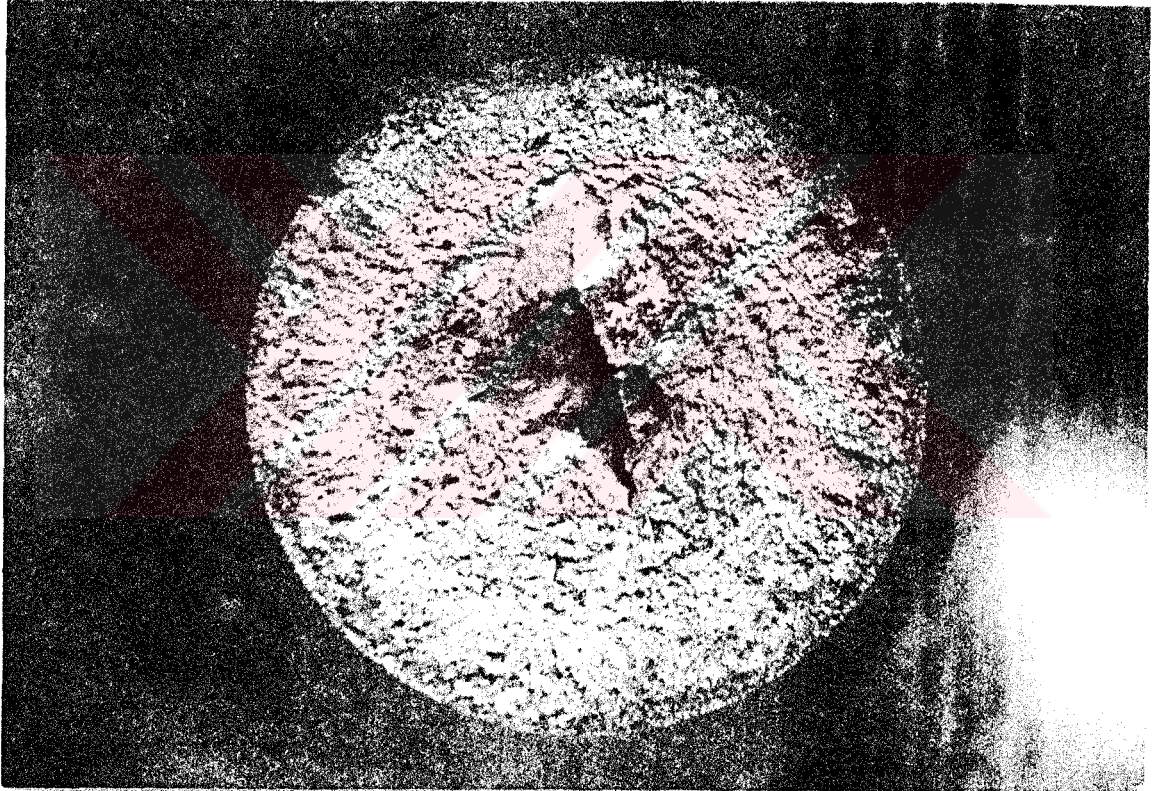
Şekil 4-5 Isıl işlem görmeyen $\sigma_{eg} = 326.241 \text{ N/mm}^2$, $N = 274980$ devirde kopan numunenin Parlatılmış % 2 lik Nital ile dağlanmış X13,97 büyütülmüş fotoğrafı

Şekil 4-5’de ısıt işlem görmemiş numunenin kesitinde herhangi bir sertleşme tabakası görülmemektedir. Bu numunenin yorulma deneyi sonunda kırılma yüzeyinde bölgesel bir değişme olduğu görülmektedir.

Tablo 4-3'de 0.5 mm sementasyon derinliğine sahip numunelerin devir sayısına bağlı olarak eğilmeli yorulma mukavemetleri verilmiştir. Şekil 4-6 ve Şekil 4-7'de ise, 0.5 mm sementasyon derinliğine sahip bir numunenin yorulma yüzeyi ile sementasyon derinliğinin fotoğrafları verilmiştir.

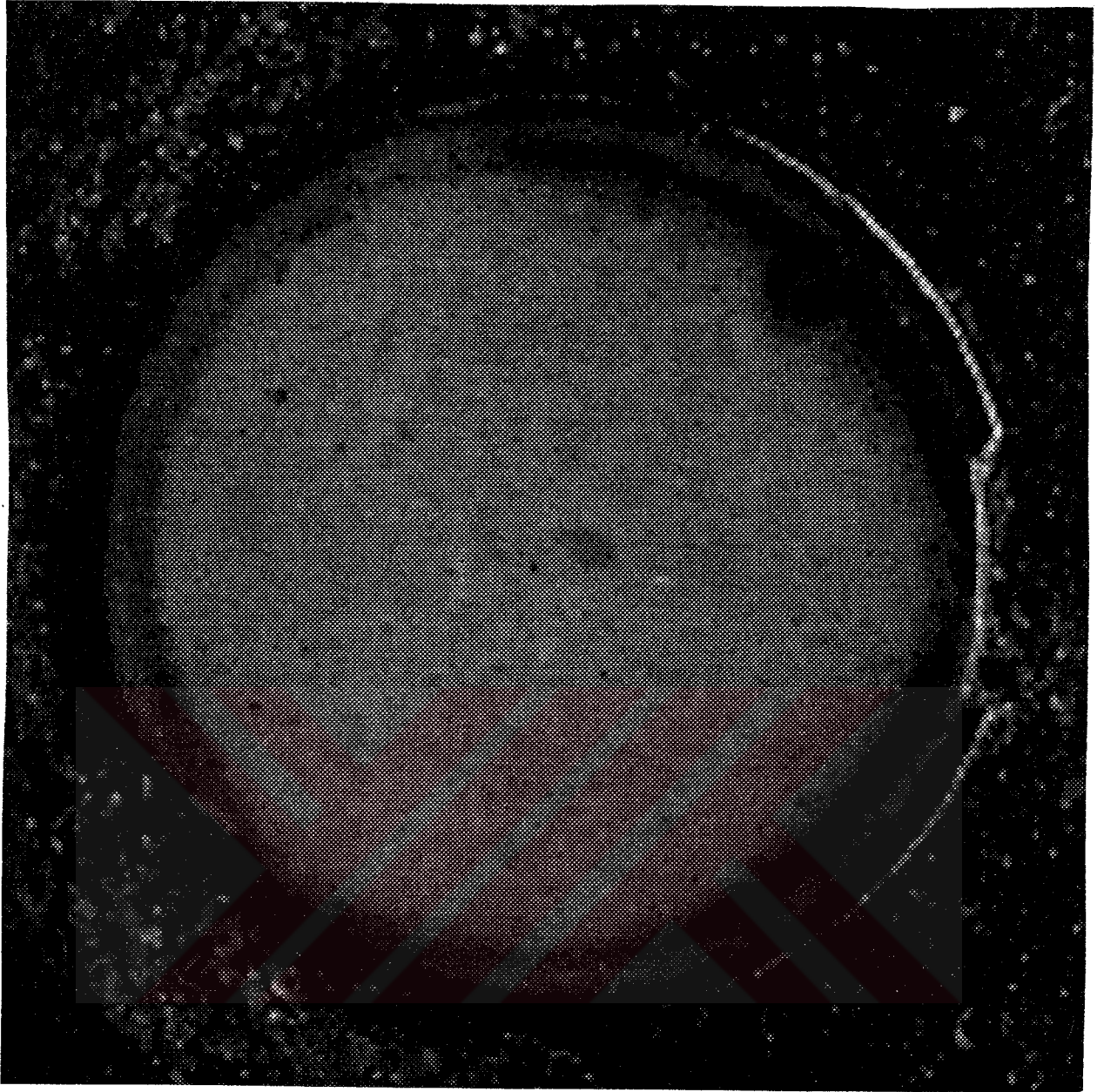
Tablo 4-3 0.5 mm sementasyon derinliğine sahip numunelerin yorulma deney sonuçları

$\sigma_{eğ}$ (N/mm ²)	1440.588	1343.234	1287.013	1218.156	835.880
N (Devir)	7218	6110	1225	43950	1001570



Şekil 4-6 0.5 mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eğ} = 1287.013 \text{ N/mm}^2$, N= 1225 devirde kopan numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafı

Şekil 4-6'de yorulma merkeze yakın bir yerde başlamış, yorulma çatlağı kesitte yük taşıyamayacak kadar yayılınca yükün büyüklüğü nedeni ile iç kısımlarda sünek bir kopma meydana gelmiştir.



Şekil 4-7 0.5 mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eg} = 1287.013 \text{ N/mm}^2$, $N = 1225$ devirde kopan numunenin parlatılmış % 2 'Nital ile dağlanmış X13,97 büyütülmüş fotoğrafı

Şekil 4-7'de görüldüğü gibi parçanın dış kısmı karbon miktarı fazla olduğundan koyu renkli olarak görülmektedir.

Tablo 4-4'de, 1mm sementasyon derinliğine sahip numunelerin devir sayısına bağlı olarak eğilmeli yorulma mukavemetleri verilmiştir. Şekil 4-8 ve Şekil 4-9'da da 1 mm sementasyon derinliğine sahip bir numunenin yorulma yüzeyi ve sementasyon derinliği fotoğrafları verilmiştir.

Tablo 4-4 1 mm sementasyon derinliğine sahip numunelerin yorulma deney sonuçları

$\sigma_{eğ}$ (N/mm ²)	1440.588	1343.243	1287.013	1218.156	1147.397	1045.294
N (Devir)	924	5500	11695	20270	380920	1000000



Şekil 4-8 1mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eğ} = 1287.013 \text{ N/mm}^2$, $N = 11695$ devirde kopan numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafı

Şekil 4-8’de yorulma numunenin dış cidarında başlamış ve merkeze doğru yayılmıştır. Kesit yükü taşıyamayacak kadar küçülünce sünek olan iç kısım kopmadan önce yükün etkisi ile bir miktar plastik şekil değiştirerek uzamış ve kopan yüzeylerde iki küçük tepecik oluşturmuştur.



Şekil 4-9 1mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eğ} = 1287.013 \text{ N/mm}^2$, $N = 11695$ devirde kopan numunenin parlatılmış % 2 'lik Nital ile dağlanmış X13,97 büyütülmüş fotoğrafı

Şekil 4-9'da parçanın dış cidarındaki koyu renkli kısım sementasyon derinliğini göstermektedir. Ayrıca, çatlak ve oyuk olan kısımlarda koyu renkli olarak görülmüştür.

Tablo 4-5'de 1.5 mm sementasyon derinliğine sahip numunelerin devir sayısına bağlı olarak eğilmeli yorulma mukavemetleri verilmiştir. Şekil 4-10 ve Şekil 4-11'de de 1.5 mm sementasyon derinliğine sahip bir numunenin yorulma yüzeyi ve sementasyon derinliği fotoğrafları verilmiştir.

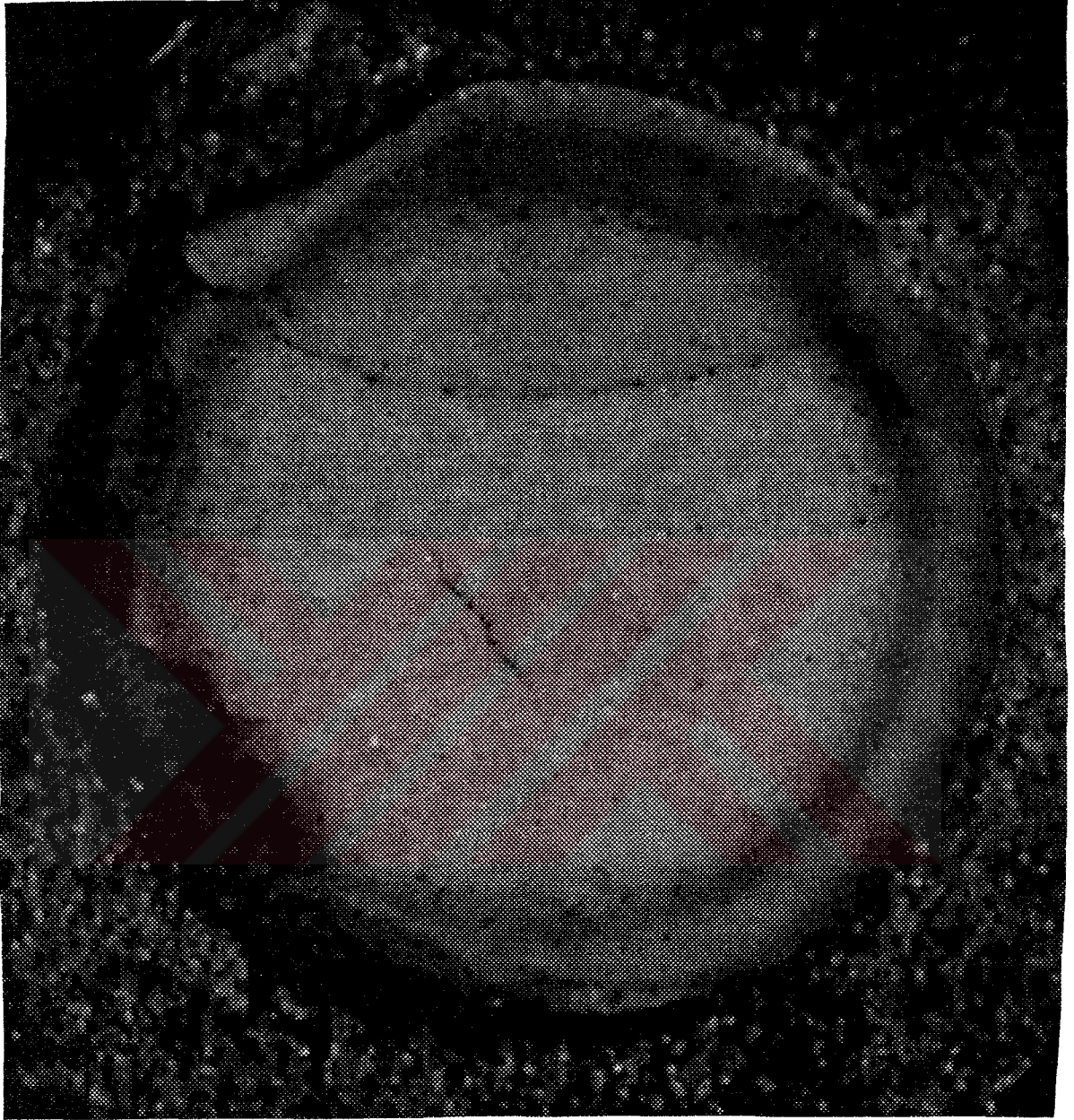
Tablo 4-5 1.5 mm sementasyon derinliğine sahip numunelerin yorulma deney sonuçları

$\sigma_{eğ}$ (N/mm ²)	1440.588	1343.234	1287.013	1218.156	1147.397	1100.289
N (Devir)	2909	10518	76578	67299	670601	1000150



Şekil 4-10 1.5 mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eğ} = 1218.156 \text{ N/mm}^2$, $N = 67299$ devirde kopan numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafı

Şekil 4-10'da yorulma en fazla sol cidardan başlamış daha sonra cidardan içe doğru bazı bölgelerde bölgesel deformasyon meydana gelmiştir. Kesit yükü taşıyamayacak büyüklüğe geldiğinde iç kısmın sünek olması nedeni ile Şekil 4-8'deki gibi kesitin iç kısmında plastik şekil değişimi meydana gelmiş, yüzeyde tepcik ve kratercikler oluşmuştur.



Şekil 4-11 1.5 mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eg} = 1218.156 \text{ N/mm}^2$, $N = 67299$ devirde kopan numunenin parlatılmış % 2 'lik Nital ile dağlanmış X13,97 büyütülmüş fotoğrafı

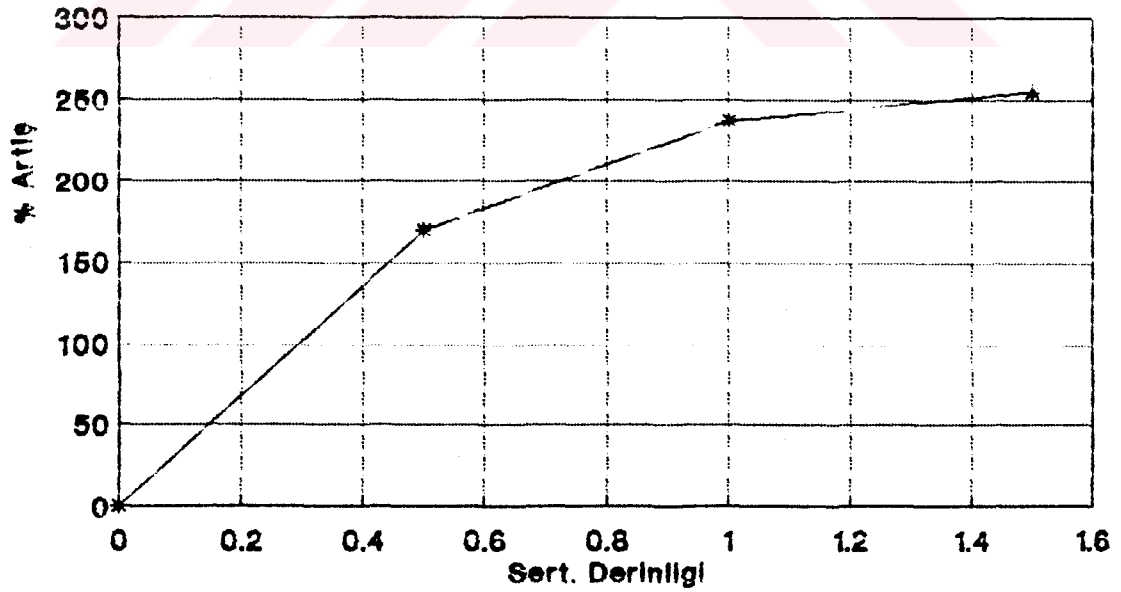
Şekil 4-11'de numunenin dış cidarındaki koyu renkli kısım sementasyon derinliğini göstermektedir. Çatlak ve oyuk olan yerler koyu renkli olarak görülmektedir.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

SAE 8620 türü yüksek mukavemetli sementasyon çeliği numuneler 0.5 , 1 ve 1.5 mm sementasyon derinliği elde edilecek şekilde sementasyon işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan numuneler 10^6 çevrim sayısı esas alınarak yorulmaya maruz bırakılmışlardır. Sertleşme derinliği ile yorulma mukavemeti değişimleri Tablo 5-1 ve Şekil 5-1'de gösterilmiştir.

Tablo 5-1 Yorulma dayanımının sertlik derinliği ile değişimi

Sert. Der.	$\sigma_y(N/mm^2)$	% Artış
0	310.094	-
0,5	835.880	169,557
1	1045.294	237,089
1,5	1100.289	254,824



Şekil 5-1 Sertleşme derinliğine bağlı olarak yorulma dayanımının değişimi

Yapılan deneyler sonunda aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur;

- 1- Krank milleri, kam milleri, kamalı miller, dişli çarklar, saplamalar, kavrama parçaları, zincir baklaları gibi makina elemanları yüzey sertleştirme işlemleri yapıldıktan sonra, yorulmaya maruz bölgelerde kullanılmaktadırlar.
- 2- Eğilme momentine tabi tutulan parçaların yüzeyinde meydana gelen çekme gerilmesi, yüzey sertleştirmeden meydana gelen basma gerilmesi sonucunda azalmıştır.
- 3- Sadece çekme gerilmesinin çentik ilerlemesine yol açtığı bilindiğinden ; kesitin karşı kenarındaki basma gerilmesindeki artış yorulma ömrünü olumsuz yönde etkilememiştir.
- 4- Yüzey sertleştirme işlemi yapılan numunelerde sertleşme derinliği arttıkça, yorulma dayanımlarında % 254.8'e varan artış elde edilmiştir.



BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Krank milleri, kam milleri, kamalı miller, dişli çarklar, saplamalar, kavrama parçaları, zincir baklaları gibi makina elemanları dinamik yüklere maruz kaldıklarından yorulmaya uğramaktadırlar. Bu makina elemanlarının mukavemetlerinin artırılması yorulma dayanımını da arttıracığı bilinmektedir.

Yüzey sertleştirme işlemlerinden sementasyon işlemi ile numune yüzeyinde çekme gerilmesinde artış meydana gelmekte, dolayısıyla yorulma direncide artmaktadır. Sertleşme derinliğinin artırılması ile yorulma dayanımı daha fazla artmaktadır.

Bundan sonraki çalışmalarda daha fazla sertleşme derinliği elde edilerek yorulma dayanımındaki değişimler araştırılabilir. Ayrıca aşağıdaki maddelerin araştırılması da bir sonraki projede faydalı olabilir:

- a) Yüzeylerdeki artık gerilmelerin X-ışınları deneyi ile tesbiti.
- b) Deney numunelerinin kırıldıktan sonra kırılma yüzeylerinin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile çeşitli açılardan incelenerek kırılma tipinin tayini .
- c) Optik mikroskop ve SEM deney teknikleri ile numunelerin çeşitli şartlarda mikroyapılarının incelenmesi ve spektral analizi.
- d) Numunelerin farklı derinliklerde sertleştirilmesi ve yorulma dayanımındaki değişikliklerin incelenerek Wöhler eğrilerinin ayrıntılı olarak çıkarılması
- e) Numunelerin yzeylerinin nitrürasyon, alev ve indüksiyonla sertleşme, borlama gibi usullerle sertleştirilmesi ve sementasyonla yüzeyleri sertleştirilen numunelerin yorulma dayanımı değerleri ile mukayese edilmesi.

KAYNAKLAR

- [1] TAUSCHER, H., "Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı; Malzeme Davranışı, Biçim Etkisi ve Hesaplama Yöntemleri" (Tercüme), MBEAE Matbaası, Gebze, 1983
- [2] PARRISH, G., "Influence of Microstructure on the Properties of Case-Carburized Components. IV- Retained Austenite", Heat Treat. Met., 1976, 3(4), 101-109.
- [3] ERYÜREK, B., Hasar Analizi, İ.T.Ü. Makina Fakültesi, 1993
- [4] TOPBAŞ, M. A., Isıl İşlemler, Yıldız, 1993
- [5] Asil Çelik Teknik Yayınları Cilt. 5, 1985
- [6] ARAN, A., Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı, Tübitak, MBEAE Matbaası, Gebze, 1983.
- [7] HEMPEL, M. ve E. HOUDREMONT: Stahl u. Eisen (1953) s. 1503 ...1511
- [8] MÜLLER, P. ve E. MACHERAUCH: Archiv f. Eisenhüttenwesen (1949), s. 205...210
- [9] DITTSCHLAG, H. ve H. TAUSCHER: Maschinenbautechnik (1955), s. 303...311
- [10] BÜHLER, H., ve W. SCHREIBER: Archiv f. Eisenhüttenwesen (1956), s. 201...209
- [11] TGL 19336.

- [12] EPREMIAN, E., ve R. F. MEHL: Nat. Advis. Comm. Aeron., Techn. Note 2719, (1952).
- [13] WIRTHGEN, G.: IfL-Mitt. (1963), s. 74...81.
- [14] BÜHLER, H., ve W. SCHREIBER: Archiv f. Eisenhüttenwesen (1957), s. 153...156.
- [15] BÜHLER, H., ve W. SCHREIBER: Das Industrieblatt (1958), s. 69...73.
- [16] RANSOM, I. T., ve R. F. MEHL: Amer. Soc. Test. Mater. Nr. 137 (1953), s. 3...24.
- [17] TAUSCHER, H., ve E. STECHER: Maschinenbautechnik (1962), s. 37...44.
- [18] TAUSCHER, H., ve H. FLEISCHER: Maschinenbautechnik (1963) s. 40...43.
- [19] DIETHER, G. E., Mechanical Metallurgia, McGraw Hill Book Co. Inc., New York, 1976
- [20] ALMEN, I. O., "Peened Surface Improve Endurance of Machine Parts", Metal Progress, 43, Feb. 1943, 209-215.
- [21] LUTHER, R. G., WILLIAMS, T. R. G., "Influence of Surface Reinforcement on the Fatigue Strengthen of Low Carbon Steel", Metallurgia and Metal Forming, March 1974, 41(3), 72-77.
- [22] LOVE, R. J., "The Influence of Surface Condition on The Fatigue Strength of Steel", Inst. of Metals, 1952, 161-196.
- [23] PARRISH, G., "The Influence of Microstructure on the Properties of Case-Carburised Components. VI-Core Properties and Case Depth", Heat Treat. Met., 1977, 4(2), 45-54.

ÖZGEÇMİŞ

Hüzeyin ÖZKAYA 1959 yılında Aydın 'da doğdu. İlkokul, ortaokul öğrenimini Aydın 'da Lise öğrenimini İzmir 'de tamamladıktan sonra 1976 yılında Uludağ Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği bölümünde Üniveriste öğrenimine başladı. Buradan 1981 yılında Makina Mühendisi olarak mezun oldu. 1994 Şubat döneminde SA.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü 'nde Yüksek Lisansa başladı. Evli ve üç çocuk babası olup halen SA.Ü. Meslek Yüksek Okulunda Öğretim Görevlisi olarak görevine devam etmektedir.

