

67029

T. C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

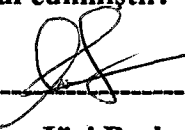
SAE 8620 ÇELİĞİNDE
GAZ SEMANTASYON YÜZEY SERTLİK DERİNLİĞİNİN
EĞMELİ YORULMA MUKAVEMETİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zir. Müh. H. Emin SÖNMEZ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : KONSTRÜKSİYON

Bu tez .. / .. / 19.. tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Jüri Başkanı

Yrd. Doç. Dr. Fehim FİNDIK


Jüri Üyesi

Doç. Dr. Ahmet DÖĞÜR


Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Cuno BİNDAL

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans ve doktora çalışmalarının amacı yapılan araştırmalar ve çalışmaları endüstriyel alanda hayata geçirebilmektir. Yapılan bu çalışma, sanayide yaygın olarak kullanılan 8620 türü yüksek mukavemetli sementasyon çeliğinin pratik olarak yapılan ısıtıl işlem sonucuna bağlı olarak yorulma dayanımının belirlenmesini konu almaktadır.

Bu çalışmanın yapılmasında benden desteğini esirgemeyen Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Fehim FINDIK 'a, çalışmalarına büyük ölçüde katkıda bulunan sayın Arş. Gör. Kenan GENEL 'e teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca bana talaşlı imalat konusunda her türlü imkanı sağlayan T.Z.D.K. Müessese Müdürlüğüne ve Isıl İşlem konusunda yardımlarını esirgemeyen NİL ISIL İŞLEM A.Ş. 'e teşekkür ederim.

Hacı Emin SÖNMEZ

Adapazarı 1996

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ	VII
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİ	6
2. 1. Sementasyon Çeliğinin Tanımı ve Özellikleri	6
2. 2. Sementasyon İşlemi	10
2. 3. Sementasyon Metodları	13
2. 3. 1. Kutu Sementasyonu	13
2. 3. 2. Tuz Banyosunda Sementasyon	15
2. 3. 3. Gaz Sementasyonu	16
2. 3. 3. 1. Gaz Sementasyonunda Sıcaklığın Etkisi	16
2. 3. 3. 2. Gaz Sementasyonunda Zamanın Etkisi	17
2. 3. 3. 3. Gaz Sementasyonunda Atmosferin Kontrolu	19
2. 4. Difüzyon (Yayınma) Olayı	22
2. 4. 1. Difüzyonun Şekli	22
2. 4. 2. Makroskobik Difüzyon Akışı	22
2. 5. Homojenleştirme Tavlama	26
2. 6. Sertleştirme Yöntemleri	27
2. 6. 1. Direkt Sertleştirme	28
2. 6. 2. Basit Sertleştirme	28
2. 6. 3. Ara Tavından Sonra Basit Sertleştirme	29
2. 6. 4. İzotermik Dönüşümden Sonra Basit Sertleştirme	29
2. 6. 5. Çift Sertleştirme	30
2. 7. Menevişleme	30
2. 8. Sementasyon Derinliğine, Yüzey Sertliğine ve Çekirdek Sertliğine Tesir Eden Faktörler	30
2. 8. 1. Sementasyon Derinliği	31
2. 8. 2. Yüzey Sertliği	34
2. 8. 3. Çekirdek Sertliği	35

BÖLÜM 3. YORULMA DAYANIMI	36
3. 1. Genel	36
3. 2. Yorulma Kırılması	36
3. 2. 1. Yorulma Kırılmasına Neden Olan Etkenler	37
3. 2. 1. 1. Dış Etkenler	38
3. 2. 1. 2. İç Etkenler	38
3. 3. Yorulma Çatlakları ve Oluşumu	39
3. 3. 1. Yorulma Çatlaklarının Görünümü	41
3. 3. 2. Eğme Sonucu Oluşan Yorulma Çatlakları	41
3. 4. Çeliklerin Yorulma Dayanımları	44
3. 4. 1. Çeliklerin Yorulma Dayanımının Belirlenmesi	44
3. 4. 2. Çeliklerin Yorulma Ömrü	46
BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	48
4. 1. Deneyisel Çalışmada Kullanılan Malzemeler	48
4. 2. Numune Hazırlama	48
4. 3. Yorulma Deneyinin Yapılması	50
BÖLÜM 5. SONUÇLAR	58
BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	63

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. Demir - Karbon denge Diyagramı	11
Şekil 2. 2. Gaz Karbürizasyon fırını	19
Şekil 2. 3. Nem miktarı ile yoğunlaşma sıcaklığı arasındaki ilişki	20
Şekil 2. 4. Yoğunlaşma sıcaklığının karbon konsantrasyonuna etkisi	20
Şekil 2. 5. Sementasyon sıcaklığının karbon konsantrasyonuna etkisi	21
Şekil 2. 6. Metallerde kendi kendine difüzyon.	22
Şekil 2. 7. Homojenleştirme tavlamaıyla konsantrasyon değişiminin dengelenmesi	27
Şekil 2. 8. Direkt sertleştirme	28
Şekil 2. 9. Basit sertleştirme	28
Şekil 2. 10. Basit sertleştirme (Ara tavlama sonrası)	29
Şekil 2. 11. Basit sertleştirme (İzotermik dönüşümden sonra)	29
Şekil 2. 12. Çift sertleştirme	30
Şekil 2. 13. Sementasyon derinliğine bağlı olarak sertlik değişim eğrisi	31
Şekil 2. 14. Suda basit sertleştirme ile elde edilen yüzey sertlik değişim eğrileri	33
Şekil 2. 15. Yağda basit sertleştirilmesi ile elde edilen yüzey sertlik değişimi eğrileri.	34
Şekil 3. 1. Yorulma ömrünün safhaları	36
Şekil 3. 2. Yorulma yüzeyindeki bölgeler	40
Şekil 3. 3. Dönen parçaların eğilmesi sonucu oluşan yorulma kırıkları	42
Şekil 3. 4. Çeşitli tipte eğme yorulmasından oluşan farklı yorulma kırılmalarının gösterilişi	43
Şekil 3. 5. Dönel bir şaftta yorulma kırılması I	43
Şekil 3. 6. Wöhler eğrisi ve hasar çizgisi	45
Şekil 4. 1. Yorulma Deney Numunesi	49
Şekil 4. 2. I. grup numunelerin sementasyon işleminin şematik diyagramı	49
Şekil 4. 3. II. grup numunelerin sementasyon işleminin şematik diyagramı	50
Şekil 4. 4. Eğmeli yorulma deney cihazının şematik görünüşü	51
Şekil 4. 5. Isıl işlem görmeyen $\sigma_{eg} = 326,241 \text{ N/mm}^2$, $N = 274980$ devirde kopmuş numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafı	52

Şekil 4. 6. 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	53
Şekil 4. 7. 0,68 mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eg} = 1147,377 \text{ N/mm}^2$, $N = 26965$ devirde kopan numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafı	54
Şekil 4. 8. 0,68 mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eg} = 1147,377 \text{ N/mm}^2$, $N = 26965$ devirde kopan numunenin parlatılmış, % 2 'lik Nital ile dağlanmış X13,97 büyütülmüş fotoğrafı	55
Şekil 4. 9. 0,78 mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eg} = 1147,377 \text{ N/mm}^2$, $N = 217002$ devirde kopan numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafı	56
Şekil 4. 10. 0,78 mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eg} = 1147,377 \text{ N/mm}^2$, $N = 217002$ devirde kopan numunenin parlatılmış, % 2 'lik Nital ile dağlanmış X13,97 büyütülmüş fotoğrafı	57
Şekil 5. 1. Sertlik derinliğine bağlı olarak yorulma dayanımındaki artış	58

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2. 1. Sementasyon çeliklerinin mekanik özellikleri	7
Tablo 2. 2. Sementasyon çeliklerinin çeşitli standartlardaki karşılıkları	8
Tablo 2. 3. Sementasyon çeliklerinin sınıflandırılması	9
Tablo 2. 4. Sementasyon Çeliklerinin Isıl İşlemleri	14
Tablo 2. 5. Gaus hata fonksiyon değerleri	25
Tablo 2. 6. Bazı malzemeler için yaklaşık Do ve Q değerleri	26
Tablo 2. 7. Sementasyon Derinliğinin, sementasyon sıcaklığı ve sementasyon zamanına bağlı olarak değişim değerleri	32
Tablo 4. 1. Kullanılan numunenin kimyasal kompozisyonu	48
Tablo 4. 2. Isıl işlem görmeyen numunelerin yorulma deney sonuçları	52
Tablo 4. 3. I. grup numunelerin yorulma deney sonuçları	54
Tablo 4. 4. II. Grup numunelerin yorulma deney sonuçları	56
Tablo 5. 1. Sertlik derinliğine bağlı olarak yorulma dayanımındaki artış	58

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Çeliklerin yüzey sertleştirilmesi, Gaz karbürizasyonu, Sementasyon çelikleri, Eğmeli yorulma mukavemeti

Günümüzde sementasyon çelikleri dişlilerde, millerde, zincir baklalarında, rulmanlı yataklarda bir kısım ölçü ve kontrol aletlerinde ve kesici takımlar gibi parçaların imalinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sementasyon işlemi, parça kısmen veya tamamen son şeklini aldıktan sonra uygulandığı için sementasyon çeliklerinin işlenmesi oldukça kolaydır. Bunun yanında yüzeyde aynı sertliği verebilecek takım çeliği durumundaki yüksek karbonlu çeliklerden daha ucuz olması gibi avantajlara sahip bulunmaktadır.

Ancak uygun sementasyon çeliğinin seçimi ve doğru sementasyon işlemi dikkat ve tecrübeyi gerektirir. Sementasyon işleminin iyi sonuç vermesi, istenilen sementasyon derinliğine ve sertliğe ulaşılması, kullanılan çeliğin iç yapı temizliği ile yakından ilgilidir.

Bu çalışmada, yüzeyi sertleştirilen numunelerde sertlik derinliğinin yorulma mukavemetine etkisi, yüzeyi gaz sementasyonu ile sertleştirilmiş SAE 8620 sementasyon çeliği üzerinde deneysel olarak incelenmiştir.

Dönen eğme gerilmeli yorulma deney sonuçlarından, yorulma mukavemetinin sertlik derinliği ile yakından alakalı olduğu belirlenmiş olup uygun biçimlendirme ve uygun yüzey işlemleriyle numunelerin yorulma mukavemetinde önemli miktarda artış kaydedilmiştir.

SUMMARY

Keywords: Case hardening of steel, Gaz Carburizing, Cementation steels, Bending Fatigue strenght.

Today cementation (carburation) steels are widely used in the production of gears, shafts, chain links, roll bearings, some measurement and control devices and cutting tools. Processing of cementation steel is quite easy since cementation is done after the sample material assumes its final shape in part or completely. Besides, it has the advantage of being cheaper than highy-carbon steels which can give the same case hardness.

However, selecting the proper cementation steel and the right cementation process require attention and experience. For the cementation process to be successful, i.e., obtaining the desired sementation depth and hardness is closely related to the cleanliness of the internal structure.

In this study, the effect of hardness depth on fatigue strength is experimentally investigated on SAE 8620 cementation steel which was case-hardened by gas cementation method.

From the results of rotation bending fatigue strength experiments, it was found that the fatigue strength is closely related to cementation depth. Furthermore, considerable increases in the fatigue strength are achieved by proper shaping and surface finishing.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Sementasyonla yüzey sertleştirme işlemi, makina parçalarının yorulma mukavemetini ve aşınma mukavemetini artırmak için pratikte yaygın olarak kullanılır. Sementasyon neticesinde yüzeyde faz dönüşümüyle meydana gelen sert ve sağlam kabuk daha fazla gerilme taşıyabilir. Faz dönüşümü ve farklı soğumadan dolayı meydana gelen yüzeydeki basma gerilmeleri, uygulanan çekme gerilmesinin etkisini azaltır.

Sementasyon işlemine tabi tutulan malzemenin yüzeyi, esas malzemeninkinden daha fazla karbon konsantrasyonuna sahiptir. Sertleştirme esnasında karbon konsantrasyonuna ve soğutma hızına bağlı olarak, meydana gelen mikroyapı ve mukavemet değişir. Makina parçalarında çalışma esnasında en büyük gerilme yüzeyde meydana gelir. Ayrıca malzemenin yüzeyi daha çabuk hasara uğrar ve yorulma çatlaklarında genellikle yüzeyden başlar. Bu yüzden malzeme yüzeyinin sert ve sağlam bir mikroyapıya sahip olması yorulma mukavemetini artırır.[1]

Kolayca işlenebilir özelliğe sahip düşük karbonlu çeliklerin yüzey tabakaları sementasyona ve bunu takiben sertleştirme işlemine tabi tutulabilir. "Yüzey sertleştirme" adı verilen bu işlem, çeliğe sert ve aşınmaya karşı dayanıklı bir yüzey sağlar. Yüzeyi sertleştirilmiş çeliğin çekirdeğinin nisbeten yumuşak ve tok olması, parçanın tüm olarak yüksek darbe mukavemeti göstermesini sağlar. Yüzey sertleştirme sırasında, yüzey tabakalarında basma gerilmelerinin gelişmesi yüzünden, çeliğin yorulma mukavemeti de artar.

Sementasyon normal olarak 825 ve 925 °C sıcaklıkları arasında, katı sementasyon ortamında, tuz banyolarında ve gazlar içinde uygulanır. Sementasyon derinliği, ya çeliğin yüzeyinin altında belli bir karbon konsantrasyonuna kadar olan mesafe ve yahut karbonun yayılmış olduğu toplam derinlik olarak tanımlanır.

Zaman ve sıcaklığın yanısıra sementasyon derinliğine etki eden faktörler sementasyon ortamının karbon potansiyeli ve çeliğin kimyasal bileşimidir. Ortamın karbon potansiyeli ne kadar yüksek ise, yayınma sonrası denge haline ulaşıldığında, sementasyon derinliği de o derece fazla olur. [2] Sementasyon sonrasında çelikler bir

sertleştirme işlemine tabi tutulurlar. Sertleşme işlemi parçanın yüzeyinde veya çekirdeğinde ya da beraberce her iki bölgesinde elde edilmesi istenen sertlik değerine bağlı olarak çeşitli şekillerde yapılır. Sertleştirme işlemi sonucunda malzeme yüzeyinin sertliğinin artması ile yorulma mukavemetinde de oldukça önemli artış olmaktadır.[3]

Malzemenin tekrarlı gerilmeler veya birim şekil değiştirmeler sonucu kırılmasına "yorulma" adı verilir. Yorulma ömrü, kırılmaya kadar uygulanan tekrar sayısı ile verilir. Bu ömür;

- Çekirdeklenme
- Mikroçatlak ilerlemesi
- Makro çatlak ilerlemesi
- Kırılma

olmak üzere 4 safhadan 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 şu şekilde sıralanabilir.

- Bazı yükleme durumlarında (burulma, eğilme) gerilmeler yüzeyde en büyük değeri alır.
- Yüzey pürüzlülüğü gerilme yığılmalarına neden olur.
- Yüzeyler dış ortamdan çabuk etkilenir. Örneğin çentik etkisi yapan korozyon çukuru oluşabilir.
- Yüzeyde düzlem gerilme halinin olması nedeniyle burada plastik şekil değişimi daha kolaydır.[4]

Çentiksiz, çok iyi parlatılmış numunelerde oluşan ve malzemenin tekrar gerilmeler veya birim şekil değiştirmeler sonucu kırılması anlamına gelen yorulma kırılmalarının ilk başlangıç yeri yüzeydeki, çekirdek ve sertleştirilmiş tabaka arasındaki bölgedir. Bu sınır bölgesinde başlayan yorulma çatlakları, çekirdeğin içinde çok çabuk ilerler ve sertleşmiş tabaka da adım adım artan bir gerilme oluşturur. Çatlaklar burada görünmeye başlar ve sonunda deney numunesi aniden kırılır. Bu olaydan çekirdek mukavemetinin yorulma sınırı üzerinde önemli bir etkisi olduğu açıkça görülebilir. Çünkü çatlaklar genellikle, yorulma sınırı karbürize olmuş tabakadan daha düşük olan çekirdekte başlamaktadır.

Bununla beraber, optimum bir çekirdek mukavemetinin varlığı söz konusudur. Bu değer aşılsa yorulma azalır. Çekirdeğin mukavemeti karbon ilavesiyle artırılır. Çünkü karbon ilavesi; çeliğin sertleştirme sıcaklığından soğuması esnasında ostenitin dönüşüm sıcaklığını düşürür. Bunun sonucu olarak çekirdeğin mukavemeti artar. Optimum çekirdek mukavemeti de yorulma kırılmasını olumlu yönde etkiler.[2]

Yorulma kırılmasını kolaylaştıran etkenler

- 1) Dış etkenler (şekil, yüzey durumu ve zorlama şekli)
- 2) İç 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.

Deney sonuçlarına göre yorulma kırılmalarının büyük çoğunluğu malzeme hatalarının yanı sıra çentik etkisi yapan şekil ve yüzey etkileri, aşırı yükleme ve benzeri nedenlerle ortaya çıkmış bulunmaktadır.[5]

Verilmiş bir ortalama gerilme için, sonsuz ömre karşılık gelen genlik gerilmesi anlamındaki malzemenin "yorulma sınırı" döner eğmeli makinede ve parlatılmış yüzeye sahip deney numunelerinde elde edilmiştir. 10^6 tekrar sonucu hasar oluşturmayan genlik gerilmesi yorulma sınırı olarak kabul edilmiştir.

Çekme dayanımı 1400 MPa 'nın altında olan çeliklerde, döner eğme halindeki ($\sigma_0 = 0$) yüklemde yorulma sınırı σ_{y0} , çeliğin çekme dayanımı σ_C 'ye bağlı olarak şu şekilde alınabilir.

$$\sigma_{y0} = 0,5 \sigma_C$$

Bu değer dökme demir $\sigma_{y0} = (0,35-0,5)\sigma_C \cong 0,4 \sigma_C$ olarak alınabilir. Demir dışı metallerde belirgin bir yorulma sınırı olmadığından, bunların yorulma sınırı olarak 10^8 tekrara karşılık gelen yorulma dayanımı kullanılır.

Pratikte, makina elemanları döner eğmeye maruz ve parlatılmış deney numunelerinden farklı şekillerde yüklenirler ve bunların yüzeyleri de farklı özelliktedir. Aynı zamanda, bir çok makina elemanından sonsuz ömür istenemez. Elemanın çeşitli değişken yükleme şartları altında yorulma dayanımını saptamak için, yorulma sınırı şu faktörler gözönüne alınarak tashih edilmelidir.

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

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

Standart deney numuneleri 10 mm. çapında olup, parlak bir yüzeye sahiptirler. Herhangi bir çentik içermezler ve dönel eğilmeye maruzdurlar. 10^8 ve daha büyük tekrar sayılarına karşılık gelen yorulma dayanımı yorulma sınırı olarak adlandırılır. 10^3 'den düşük tekrarlara karşılık gelen yükler statik yük olarak kabul edilebilir.

Yorularak hasara uğramış elemanların kırılma yüzeyleri yorulmaya has 3 ayrı bölgeye sahiptir. Bu bölgeler;

- Yorulma çatlağının çekirdeklendiği bölge

- Yorulma çatlağının ilerlemesi sonucu oluşan bölge
- Zoraki kırılma bölgesidir

Bu bölgelerin herbiri elemandaki yorulma hasarı ile ilgili belirli bilgiler verir. Yorulma çatlaklarının hemen hemen tümü parça yüzeyinde çekirdeklenir. Yorulma çatlağının çekirdeklendiği bölgenin dikkatli bir biçimde incelenmesi yorulma nedenini ortaya çıkarır. Örneğin bu, bir çentiğin, talaş kaldırma sırasında oluşan bir yüzey girintisinin veya bir korozyon çukurcuğunun neden olduğu gerilme yığılması olabilir. Bu tip bilgiler bilindiği gibi yorulma nedeninin analizinde birinci dereceden öneme sahip bilgilerdir. [4]



BÖLÜM 2. YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİ

2. 1. Sementasyon Çeliğinin Tanımı ve Özellikleri

Sementasyon çelikleri, yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı, çekirdekte ise daha yumuşak ve tok özelliklerin istendiği, değişken ve darbeli zorlamalara dayanıklı parçaların imalinde kullanılan, düşük karbonlu alaşımsız veya alaşımlı, çeliklerdir.

Parçaya bu özelliklerin kazandırılması, çelik yüzeyine karbon emdirilmesi suretiyle olur. Sementasyon çeliklerinin mekanik özellikleri Tablo 2. 1 'de verilmiştir.

Sementasyon çelikleri, dişliler, miller, rulmanlı yataklar, bir kısım ölçü ve kontrol aletleri ve kesici takımlar gibi parçaların imalinde kullanılırlar. Sementasyon çeliklerinin çeşitli standartlardaki karşılıkları Tablo 2. 2. 'de gösterilmiştir.

Sementasyon işleminde parça kısmen veya tamamen son şeklini aldıktan sonra uygulandığı için parçanın işlenmesi oldukça kolaydır. Parçanın yüzeyinde sonradan işlenecek, sertleşmesi istenmeyen kısımlar var ise bu bölgeler elektrolitik bakır ile kaplanarak örtülür. Sementasyon işlemi bu kısımda tesir edemeyeceğinden sonradan kolayca işlenir.

Sementasyon işlemi sonrasında, çekirdek bölgesi yumuşaklığını koruyacağından sertleştirme sırasında ortaya çıkabilecek çarpılmalar oldukça azdır.

Semente edilmiş çeliklerin iç kısımları kolayca işlenebilir. Sementasyon çelikleri, yüzeyde aynı sertliği verebilecek, çoğu zaman takım çeliği durumundaki yüksek karbonlu çeliklerden daha ucuzdur.

Tablo 2. 1. Sementasyon çeliklerinin mekanik özellikleri

KISA İŞARETİ	MALZEME NO.	SERTLİK				SEMENTASYON SONRASI ÇEKİRDEK SERTLEŞTİRMESİ YAPILMIŞ DEĞİŞİK ÇAPLAR İÇİN											
		İst. İşlemi Uygulandığında				Ø 11 mm						Ø 30 mm					
		Yüzey Sertliği HB 30 max	Belli Bir Çekme Dayanımı HB 30	İst. İşlemi Sağlayan HB 30	Sonuç HB 30	Akma Sınırı kgf/mm ² (0.2 Sınırı)	Çekme Dayanımı kgf/mm ²	Uzama (L ₀ = 5d ₀) % min	Kesit Daralması % min	Akma Sınırı kgf/mm ² (0.2 Sınırı)	Çekme Dayanımı kgf/mm ²	Uzama (L ₀ = 5d ₀) % min	Kesit Daralması % min				
C 10	1.0301	131	-	-	90-126	40	65-80	13	35	30	50-65	16	45	-	-		
C 15	1.0401	146	-	-	103-140	45	75-90	12	30	36	60-80	14	40	-	-		
CK 10	1.1121	131	-	-	90-126	40	65-80	13	40	30	50-65	16	50	-	-		
CK 15	1.1141	146	-	-	103-140	45	75-90	12	35	36	60-80	14	45	-	-		
15 Cr 3	1.7015	174	126-174	-	118-160	52	80-105	10	35	45	70-90	11	40	-	-		
16 MnCr 5	1.7131	207	156-207	-	140-187	65	90-120	9	35	60	80-110	10	40	45	65-95		
20 MnCr 5	1.7147	217	170-217	-	152-201	75	110-140	7	30	70	100-130	8	35	55	80-110		
20 MoCr 4	1.7321	207	156-207	-	140-187	65	90-120	9	35	60	80-110	10	40	-	-		
25 MoCr 4	1.7325	217	170-217	-	152-201	75	110-140	7	30	70	100-130	8	35	-	-		
13 NiCr 6	1.5713	190	145-170	-	175-220	85	110-140	9	35	70	80-110	10	40	-	-		
14 CrNi 14	1.5752	230	190-230	-	170-210	85	100-130	8	35	70	90-120	9	40	65	70-110		
15 CrNi 6	1.5919	217	170-217	-	152-201	70	98-130	8	35	65	90-120	9	40	55	80-110		
18 CrNi 8	1.5920	235	187-235	-	170-217	85	125-150	7	30	80	120-145	7	35	70	110-135		
17 CrNi Mo 6	1.6587	229	179-229	-	159-207	85	120-145	7	30	80	110-135	8	35	70	100-130		
21 NiCr Mo 2	1.6523	212	165-210	-	150-195	80	105-135	7	35	60	85-115	9	40	50	70-95		
Cm 15	1.1140	146	-	-	103-140	45	75-90	12	35	36	60-80	14	45	-	-		
16 MnCrS 5	1.7139	207	156-207	-	140-187	65	90-120	9	35	60	80-110	10	40	45	65-95		
20 MnCrS 5	1.7149	217	170-217	-	152-201	75	110-140	7	30	70	100-130	8	35	55	80-110		
20 MoCrS 5	1.7323	207	156-207	-	140-187	65	90-120	9	35	60	80-110	10	40	-	-		
25 MoCrS 5	1.7326	217	170-217	-	152-201	75	110-140	7	30	70	100-130	8	35	-	-		

Tablo 2. 2. 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	-	-

Tablo 2. 3. Sementasyon Çeliklerinin Sınıflandırılması

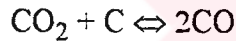
ÇELİK		KİMYASAL BİLEŞİM (% Ağırlık)							
Kısa İşareti	Malz.No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
KALİTE ÇELİKLERİ									
C 10	1.0301	0.07 0.13	0.15 0.35	0.30 0.60	- 0.045	- 0.045	-	-	-
C 15	1.0401	0.12 0.18	0.15 0.35	0.30 0.60	- 0.045	- 0.045	-	-	-
ASAL ÇELİKLERİ									
Ck 10	1.1121	0.07 0.13	0.15 0.35	0.30 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	-

Uygun sementasyon çeliğinin seçimi ve doğru sementasyon işlemi çok dikkat ve tecrübeyi gerektirir. Tablo 2. 3 'de sementasyon çelikleri sınıflandırılmıştır. Sementasyon işleminin iyi sonuç vermesi kullanılan çeliğin iç yapı temizliği ile yakından ilgilidir. Yani istenilen sementasyon derinliğine ve sertliğine ulaşmada çeliğin iç yapı temizliği çok önemlidir.

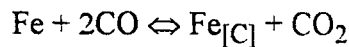
2. 2. Sementasyon İşlemi

Sementasyon işlemi, yüzey sertleştirme metodlarından birisi olup en eski ve en yaygın olarak kullanılanıdır. Esas itibarıyla, düşük karbonlu çelik parçasının yüzeyine, karbon emdirilmesi işlemidir. Karbon emdirilmesi işlemi, çelik parçalarının (CO) ihtiva eden bir ortamda ostenit faz sıcaklığına kadar ısıtılmasıyla gaz-metal reaksiyonu sonucu oluşur. Genellikle 850 - 950 °C arasında bir sıcaklık kullanılır ki bu sıcaklığa "sementasyon sıcaklığı" adı verilir.

Aşağıdaki reaksiyona göre

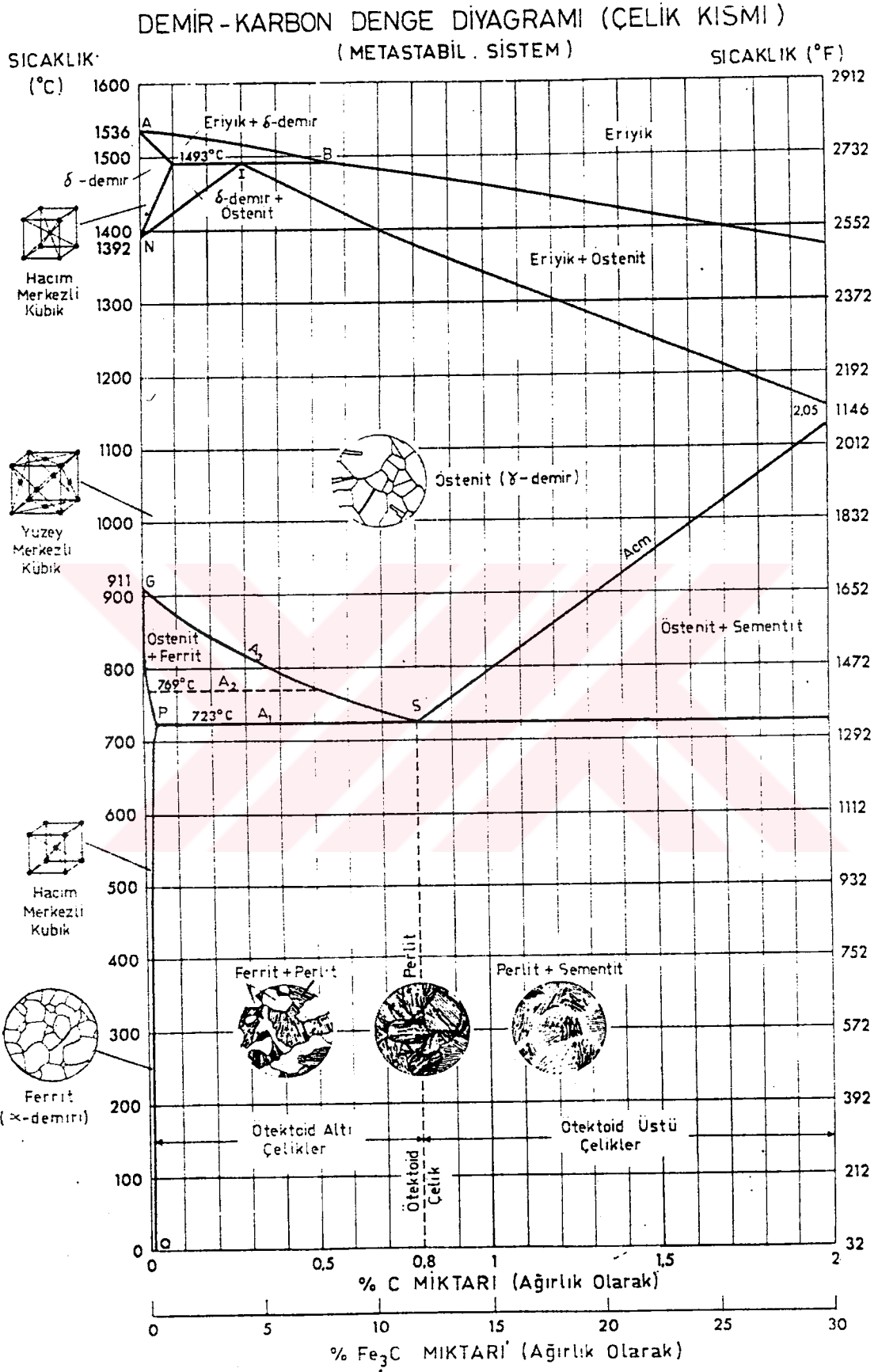


oluşan CO, kullanılan sementasyon sıcaklığında, ostenit faza getirilmiş olan çelik parçasının yüzeyinde parçalanır ve açığa çıkan atomik karbon (C) çelik bünyesine emilerek çözünür.



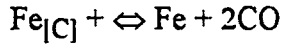
Burada $\text{Fe}_{[\text{C}]}$ ostenit fazda çözünen karbonu ifade etmektedir.

Kullanılan sementasyon sıcaklığında, ostenit fazda çözünebilen max: karbon miktarı, Şekil 2. 1 'deki demir-karbon denge diyagramında A_{cm} çizgisinden bulunabilir.



Şekil 2. 1. Demir - Karbon dengi Diyagramı

Verilen her iki reaksiyon da geri dönme (reversible) özelliği gösterirler. Sıcaklığın azalması sonucunda reaksiyon



şeklinde olup çelik parçasının yüzeyinden karbon kaybetmesine neden olur. Bu duruma dekarburizasyon (karbonsuzlaşma) olayı denir. [3]

Sertleştirilmiş düşük alaşımlı bir çelik ve karburize edilmiş bir sementasyon çeliği üzerinde yüzey dekarburizasyonunun dönel eğmeli yorulma dayanımına etkisi araştırılmış, yüzey karbon ihtivasi, dekarburizasyon derinliği, mikrosertlik, artık gerilmeler, yüzey bitimi ve yorulma ömrü arasındaki ilişkiler incelenerek yorulma ömrünün 1 mm 'nin üzerindeki dekarburizasyon derinliğinden bağımsız olduğu tesbit edilmiştir. Bunun yanında mikrosertlik, yüzey karbon konsantrasyonu ve yorulma ömrü arasında doğrusal ilişkiler bulunmuştur.

Ayrıca yüzeydeki artık gerilmelerin yorulma ömrünü azalttığı tesbit edilmiştir. [6]

Sementasyon çeliğinin yüzeyi karbon emmesi yaparken parçanın çekirdek kısmı düşük karbon miktarını korumaya devam eder. Bu sebeple, karbon atomları parçanın yüzeyinden çekirdeğe doğru yayınarak denge durumuna gelmek isteyeceklerdir. Ostenit fazda karbon atomlarının difüzyon hızı, verilen sıcaklıkta, çelik parçasının yüzeyinde oluşan karbon konsantrasyonuna ve difüzyon katsayısına bağlıdır.

Çelik parça, sementasyon sıcaklığında karbon difüzyonunun arzu edilen derinliğe kadar ilerlemesi için yeterli süre tutulur. Bu süreye "Sementasyon Zamanı" adı verilir.

Sementasyon zamanı süresince, çelik parçanın yüzeyinden içeriye doğru yayılan karbonun ilerleme derinliğine "Sementasyon Derinliği" adı verilir.

Eğer çelik parça, sementasyon sıcaklığından yavaşça soğutulursa, sementasyon derinliği boyunca değişen karbon miktarına bağlı olarak çeşitli yapılar oluşur. Bu yapılar, çelik parçasının sementasyon sonrası, fırında yavaş soğutulularak alındıktan sonra mikroskopta incelenmesiyle açıkça görülebilir. Önce, yüzeyde teşekkül eden ötektoid üstü bölgede, sementit ve perlit yapılar görülür. Bunun altında oluşan ötektoid bölge sadece perlit yapıdadır. İçeriye doğru perlit ve ferrit yapılardan oluşan ötektoid altı bölge gelir ve çekirdeğe doğru ferrit yapı miktarı artarak devam eder. Sementasyon sonrasında, çelik parça bir sertleştirme işlemine tabi tutularak yüzeyde

yüksek sertlik elde edilir. Sementasyon çeliklerine uygulanan ısıt işlemler Tablo 2. 4 'de verilmiştir.

2. 3. Sementasyon Metodları

Sementasyon işlemi değişik karbon verici ortamlarda yapılabilir.

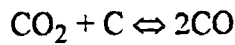
Bunlar:

- Kutu sementasyonu (Katı ortamda sementasyon)
- Tuz banyosunda sementasyon
- Gaz sementasyonudur.

Uygulanan metod ne olursa olsun, sementasyon işlemi, çelik parçanın ostenit faz sıcaklığına kadar ısıtılmasıyla gaz-metal reaksiyonu sonucu oluşur ve her metod çelik yüzeyinde farklı sementasyon derinlikleri ve sementasyon sonrası uygulanan sertleştirme yöntemine bağlı olarak, farklı sertlik neticeleri verir.

2. 3. 1. Kutu Sementasyonu

Kutuda yapılan sementasyon işlemi için karbon verici olarak genellikle odun kömürü kullanılır. Sement edilecek parçalar çelik yada dökme demirden yapılmış kutu içerisindeki odun kömürüne gömülür ve kutunun ağzı sıkıca kapatılarak fırına yerleştirilir. Sıcaklığın yükselmesi ile odun kömürü, kutu içindeki havanın oksijeni ile reaksiyona girerek CO₂ oluşturur. CO₂ 'de tekrar odun kömürü ile reaksiyona girerek CO meydana getirir.



Tablo 2. 4. Sementasyon Çeliklerinin Isıl İşlemleri

KISA İŞARETİ	MALZEME NO.	Sıcak Şekillendirme	Normalleştirme	Yumuşatma	Tav	Sıcaklık	Sıcaklık	SEMENTASYON İŞLEMİ			CEKİRDEK SERTLEŞTİRMESİ		Yüzey Sertleştirilmesi	Menevişleme
								SEMENTASYON SONRASI	SERTLEŞTİRME YONTEMLERİ	SÖLÜTMA ORTAMI	°C Sıcaklık	SÖLÜTMA ORTAMI	°C Sıcaklık	°C Sıcaklık
C 10	1.0301							Direkt Sertl. Basit Sertl.	S(Y) SB,SK,H		880-920	S(Y),SB	-	150-180
C 15	1.0401							Direkt Sertl. Basit Sertl.	S(Y) SB,SK,H		880-920	S(Y),SB	-	150-180
Ck 10	1.1121							Direkt Sertl. Basit Sertl.	S(Y) SB,SK,H		880-920	S(Y),SB	-	150-180
Ck 15	1.1141							Direkt Sertl. Basit Sertl.	S(Y) SB,SK,H		880-920	S(Y),SB	-	150-180
15 Cr 3	1.7015							Direkt Sertl. Basit Sertl.	S(Y),SB SK,H		870-900	S(Y),SB	-	150-180
16 MnCr 5	1.7131							Basit Sertl. (Direkt Sertl.) (Çift Sertl.)	Y(S),SB TB,SK,H		850-880	S(Y),SB	-	170-210
20 MnCr 5	1.7147							Basit Sertl. (Direkt Sertl.) (Çift Sertl.)	Y(S),SB TB,SK,H		850-880	Y(S),SB	-	170-210
20 MoCr 4	1.7321							Direkt Sertl.	Y(S),SB		890-920	Y,SB	-	170-210
25 MoCr 4	1.7325							Direkt Sertl.	Y(S),SB		890-920	Y,SB	-	170-210
13 NiCr 6	1.5713							Basit Sertl.	Y(S),SB		840-870	Y(S),SB	800-820 Y,SB	170-210
14 CrNi 14	1.5752							Basit Sertl. Çift Sertl.	Y(S),SB SK,H		830-860	Y(S),SB	780-800 Y,SB	170-210
15 CrNi 6	1.5919							Basit Sertl. Çift Sertl.	Y(S),SB TB,SK,H		840-870	Y(S),SB	800-830 Y(S),SB	170-210
18 CrNi 8	1.5920							Basit Sertl. Çift Sertl.	Y(S),SB TB,SK,H		840-870	Y(S),SB	800-830 Y(S),SB	170-210
17 CrNiMo 6	1.6587							Basit Sertl. Çift Sertl.	Y(S),SB TB,SK,H		840-870	Y,SB	800-830 Y(S),SB	170-210
21 NiCrMo 2	1.6523							Direkt Sertl. Basit Sertl.	Y(S),SB SK,H		840-870	Y,SB	800-830 Y(S),SB	170-210
Cm 15	1.1140							Direkt Sertl. Basit Sertl.	S(Y),SB SK,H		880-920	S(Y),SB	-	150-180
16 MnCrS 5	1.7139							Basit Sertl. (Direkt Sertl.) (Çift Sertl.)	Y(S),SB SK,H		850-880	Y(S),SB	810-840 Y(S),SB	170-210
20 MnCrS 5	1.7149							Basit Sertl. (Direkt Sertl.) (Çift Sertl.)	Y(S),SB SK,H		850-880	Y(S),SB	810-840 Y(S),SB	170-210
20 MoCrS 4	1.7323							Direkt Sertl.	Y(S),SB		890-920	Y,SB	-	170-210
25 MoCrS 4	1.7326							Direkt Sertl.	Y(S),SB		890-920	Y,SB	-	170-210

SK:Sementasyon Kutusu

TB:Tuz Banyosu(580-650 C)

SB:Sıcak Banyo(160-250 C)

Y:Yağ

S:Su

H:Hava

SÖLÜTMA ORTAMLARI :

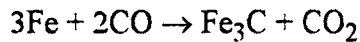
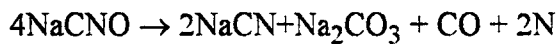
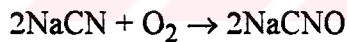
Sıcaklığın artmasıyla, yukarıdaki reaksiyona göre CO oluşumu artar. Ortaya çıkan CO çelik yüzeyinde ayrışarak CO₂ ve atomik karbon meydana getirir. Atomik karbon, ostenit faza gelmiş olan çelik tarafından emilerek bünyede çözülür. Böylece çelik parçanın yüzeyi karbonca zenginleştirilmiş olur. Açığa çıkan CO₂ tekrar odun kömürü ile reaksiyona girer, CO meydana getirir ve reaksiyonlar aynen tekrar eder.

Kutu sementasyon genellikle büyük parçaların sementasyonunda kullanılır ve önemli avantajlı önceden hazırlanması gereken gaz atmosferine gerek olmamasıdır.

2. 3. 2. Tuz Banyosunda Sementasyon

Tuz banyosunda sementasyon için, karbon verici olarak NaCN ya da KCN gibi tuzlar kullanılır. Ancak, tuz seçimi istenilen sementasyon derinliğine ve buna bağlı olarak çalışılacak sementasyon sıcaklığına göre yapılmalıdır. İnce sementasyon derinliği veren tuzlarla 0,9 mm 'ye kadar sertlik derinliği elde edilmesinin yanında sementasyon derinliğini artıran tuzlarla 3 mm hatta bazen 6 mm derinliğe kadar ilerlemek de mümkündür.

Bu metodla sementasyon işlemi aşağıdaki reaksiyonlara göre cereyen eder.



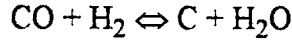
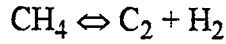
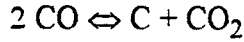
İlk reaksiyon siyanür tuzu ile havanın oksijeni arasında olur. Açığa çıkan NaCNO ayrışarak CO ve atomik azot verir. Ostenit fazdaki çelik, CO ile reaksiyona girerek karbonu bünyesine alır. Parçalar tuz banyosuna daldırılmadan önce 100-400 °C arasında ön ısıtma yapılmalıdır.

Tuz banyosu genellikle küçük orta büyüklükteki parçaların sementasyonu için kullanılır. Tuz banyosunda homojen sementasyon derinliği banyo kompozisyonunun sık sık kontrol edilerek ayarlanmasını gerektirir. Siyanür tuzları zehirli olduklarından bu metodun kullanımında dikkatli olunmalıdır.

2. 3. 3. Gaz Sementasyonu

Gaz sementasyonu son yıllarda yüzey sertleştirme metodlarının en popüler olanı haline gelmiştir. Bu metodla oldukça iyi ve güvenilir neticeler elde edilmektedir.

Gaz sementasyonu için karbon verici olarak metan (CH_4) etan (C_2H_6), propan (C_3H_8) gibi hidrokarbonlar kullanılır. Sementasyon sıcaklığında çeşitli reaksiyonlar oluşur. Aşağıdaki reaksiyonların soldan sağa doğru ilerlemesi sonucu, ortaya çıkan atomik karbon, ostenit fazdaki çelik bünyesine girerek yüzeyde karbonca zengin kabuk bölgesini meydana getirir.



Fırın atmosferinde oluşan gaz kompozisyonunun, özellikle nem miktarının çelik yüzeyinde elde edilecek karbon miktarına önemli tesirleri vardır. Nem miktarı ise, gazın yoğunlaşma sıcaklığının tesbiti ile ölçülebilir.

Sementasyon derinliği, çelik parçasının fırında kalış süresine bağlı olarak değişir. İşlem tamamlandıktan sonra kullanılan çelik çeşidine bağlı olarak uygun sertleştirme yöntemi seçilir. Bu metod, hassas toleranslı sementasyon derinliği istendiği haller için çok elverişlidir. Sementasyon sıcaklığından direkt sertleştirme için, hızlı hareket kolaylığı ve temiz çalışma ortamı sağlaması gaz sementasyonunun diğer avantajları olarak sayılabilir.[3]

Gaz sementasyon işleminin başarılı olabilmesi 3 temel değişkene bağlıdır. Bunlar:

- Sıcaklık
- Zaman
- Atmosfer 'dir.

2. 3. 3. 1. Sıcaklığın Etkisi

Çeliğe ilave edilebilen karbonun maksimum oranı ostenit bölgesinde karbonun difüzyon oranı ile sınırlı olup bu difüzyon oranı sıcaklıkla önemli ölçüde artar.

Örneğin; 1700 °F 'de ilave edilen karbon oranı 1600 °F 'de ilave edilen karbon oranından % 40 oranında daha fazla olmaktadır.

Sementasyon için en yaygın kullanılan sıcaklık 1700 °F (926 °C) dir. Bu sıcaklık, kısmen ısıya karşı dirençli fırın ekipmalarının aşırı bozulmasına izin vermeden hızlı bir sementasyon imkanını sağlar. Son zamanlarda, belirli derinlikte kabuk gereksinimini sağlamak için bu sıcaklık 1750 °F ve hatta 1800 °F 'a kadar çıkarılmıştır.

Sementasyonda birbirine, uygun sonuçlar için sıcaklığın eş dağılımlı olması önemlidir. İş parçalarının değişik yerlerindeki eş dağılımlılık fırının dizaynına bağlıdır. Ayrıca fırının yükleme yoğunluğuna, fırının ısınma oranı ve sirkülasyonuna da bağlıdır. Yüksek yoğunlukta yükleme halinde banyo fırınlarına etkili olması için sirkülasyon fanı gereklidir.

1700 °F	K.D : $0,025 \sqrt{t}$	
1650 °F	K.D : $0,021 \sqrt{t}$	
1600 °F	K.D : $0,018 \sqrt{t}$	(K.D : Kabuk Derinliği)

Banyo fırınlarının kontrolünün en iyi yapılabilmesi için termokupl yerleştirilmesi gerekir. Böylece sıcaklık kontrol edilebilir. Sürekli fırınlarda termokupl iş parçalarına mümkün olduğunca yakın olmalıdır. Fakat fırın içerisinde iş akışına engel olmamalıdır. Kontrol kolaylığı için termokupl ve koruma tüpü genellikle sürekli fırınların duvar kenarına yerleştirilir. Çünkü sürekli fırınların ilk bölümü sıcaklık kontrol bölgesidir. Bu bölmenin termokuplu parçayı aşırı ısınmaya karşı emniyet altına almak için bölmenin son kısmına yakın bir yere yerleştirilmelidir. Sementasyon bölgesindeki termokupl yaklaşık bölmenin ortasında olmalıdır. Son bölmenin sıcaklığı sementasyon sıcaklığından daha düşük olduğu zaman soğutma maksadıyla bölmenin sonunda, boşaltma kısmı yanında kontrol termokuplu ile en iyi kontrol sağlanabilir.

Şu anda kullanımda olan hemen hemen tüm sementasyon fırınları yeterli otomatik sıcaklık kontrolüne sahiptirler.

2. 3. 3. 2. Zamanın Etkisi

F.E. Harris normal sementasyon için kabuk derinliğinde sıcaklık ve zamanın etkisi için bir formül geliştirmiştir.

$$\text{Kabuk Derinliği} = \frac{31,6\sqrt{t}}{10^{(6700/T)}}$$

Kabuk derinliği inç olarak, t = zaman (saat)

T - Mutlak Sıcaklık (Rankine (°F+460))

Özel sementasyon sıcaklığı için, ilişki basitçe şöyle oluşur.

$$\begin{array}{ll} \text{Kabuk Derinliği} = K \sqrt{t} = 0,025 \sqrt{t} & 1700 \text{ } ^\circ\text{F} \\ & 0,021 \sqrt{t} \quad 1650 \text{ } ^\circ\text{F} \\ & 0,018 \sqrt{t} \quad 1600 \text{ } ^\circ\text{F} \end{array}$$

F. E. Harris aynı zamanda difüzyon ve sementasyon süresini hesaplamak için bir metod daha geliştirmiş böylece önceden belirlenen bir semente edilmiş kabuk derinliği ve yüzeydeki karbon konsantrasyonu elde etmiştir.

$$\text{Sementasyon süresi} = \text{Toplam süre} \left(\frac{C - C_t}{C_o - C_t} \right)^2$$

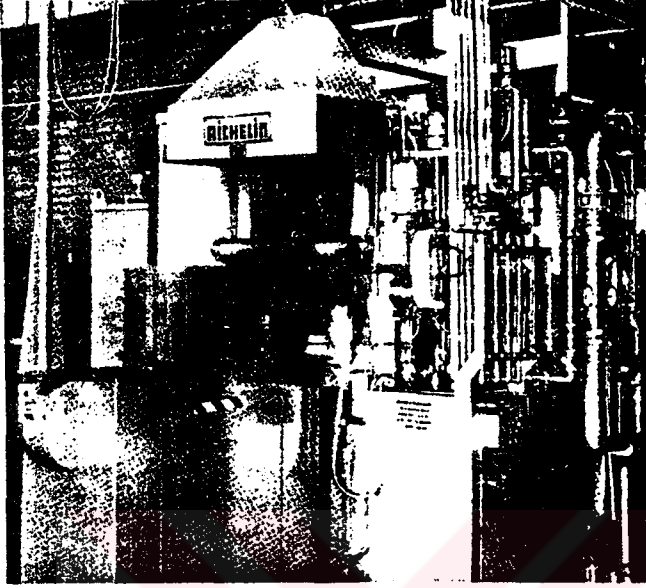
Difüzyon süresi = Toplam süre - sementasyon süresi

C - İstenilen son yüzey karbon konsantrasyonu

C_o - Sementasyon işlemi sonundaki yüzey karbon konsantrasyonu

C_t - Çekirdekteki karbon konsantrasyonu

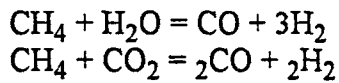
Bu metod en çok banyo tipi fırına adapte edilebilir. Başarılı bir uygulama, iyi şartlarda bir fırın ve düşük karbonlu bir taşıyıcı gaz gerektirir. Şekil 2. 2 'de bir gaz sementasyon fırını görölmektedir.



Şekil 2. 2. Gaz sementasyon fırını

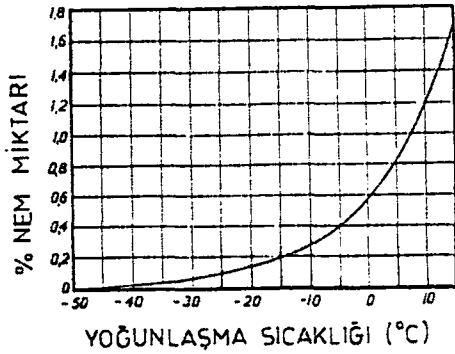
2. 3. 3. 3. Atmosferin Kontrolü

Sementasyon reaksiyonu için hazır karbon temin edilebildiği gibi hidrokarbon gazları da sementasyon bölgesindeki atmosferin karbon potansiyelini artırabilir. Bu da suyun çığ noktasını ve aşağıdaki reaksiyona göre CO_2 ihtivasını azaltarak mümkün olmaktadır.



Bu reaksiyonlar oldukça yavaştır. Bununla beraber çoğu kez gereğinden daha fazla metan gereklidir. [7]

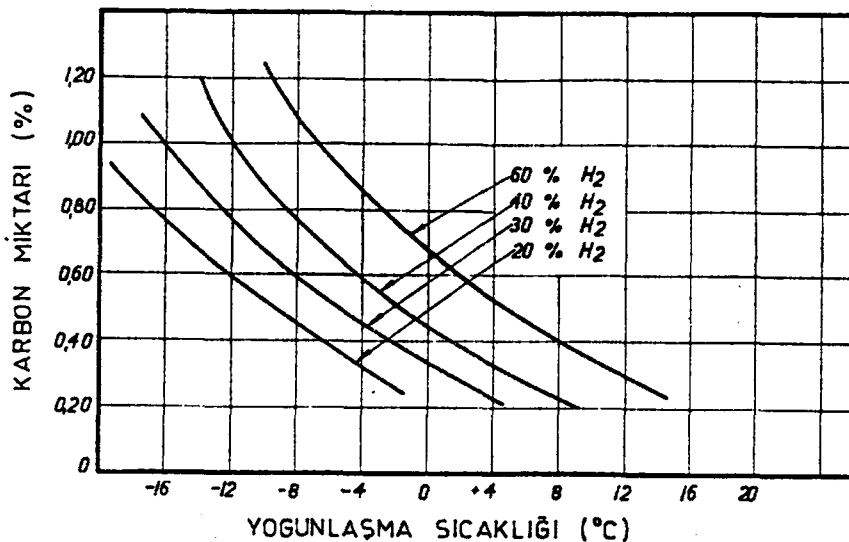
Fırın atmosferinde oluşan gaz kompozisyonunun, özellikle nem miktarının çelik yüzeyinde elde edilecek karbon miktarına önemli tesirleri vardır. Nem miktarı ise, gazın yoğunlaşma sıcaklığının tesbiti ile ölçülebilir. Burada yoğunlaşma sıcaklığı olarak tarif edilen, su damlacıklarının gaz karışımından çökeldiği sıcaklıktır. Aşağıdaki Şekil 2. 3 'de, nem miktarı ile yoğunlaşma sıcaklığı arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 2. 3. Nem miktarı ile yoğunlaşma sıcaklığı arasındaki ilişki

Aşağıdaki şekillerde ise, yoğunlaşma sıcaklığı kontrol edilerek, sementasyon sıcaklığı ve gaz kompozisyonunun değişimi ile yüzeyde elde edilecek karbon miktarına ait örnekler verilmiştir.

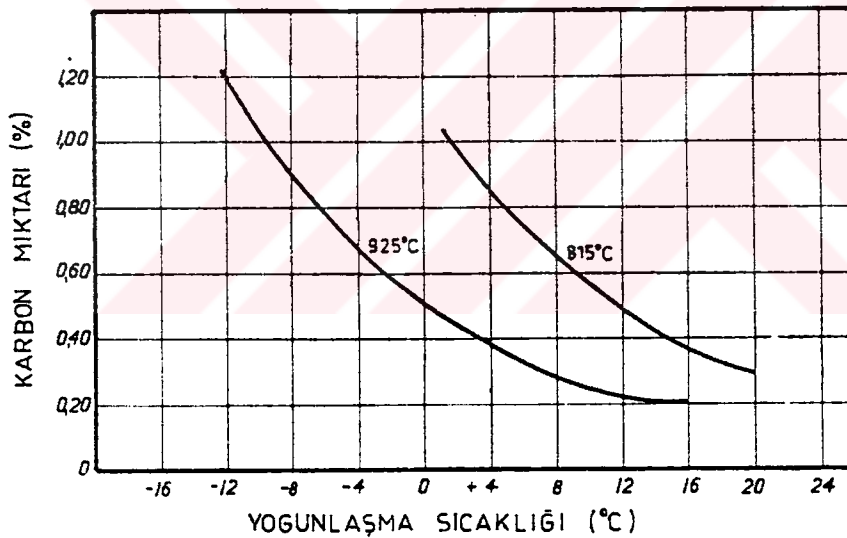
Şekil 2. 4 'de sementasyon sıcaklığı 925 °C ve fırın gaz kompozisyonundaki CO miktarı % 20 olarak sabittir. Çelik parçasının yüzeyinde meydana gelecek karbon miktarına, yoğunlaşma sıcaklığına ve fırın atmosferindeki hidrojen (H_2) % 'ne bağlı olarak değişmektedir. Çelik yüzeyinde % 0.80 karbon miktarı elde edebilmek için, gaz karışımındaki H_2 mikarı % 60 iken yoğunlaşma sıcaklığı - 3 °C veya H_2 miktarı % 20 olduğunda yoğunlaşma sıcaklığı - 17 °C olmalıdır.



Şekil 2. 4. Yoğunlaşma sıcaklığının karbon konsantrasyonuna etkisi

Şekil 2. 4 'de. 925 °C 'de yapılan sementasyon işleminde, gaz karışımındaki CO miktarı % 20 olarak sabit iken, yoğunlaşma sıcaklığının ve H₂ miktarının çelik yüzeyinde oluşacak C konsantrasyonuna etkileri görülmektedir.

Şekil 2. 5 'de ise, çelik yüzeyindeki karbon miktarının sementasyon sıcaklığına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Burada, gaz kompozisyonundaki CO miktarı % 20 ve H₂ miktarı % 40 olarak sabittirler. 925 °C sıcaklık kullanıldığında, yüzeyde % 0.80 karbon eldesi için, yoğunlaşma sıcaklığı yaklaşık - 6 °C ve aynı karbon miktarının eldesi için, 815 °C sıcaklık kullanıldığında, yoğunlaşma sıcaklığı + 5 °C olması gerekir.



Şekil 2. 5. Gaz karışımındaki CO miktarı % 20 ve H₂ miktarı % 40 olarak sabit iken, yükünlaşma sıcaklığının ve sementasyon sıcaklığının çelik yüzeyinde oluşacak C konsantrasyonuna etkileri.

Sementasyon derinliği, çelik parçasının fırında kalış süresine bağlı olarak değişir.

İşlem tamamlandıktan sonra kullanılan çelik çeşidine bağlı olarak uygun sertleştirme yöntemi seçilir. Bu metod, hassas toleranslı sementasyon derinliği istendiği haller için çok elverişlidir. Sementasyon sıcaklığından direkt sertleştirme için, hızlı hareket kolaylığı ve temiz çalışma ortamı sağlaması gaz sementasyonunun diğer avantajları olarak sayılabilir.[3]

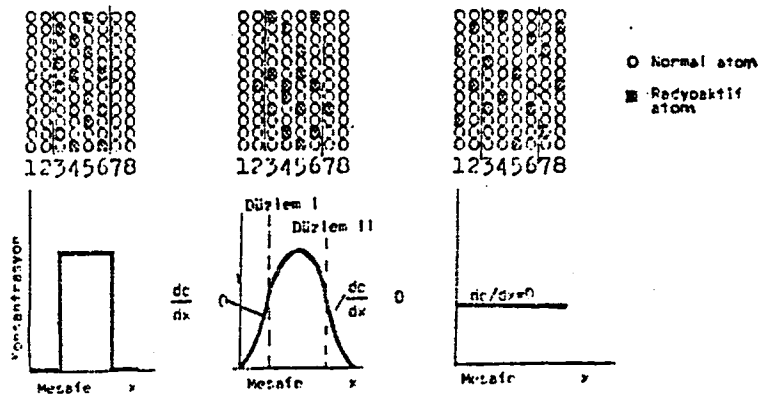
2. 4. Difüzyon (Yayınma) Olayı

2. 4. 1. Difüzyonun Şekli

Metal ya da alaşımları, mutlak sıfırın üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılırsa, iki tarz atomsal hareket görülür. Bunlardan biri, atomların kristal kafesindeki yerini değiştirmeksizin yaptıkları titreşimdir. Diğerisi ise, bazı atomların kristal kafesindeki yerlerini değiştirerek, malzeme içerisinde hareket etmeleridir. Difüzyon olayı olarak adlandırılan bu durum, tek tek atomların yer değiştirmesi nedeniyle, makroskobik malzeme akışının meydana geldiği bir tesadüfi olaydır. Difüzyon olayları, metallerin ısı işlemlerinde birçok durumda görülür, hatta eğer ani soğutma prosesi istisna tutulursa, bütün ısı işlemler difüzyon olayı ile meydana gelmektedir denebilir.

2. 4. 2. Makroskobik Difüzyon Akışı

Her atom, kafes içerisinde belirli bir yer işgal eder. Sıcaklığın artmasıyla atomların enerjileri artar ve kafesteki yerini değiştirebilir. Çok sayıdaki kaidesiz atom sıçramalarına karşılık, her hacim birimi için kütle sabittir. Bileşim farklarının takibi ile olay belirlenebilir, ancak bileşim değişmeden de bu olay meydana gelebilir. Ana metal içerisindeki birkaç atom radyoaktif olarak yüklenirse, bu atomların zamana bağlı olarak hacim dağılımı kolaylıkla gözlenebilir. Bu durumdaki bir metalin kendi atomlarının yayınması, "kendi kendine difüzyon" ya da "öz difüzyon" olarak adlandırılır. Şekil 2. 6 'da olay şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Metallerde kendi kendine difüzyon. Üstte şematik atom dağılımı, altta bunlara ait bileşimeğrileri

a) Difüzyon başlamadan önce b) Pek kısa difüzyon süresinde c) Uzun süreli difüzyon sonrası

Başlangıç halinde Şekil 2. 6a orta bölgede radyoaktif izotoplar homojen dağılmıştır. Sınırlandırılmış bölgenin dışında ise normal atomlar bulunmaktadır. Numaralanmış düşey atom sıralarından 3 ila 6 'nın herbirinde 4 radyoaktif izotop mevcuttur. Altteki şekilde bunların konsantrasyon dağılımları, mesafeye bağımlı olarak verilmiştir.

Şekil 2. 6.b 'de radyoaktif atom, kafesteki yerini bir kafes parametresi kadar değiştirmiştir. Sıçrama durumu her doğrultuda aynı olasılıkla meydana geleceği için, işaretlenmiş atomların 4 ve 5 sıralarında sayısal değişme yoktur. Fakat 3 ve 6 düşey sıraları birer atomlarını kaybetmiştir ve bu atomlar 2 ve 7 düşey sıralarına geçmiştir. Kontrasyon dağılımı altteki şekilde görüldüğü gibi, çan eğrisi tarzındadır. Devam eden kaidesiz sıçramalarla, radyoaktif atomların yayınmaları devam eder ve nihai durum olarak dengeli bir dağılım ortaya çıkar (Şekil 2. 6.c.) Müteakip sıçramalar, artık konsantrasyon değişmesi meydana getirmez.

Bu olayların açıklamasında Fick kanunlarından yararlanılabilir. Şekil 2. 6 'da da görüleceği gibi, eğer kontrasyon gradyanı dc/dx sıfırdan farklı bir değerde ise, bir difüzyon hızı mevcuttur. $dc/dx=0$ ise, konsantrasyon değişmesi yoktur. Düzlem I 'de (Şekil 2. 6.b alt şekil) dc/dx pozitifdir ve radyoaktif atomlar x doğrultusunun negatif yönünde yayılır. Buna karşın, düzlem II 'de dc/dx negatif değerlidir ve radyoaktif atomlar x doğrultusunda yayılır. Kantitatif olarak bu durum, Birinci Fick Kanunu ile açıklanabilir:

$$J = \frac{1}{F} \frac{dm}{dt} = -D \frac{dc}{dx} \quad \text{veya kısaca}$$

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (1. \text{ FICK KANUNU})$$

Burada, J- material akışıdır, yani (m) metal kütlesinin, t zamanı içerisinde, F yüzeyinden bu düzleme dik olarak difüzyon doğrultusunda yer değiştirme değeridir. D difüzyon katsayısıdır ve tetkik edilen metali karakterize eder. D -cm²/s, c-g/cm², x -cm, m -g, t - saniye ve F - cm² olarak alınır.

Birinci Fick kanunu ile, sabit F kesitinden nüfuz eden malzeme miktarının belirtilmesi yapılabilir.

$$\frac{dm}{dt} = F \cdot D \frac{dc}{dx}$$

Sabit konsantrasyon farkında kütle akışının tesbitinin zor olması ve metallerde difüzyon olaylarının çözümünde birinci Fick kanunu genellikle yetersiz kaldığı için, difüzyon katsayısının deneysel tesbitinde ve birçok kullanımda İkinci Fick Kanunu 'ndan yararlanılır. Birinci Fick Kanunu 'nun ikinci Fick kanununa dönüştürülmesi için, aralarında dx kadar mesafe bulunan iki paralel yüzeyle sınırlandırılmış hacim elemanı kullanılır. Bu durumda konsantrasyon x ve t 'ye bağımlı kalacağından, toplam diferansiyelin, kısmi diferansiyele dönüştürülmesi gerekir. Birinci düzlemde akış:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}$$

Birinci düzlemden dx kadar uzaktaki ikinci düzlemde akış:

$$J + \frac{\partial J}{\partial x} dx = -D \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} D \frac{\partial c}{\partial x} dx$$

Bu iki bağıntının birbirinden çıkarılmasıyla;

$$\frac{\partial J}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right)$$

x mesafesine bağlı olarak akışın değişmesi, nüfuz edilen malzemedeki birim hacimde zamanla konsantrasyon azalması $-\partial c / \partial t$ ile aynı anlamdadır. Yani $\partial J / \partial x = -\partial c / \partial t$ 'dir. Buna göre, ikinci Fick Kanunu:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (\text{İKİNCİ FİCK KANUNU})$$

Difüzyon katsayısı D , konsantrasyona bağımlı olmadığında, ikinci Fick kanunu daha basit olarak şöyle yazılabilir:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Yukarıdaki bağıntılar, difüzyonun yalnızca x doğrultusunda olduğuna göre düşünülmüştür. İkinci Fick Kanununun geliştirilmesiyle elde edilen bağıntı, şu diferansiyel eşitlikle açıklanabilir:

$$C_{(x,t)} = C_o + (C_s - C_o) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$

C_s - Yüzeydeki denge konsantrasyonu

C_o - Malzemenin (çeliğin) ortalama karbon miktarı

Burada, $\operatorname{erf}/x/2\sqrt{Dt}$ Gauss hata integralidir ve bu fonksiyon değerleri Tablo 2. 5 'den alınabilir.

Tablo 2. 5. Gaus hata fonksiyon değerleri ($\operatorname{erf}(z)$ fonksiyonunda değer cetveli $z = (x/2\sqrt{Dt})$)

z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	0,0113	0,0226	0,0338	0,0451	0,0564	0,0676	0,0789	0,0901	0,1013
0,1	1125	1236	1348	1459	1569	1680	1790	1900	2009	2118
2	2227	2335	2443	2550	2657	2763	2869	2974	3079	3183
3	3286	3389	3491	3593	3694	3794	3983	3992	4090	4187
4	4284	4380	4475	4569	4662	4755	4847	4937	5027	5117
5	5205	5292	5379	5465	5549	5633	5716	5798	5879	5959
6	6039	6117	6194	6270	6346	6420	6494	6566	6638	6708
7	6778	6847	6914	6981	7047	7112	7175	7238	7300	7361
8	7421	7480	7538	7595	7651	7707	7761	7814	7867	7918
9	7969	8019	8068	8116	8163	8209	8254	8299	8342	8385
1,0	8427	8468	8508	8548	8586	8624	8668	8698	8733	8768
1,1	8802	8835	8868	8900	8931	8961	8991	9020	9048	9076
2	9103	9130	9155	9181	9205	9229	9252	9275	9297	9319
3	9340	9361	9381	9400	9419	9438	9456	9473	9490	9507
4	9523	9539	9554	9569	9583	9597	9611	9624	9637	9649
5	9661	9673	9684	9695	9706	9716	9726	9736	9745	9755
6	9763	9772	9780	9788	9796	9804	9811	9818	9825	9832
7	9838	9844	9850	9856	9861	9867	9872	9877	9882	9886
8	9891	9895	9899	9903	9907	9911	9915	9918	9922	9925
9	9928	9931	9934	9937	9939	9942	9944	9947	9949	9951
2,0	9953	9955	9957	9959	9961	9963	9964	9966	9967	9969
2,1	9970	9972	9973	9974	9975	9976	9977	9979	9980	9980
2	9981	9982	9983	9984	9985	9985	9986	9987	9987	9988
3	9989	9989	9990	9990	9991	9991	9992	9992	9992	9993

Difüzyon problemlerinin çözümünde, ikinci Fick kanununun basitleştirilmiş özel hali kullanılırsa, difüzyon esnasında difüzyon katsayısı sürekli değişme yaptığından bir miktar hata yapılır. Bu nedenle, hesaplama ile bulunanlarla, verilenler arasında biraz sapma meydana gelebilir.

Yukarıdaki formülde yer değişiklikleri yapılarak, konu daha iyi bir şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{C_{(x,t)} - C_o}{C_s - C_o} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Bu değerin anlamı, belirli bir C konsantrasyonuna ulaşmak için mesafe ve zaman arasında, kök fonksiyonlu bir bağıntı mevcuttur. Yani, iki kat nüfuz derinliği için, dört kat sementasyon süresine ihtiyaç olduğu görülür. Difüzyon katsayısı sıcaklığın da bir fonksiyonu olduğu için, elbetteki bu değerler sementasyon sıcaklığına da bağlıdır:

$$D = D_o \exp (-Q/RT)$$

Burada Q büyüklüğü aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti ve T (K) olarak sıcaklıktır. D_o değeri, sıcaklığa bağımlı olmayan, fakat yanlış olarak difüzyon katsayısı olarak da ifade edilen frekans faktörüdür. [8]

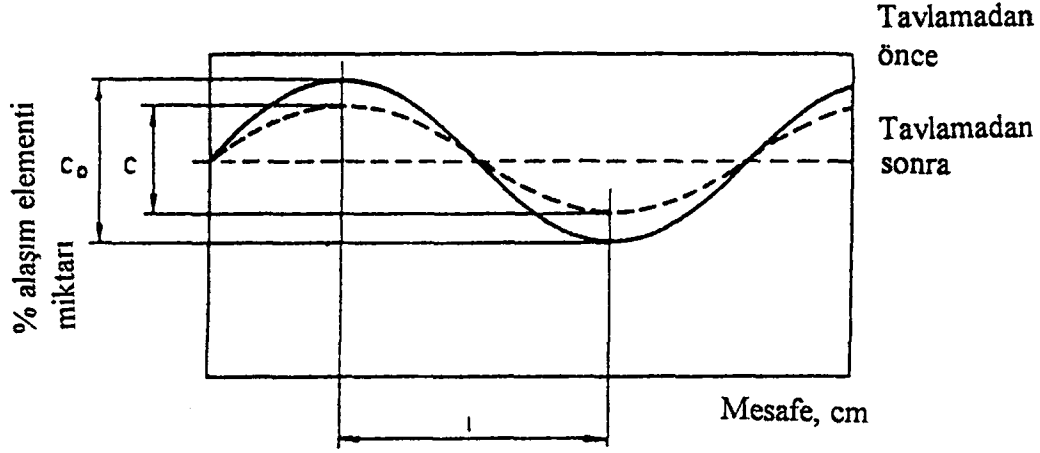
Tablo 2. 6 'da bazı malzemeler için yaklaşık D_o ve Q değerleri verilmektedir.

Tablo 2. 6. Bazı malzemeler için yaklaşık D_o ve Q değerleri

Yayınan element	Difüzyon (Yayınma) ortamı	D_o , (cm ² /sn)	Q(cal/mol)
Karbon	α - demiri	0,0079	18100
Karbon	γ - demiri	0,21	33800

2. 5. Homojenleştirme Tavlaması

Çelikte segrasyonlar (birikintiler) çok fazla veya az miktarda meydana gelirler. Oldukça yüksek bir sıcaklıkta uygulanan bir homojenleştirme tavlaması sonucu segregasyon oluşturan elementlerin konsantrasyonlarındaki farklılıklar azaltılabilir. Bu durum Şekil 2. 7 'de gösterilmektedir.



şekil 2. 7. Homojenleştirme tavlamaşıyla konsantrasyon değişiminin dengelenmesi

Söz konusu segregasyon elementlerinin konsantrasyonlarındaki değişimlerin sinüsoidal olması koşulu ile homojenleştirme tavlamaşı için gerekli datayı aşağıdaki bağıntudan saptamak mümkündür. [2]

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{D \cdot t \cdot \pi^2}{\lambda^2}\right)$$

Burada;

C = tavlama sonrası konsantrasyon

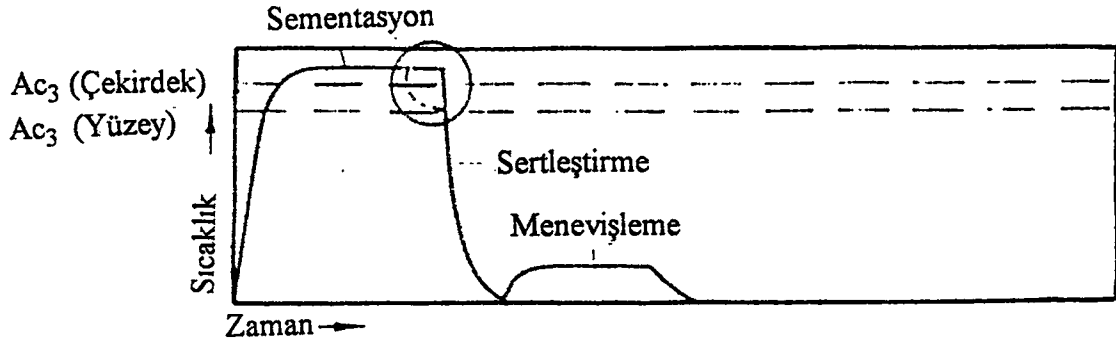
C₀ = tavlama öncesi konsantrasyon

2. 6. Sertleştirme Yöntemleri

Sementasyon sonrasında elik parçalar bir sertleştirme işlemine tabi tutulurlar. Sertleştirme işlemi parçanın yüzeyinde veya çekirdeğin veya beraberce her iki bölgesinde elde edilmesi istenen sertlik değerine bağlı olarak çeşitli şekillerde yapılır.

Aşağıda, sertleştirme yöntemleri 5 başlıkta incelenmiştir.

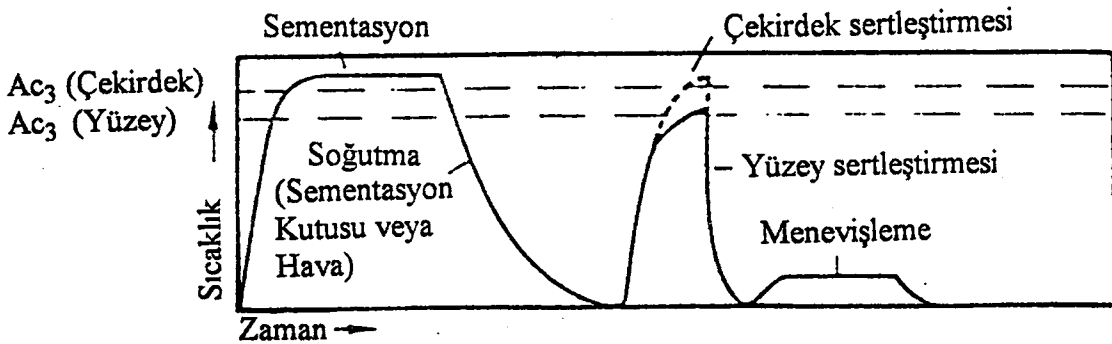
2. 6. 1. Direkt Sertleştirme



Şekil 2. 8. Direkt sertleştirme

Sementasyon sonrası, çelik parça sementasyon sıcaklığından direkt olarak uygun ortamda (yağ, su, sıcak banyo) soğutularak sertleştirilir ve menevişlenir. Şekil 2. 8 '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. 6. 2. Basit Sertleştirme



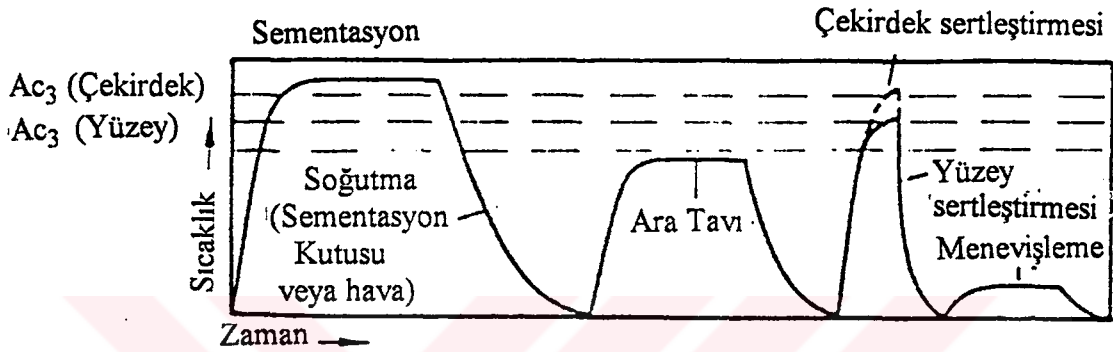
Şekil 2. 9. Basit sertleştirme

Sementasyon sonrası parça sementasyon fırınında veya havada soğumaya 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.

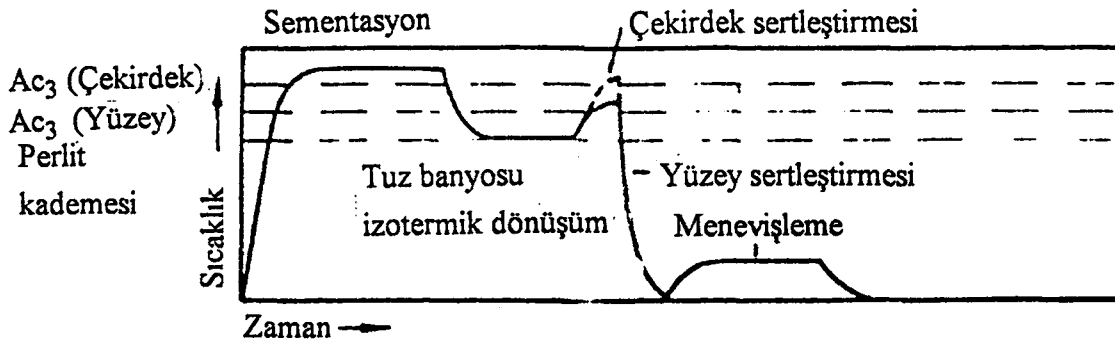
2. 6. 3. Basit Sertleştirme (ara tavından sonra)



Şekil 2. 10. Ara tavından sonra basit sertleştirme

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

2. 6. 4. Basit Sertleştirme (İzotermik dönüşümden sonra)

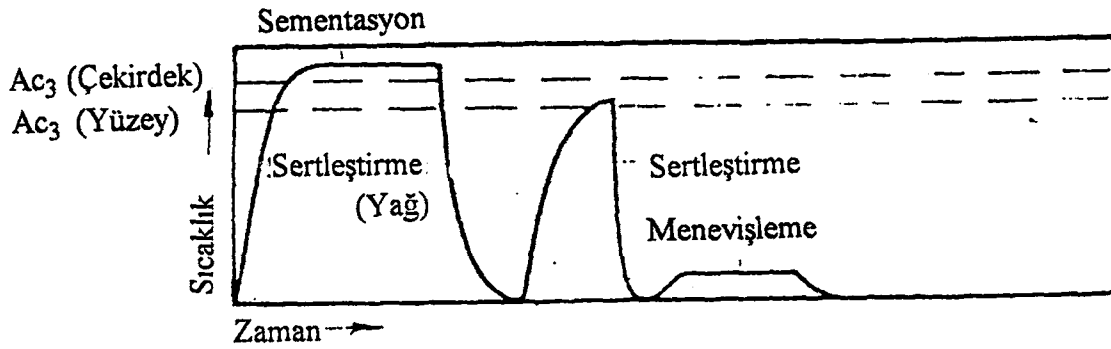


Şekil 2. 11. İzotermik dönüşümden sonra basit sertleştirme

Sementasyon sonrası, parçalar yüzey dönüşüm sıcaklığı altında (500-600 °C) perlit yapının izotermik dönüşümü tamamlanıncaya kadar bekletilir. Tekrar yüzey veya

yüzey-çekirdek sertleştirilmesi için gerekli sıcaklığa kadar ısıtılır, uygun ortamda yağ, su veya sıcak banyo soğutularak menevişlenir.

2. 6. 5. Çift Sertleştirme



Şekil 2. 12. Çift Sertleştirme

Sementasyon fırınından çıkan malzeme, direkt sertleştirilir. Daha sonra, yüzey dönüşüm sıcaklığına kadar ısıtılarak tekrar sertleştirilir ve menevişlenir. Bu yöntemle çok iyi neticeler elde edilebilir. Ancak, ard arda yapılan sertleştirmelerle parçada çarpılmalar olabilir.

2. 7. Menevişleme

Bu işlemin gayesi, sertliği bir miktar düşürerek sertleştirme sonrası çelik parçadaki gerilmeleri 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.

2. 8. Sementasyon Derinliğine, Yüzey Sertliğine ve Çekirdek Sertliğine Tesir Eden Faktörler

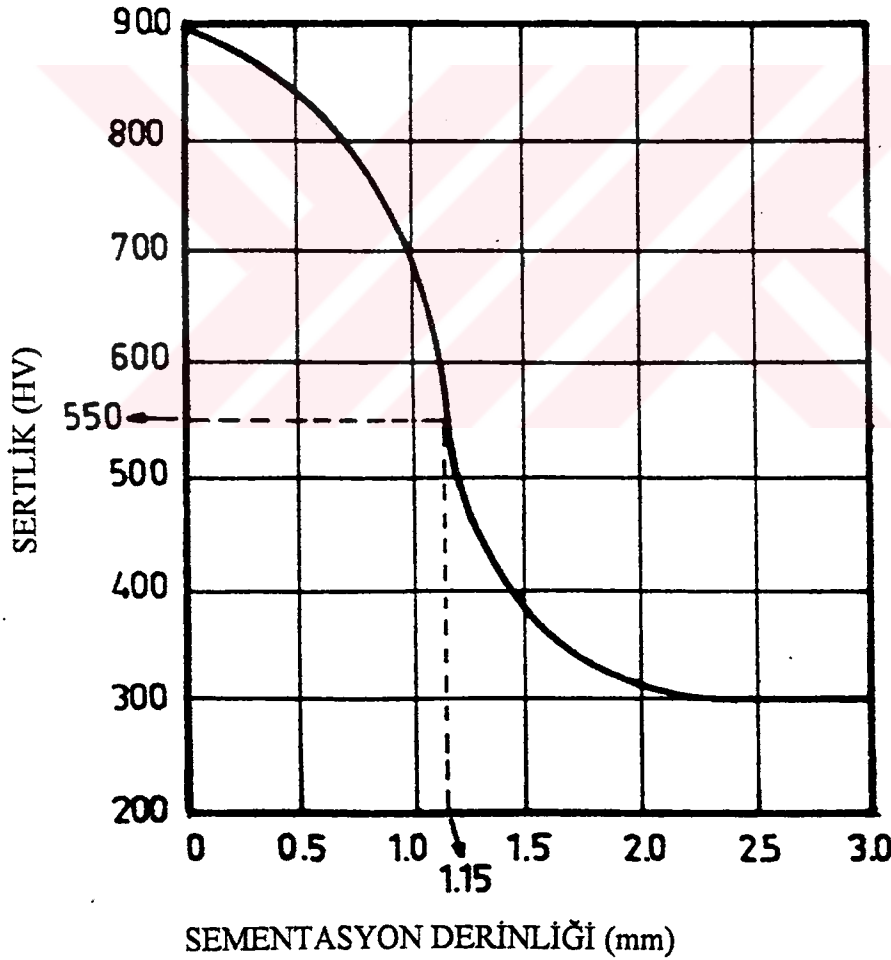
Bu bölümde, semente edilecek çelik cinsinin, parça ebatlarının, sementasyon sıcaklığı ve zamanının, sementasyon sonrası sertleştirme metodunun, sertleştirme sıcaklığı ve soğutma ortamının, sementasyon derinliğine, yüzey sertliğine ve çekirdek sertliğine olan etkileri incelenmiştir.

2. 8. 1. Sementasyon Derinliği

Sementasyon işlemi sonunda çelik parçası, yüzeyden belli bir derinliğe kadar karbon emmesi yapar. Bu derinliğe Sementasyon derinliği adı verilir.

Etkili sementasyon derinliği, yüzeyden 550 HV sertliğe kadar olan bölge olarak tarif edilebilir.

Aşağıda semente edilmiş bir çelik parçasındaki sertlik değişim eğrisi şematik olarak gösterilmiştir. Burada etkili sementasyon derinliği 1.15 mm olarak görölmektedir.



Şekil 2. 13. Sementasyon derinliğine bağlı olarak sertlik değişim eğrisi

Sementasyon derinliğinin, sementasyon sıcaklığı ve sementasyon zamanına bağlı olarak değişim değerleri Tablo 2. 7 'de görölebilir.

Tablo 2. 7. Sementasyon derinliğinin, sementasyon sıcaklığı ve sementasyon zamanına bağlı olarak değişim değerleri

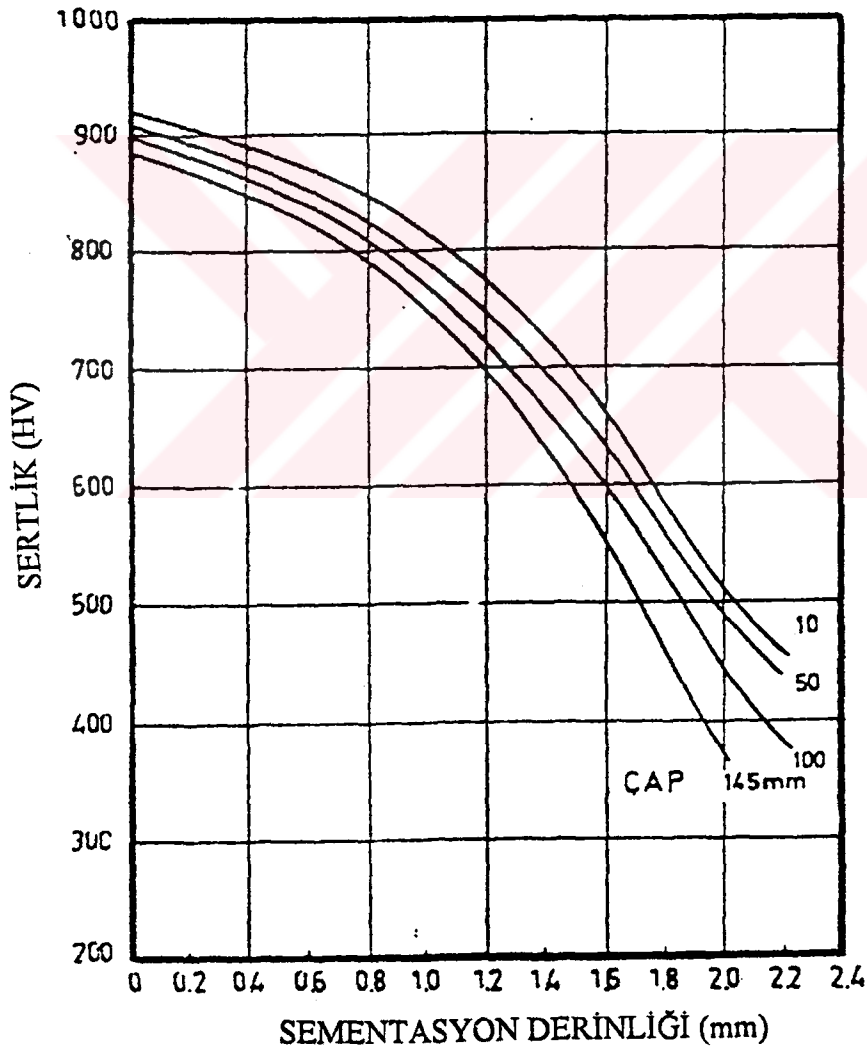
Sıcaklık Zaman (saat)	SEMENTASYON DERİNLİKLERİ (mm)				
	843 °C	871 °C	899 °C	927 °C	954 °C
1	0.38	0.46	0.53	0.63	0.74
2	0.53	0.63	0.76	0.89	1.04
3	0.64	0.79	0.94	1.09	1.30
4	0.74	0.89	1.07	1.27	1.50
5	0.84	1.02	1.19	1.42	1.68
6	0.91	1.09	1.32	1.55	1.83
7	0.99	1.19	1.42	1.68	1.98
8	1.04	1.27	1.52	1.80	2.11
9	1.12	1.35	1.6	1.90	2.24
10	1.17	1.42	1.70	2.01	2.36
11	1.22	1.50	1.78	2.11	2.46
12	1.30	1.55	1.85	2.21	2.59
13	1.35	1.63	1.93	2.29	2.69
14	1.40	1.68	2.01	2.39	2.79
15	1.45	1.73	2.08	2.46	2.90
16	1.50	1.80	2.13	2.54	2.97
17	1.52	1.85	2.21	2.63	3.07
18	1.57	1.90	2.29	2.69	3.18
19	1.63	1.96	2.34	2.77	3.25
20	1.68	2.01	2.39	2.84	3.33
21	1.70	2.06	2.46	2.90	3.40
22	1.75	2.11	2.51	2.97	3.51
23	1.78	2.16	2.57	3.05	3.58
24	1.83	2.18	2.62	3.10	3.66

Ayrıca sementasyon derinliği, parçanın ebadına ve sementasyon sonrası sertleştirme sıcaklığı ile soğutma ortamına da yakından bağlıdır.

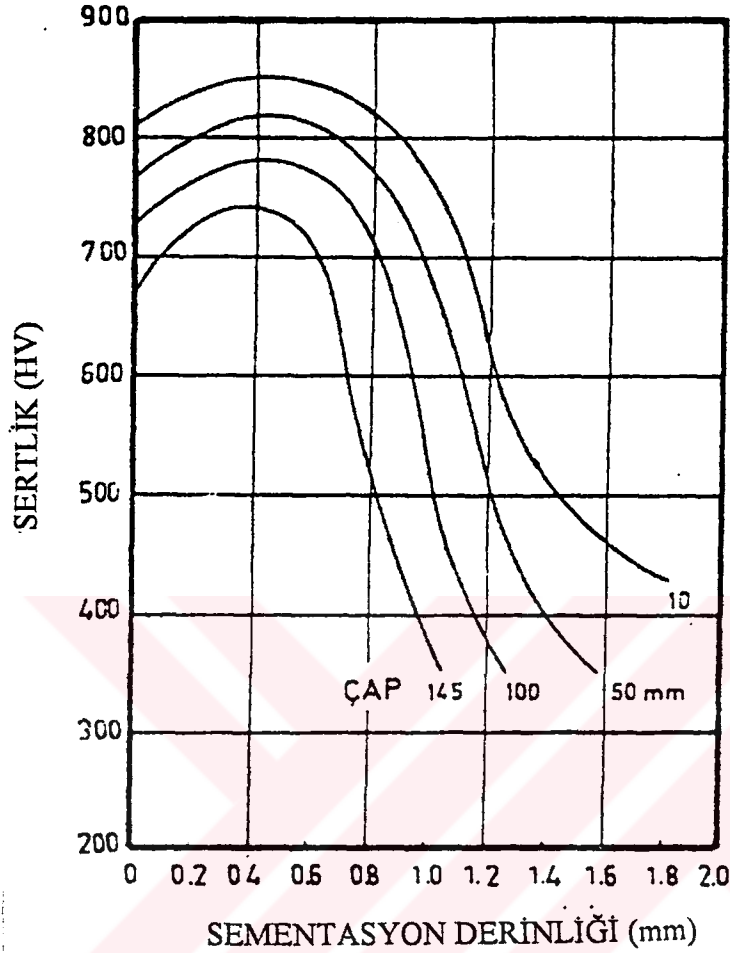
Aşağıdaki şekillerde, değişen ebatlı aynı kalitedeki çelik parçaların sementasyon derinliğinin, sertleştirme sıcaklığına ve soğutma ortamına bağlı olarak değişimi görülmektedir.

Sementasyon derinliği bir dereceye kadar çelik kalitesine de bağlıdır. İnce kesitli parçalarda bu faktör fazla önem taşımamasına karşılık, büyük kesitli parçalar için derin sertlik istendiği durumlarda, sementasyon zamanı açısından önem kazanır. Aşağıda buna örnek olarak, bir fikir vermesi amacıyla 100 mm çaplı, değişik kaliteli çelik parçalarda, 1.5 mm 'lik sementasyon derinliğinin sağlanabilmesi için gerekli sementasyon zamanları verilmiştir.

Çelik Kalitesi	21NiCrMo2	13NiCr6	17CrNiMo6
Sementasyon Zamanı (saat)	25	13	10



Şekil 2. 14. Değişik ebatlı 13 NiCr 6 sementasyon çeliğinin, 900 °C 'de kutu sementasyonu yapıldıktan sonra 780 °C 'den suda basit sertleştirilmesi ile elde edilen yüzey sertlik değişim eğrileri.



Şekil 2. 15. Değişik ebatlı 13 NiCr 6 sementasyon çeliğinin, 900 °C 'de kutuda semente edildikten sonra 820 °C 'den yağda basit sertleştirilmesi sonrası elde edilen yüzey sertlik değişimi eğrileri.

2. 8. 2. Yüzey Sertliği

Ostenit fazda çözünen karbon miktarı, yüzey sertliğini belirleyen kesin faktördür.

Yüzeydeki karbon miktarı % 0.80 ile % 1 arasında olabilecek şekilde kontrol edilmelidir. Yüzeyde karbon miktarının fazla olmasının (ötektoid üstü bölgede), iki önemli sebepten dolayı sakıncaları vardır. Birincisi, eğer çelik parça sementasyon sıcaklığından yavaşça soğutulursa, perlit tane sınırlarında sementit ağı teşekkül edecektir. Sonra yapılacak sertleştirme işleminde, özellikle parça A_{cm} çizgisinin altında bir sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra sertleştirilirse, sonuçta yapıda sementit ağı olduğu gibi kalacak ve bu bazı olumsuz neticeler verecektir. İkinci olarak yüzeydeki

karbon miktarı % 0.70 'i geçerse, sertleştirme sonrasında martenzit yapıda artık ostenit kalmasına ve sertliğin azalmasına sebep olacaktır. Özellikle yüksek alaşımlı çeliklerde yüzeydeki karbon miktarının % 0.80 'den fazla olmamasına dikkat edilmelidir.

Fazla sementede edilmiş çeliklerin sertleştirme sıcaklıklarının uygun seçilmesi ile, ostenit fazda çözünen karbon miktarı kontrol edilerek, sertleştirme sonucu artık ostenit miktarı azaltılarak, yüksek sertlik elde edilebilir. Fakat eğer, çelik yüzeyinde sementasyon sonucu uygun karbon konsantrasyonu sağlanırsa, maksimum sertlik için sertleştirme sıcaklığının fazla önemi kalmaz.[3]

2. 8. 3. Çekirdek Sertliği

İnce kesitli parçalarda karbürizasyon tabakasının özellikle hemen altındaki farkedilebilir sertlik artışı, malzemenin çekirdeğinin sertleştirme sonrası işlenmesi sırasında zorluk çıkarılabilir. Bu durumlarda çekirdek sertliği su verme sıcaklığının ayarlanması ile kontrol edilebilir. Bunun yanında çekirdek sertliğini en fazla kesit boyutu etkilemektedir.[9]

BÖLÜM 3. YORULMA DAYANIMI

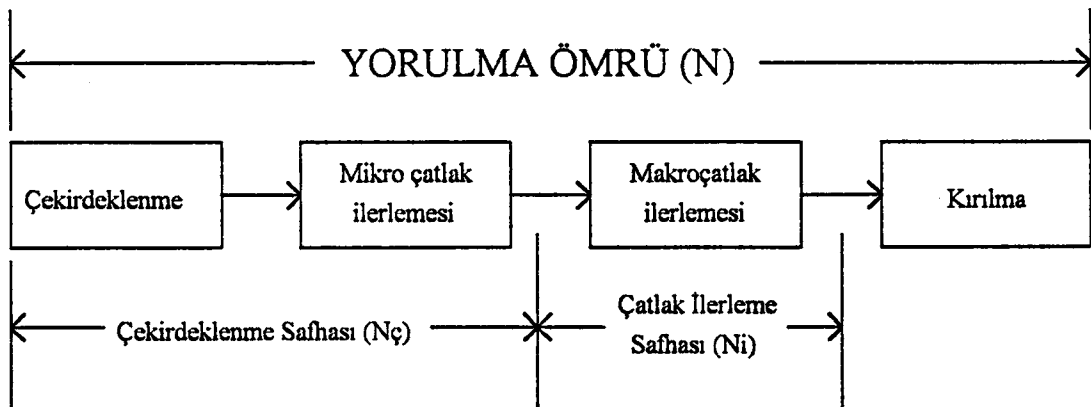
3. 1. Genel

Malzemenin tekrarlı gerilmeler veya birim şekil değiştirmeler sonucu kırılmasına "yorulma" adı verilir. Sonsuz sayıda tekrarlanmasına rağmen kırılmaya neden olmayan en yüksek gerilmeye de "yorulma dayanımı" denir.

Sementasyon çeliklerinin eğmeli yorulma dayanımına, sementasyon işleminden sonraki yüzey kalitesi, çekirdek sertliği ve mikroyapının etkisi oldukça fazladır. En küçük tane boyutuna sahip malzemenin yorulma dayanımı en fazla, fakat tane boyutunun etkisi kabuk bileşimine oranla daha azdır. Optimum yorulma dayanımı, en küçük kabuk derinliği ve düşük çekirdek sertliği ile elde edilebilir. Deney sonuçları, optimum yorulma dayanımı elde etmede bu iki parametrenin yani küçük kabuk derinliği ve düşük çekirdek sertliği üzerinde durulması gerektiğini göstermektedir.[10]

3. 2. Yorulma Kırılması

Yorulma ömrü kırılmaya kadar uygulanan tekrar sayısı ile verilir. Kırılmaya kadar geçen yorulma sınırı 3 safhada oluşur. Şekil 3. 1 'de kırılma da dahil yorulma ömrünün dört safhası şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 1. Yorulma ömrünün safhaları

- Yorulma çatlağının çekirdeklenmesi : Yerel ve tersinir olmayan plastik şekil değiştirmeler sonucu yüzeyde yüzey girintilerinin oluşması safhasıdır.
- Çatlağın yerel plastik deformasyon (kayma) bandında ilerlemesi: Çekirdeklenen çatlağın, yüksek kayma gerilmelerinin mevcut olduğu kayma bandı içinde ilerlemesi olup buna çatlak ilerlemesi safhası da denir.
- Çatlağın maksimum çekme gerilmesinin etki ettiği düzlemde ilerlemesi: Uzunluğu makro çatlak olarak kabul edilebilecek ölçüde olan çatlağın maksimum çekme gerilmesine dik düzlemde ilerlemesidir.
- Kırılma: Çatlak uzunluğunun kritik bir değere ulaşması sonucu, kalan kesidin kırılmasıdır. Bu kırılmaya "zoraki kırılma" adı da verilmekte olup, sünek veya gevrek kırılma biçiminde olabilir.

Yorulma hem çekirdeklenme hem de çatlak ilerlemesi safhalarında plastik deformasyon sonucu oluşur. Her safhaya karşılık gelen tekrar sayısı kolaylıkla saptanamaz. Kırılma, ömrü en son tekrarında oluşur. Kırılmaya kadar geçen yorulma ömrünün ilk iki safhası birleştirilerek bir basitleştirme yapılabilir.

$$N = N_{\text{Ç}} + N_i$$

Burada, N yorulma ömrü, $N_{\text{Ç}}$ ilk iki safha için geçen tekrar sayısı olup, ilk iki safhanın toplamı, çekirdeklenme safhası olarak kabul edilmiştir. N_i ise makro çatlak ilerlemesinde geçen tekrar sayısıdır.

3. 2. 1. Yorulma Kırılmasına Neden Olan Etkenler

Yorulma kırılmasına neden olan ve kırılmayı kolaylaştıran etkenler;

- Dış etkenler (şekil, yüzey durumu ve zorlama şekli)
- İç etkenler (malzemenin durumu)

olmak üzere 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.[11]

Deneyimlere göre yorulma kırılmalarının büyük çoğunluğu malzeme hatalarından dolayı değil, çentik etkisi yapan şekil ve yüzey etkileri, aşırı yükleme, montaj hataları, yetersiz bakım v.b. nedenlerle ortaya çıkmaktadır.

3. 2. 1. 1. Dış Etkenler

- Konstrüksiyonla ilgili çentikler : Örneğin faturalar, kama yuvaları, yağ delikleri v.b. gibi
- Kuvvetlerin doğrultu değiştirdiği yerler: Örneğin civata kafaları, krank millerinin dirsekleri v.b. gibi
- Kuvvet etki noktaları : Örneğin toleranslı veya sıkı geçmeler, noktasal veya çizgisel etkiyen kuvvetler.
- Talaşlı işlemler sırasında oluşan yüzey zedelenmeleri: Örneğin kalem izleri, yüzey çizikleri v.b. gibi
- Diğer yüzey zedelenmeleri: Örneğin; korozyona uğramış noktalar, aşınmış bölgeler, hadde veya dövme hataları v.b. gibi.

3. 2. 1. 2. İç Etkenler

- Çizgi halinde cüruflar, cüruf kalıntılarının yoğunlaştığı bölgeler : Örneğin karbürlerin tane sınırlarına çökelmeleri
- Her türden birikmeler (segregasyonlar)
- Yüzey kabarcıkları
- Döküm esnasında yada soğuk şekil değiştirme sırasında oluşan mikroboşluklar
- Tane sınırlarında oksitlenme veya tanelerin içinde oksijen miktarının artması.
- İç çatlak kümeleri: Haddelenmiş veya dövülmüş çeliklerde veya çeliklerin ark kaynağı dikişlerinde görülür.

- Normalize edilmiş çelikte aşırı heterojen yapı.
- Sertleştirilmiş çeliklerde yapı farklılıkları.
- Aşırı ısıtılmış yapı: Örneğin Yorulma dayanımını olumsuz yönde etkiler
- Bant veya ağ şeklinde yada bölge bölge yoğunlaşmış serbest karbürler: Örneğin sementasyon çeliklerinde görülebilir.
- Çeliklerin yüzeyinde karbon azalması (Dekarbürizasyon)
- Yayınma tabakaları ile ana malzeme arasında keskin geçişler:
- Sementasyon ile sertleştirilmiş çelik malzemenin yüzeyinde artık ostenit bulunması
- Sertleştirilmiş çeliklerde çeşitli nedenlerle yumuşak kalan bölgeler.
- Yük taşıyan kısımlarda yapılan dolgu kaynakları
- Kaynak dikişlerinde gaz boşlukları, gözenekleri, cüruf kalıntıları, çatlaklar bulunması,
- Kaynak dikişi dışındaki elektrot ateşleme izleri
- Soğuk şekil değiştirmiş küçük bölgeler:
- Talaşlı veya talaşsız şekil verme veya ısıl işlemlerden kaynaklanan iç gerilmeler

Bunların dışında yorulma hasarını kolaylaştıran veya doğrudan hasara neden olan başka malzeme veya yapı hataları da bulunabilir.

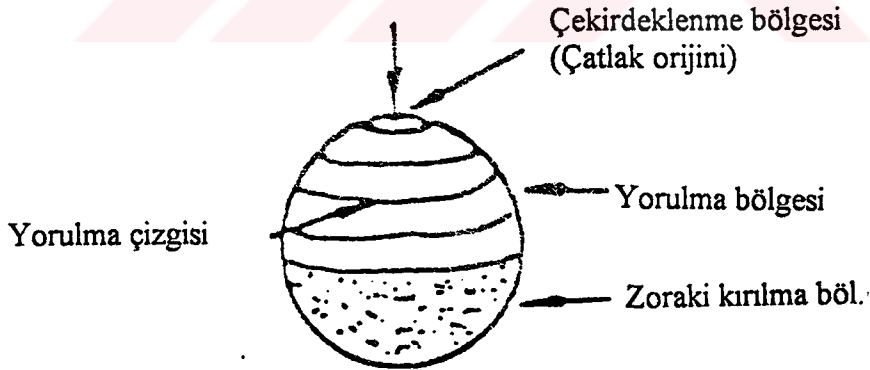
3. 3. Yorulma Çatlakları ve Oluşumu

Yorulma çatlağı genellikle malzeme yüzeyinde oluşur. Bunun nedenleri şu şekilde sıralanabilir.

- Bazı yükleme hallerinde (burulma, eğilme), gerilmeler yüzeyde en büyük değeri alır.
- Yüzey pürüzlülüğü gerilme yığılmalarına neden olur.
- Yüzeyler dış ortamdan etkilenir (Örneğin, çentik etkisi yapan korozyon çukuru oluşabilir.)
- Yüzeyde düzlem gerilme halinin olması nedeniyle burada plastik şekil değişimi daha kolaydır.

Çatlak, yüzeyde birden fazla noktada çekirdeklenebilir. Genlik gerilmesi arttıkça, bunların sayıları artar. Yorularak hasara uğramış elemanların kırılma yüzeyleri yorulmaya has 3 ayrı bölgeye sahiptir Şekil 3. 2.

1. Yorulma çatlağının çekirdeklendiği bölge
2. Yorulma çatlağının ilerlemesi sonucu oluşan bölge
3. Zoraki kırılma bölgesi



Şekil 3. 2. Yorulma yüzeyindeki bölgeler

Bu bölgelerin herbiri elemandaki yorulma hasarı ile ilgili belirli bilgiler verir. Yorulma çatlaklarının hemen hemen tümü parça yüzeyinde çekirdeklenir. Yorulma çatlağının çekirdeklendiği bölgenin dikkatli bir biçimde incelenmesi yorulma nedenini ortaya çıkarır. Yorulma çatlağının ilerlemesi sonucu oluşan bölge, makroskobik olarak düz ve pürüzsüzdür. Bu bölgede yüklemedeki değişimlerden dolayı oluşan ve gözle görülebilen yorulma çizgileri mevcuttur.

Zoraki kırılma bölgesinin büyüklüğü, uygulanan yükün büyüklüğü konusunda bilgiler verir.

3. 3. 1. Yorulma Çatlaklarının Görünümü

Yorulma çatlaklarının görünümü, özellikle çelikler için hemen hemen her olayda zorlamanın şekli ve seviyesi ile zorlamanın zamanla değişimi hakkında bilgiler verir.[11] [12]

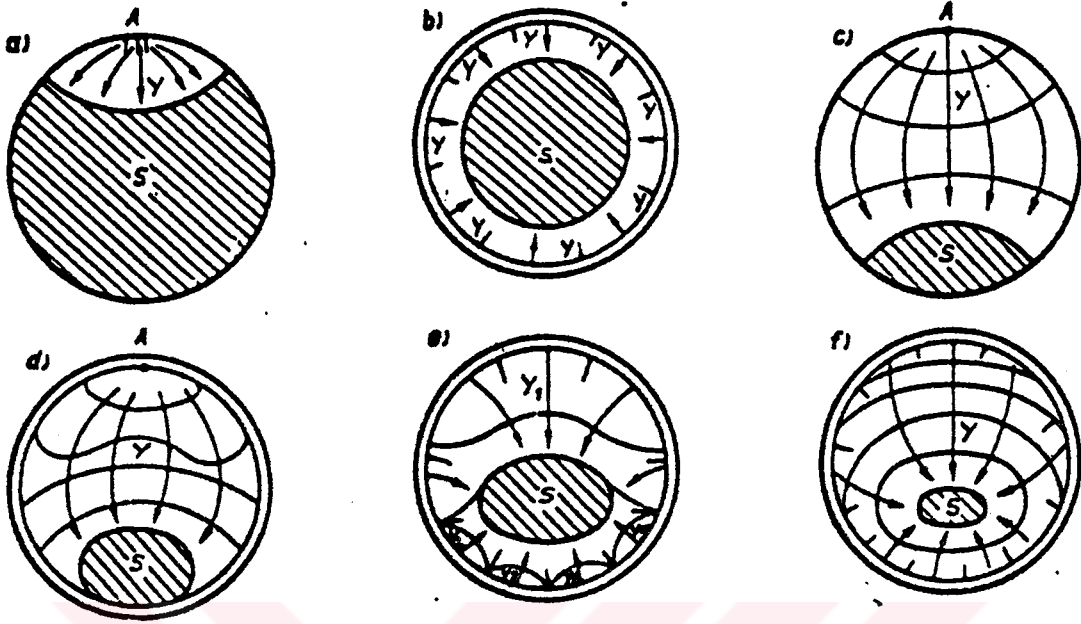
Kırılmanın başladığı yerler çoğunlukla saptanabilir. Yorulma kırılmasının ilerleyişinden de noktasal veya çevresel çentik etkilerinin var olup olmadığı anlaşılabilir. Çeliklerin çekme ve eğme zorlamalarında kırık yüzeyindeki görünümleri bakımından birbirinden tamamen farklı iki bölge ortaya çıkar.

- a) Düzgün ve mat yada bazen sürtünerek parlamış bölge: yorulma çatlakları
- b) Kaba kristalli, yarıklar içeren, kısmen kalıcı şekil değiştirmiş ve son çevrim sırasında zorunlu olarak ani kırılmış bölge: son kırılma yüzeyi

Yorulma çatlaklarında zorlamanın durdurulduğu aralıklar veya zorlama seviyesinin değişimi nedeniyle halkalar şeklinde duraklama çizgileri bulunabilir. Duraklama çizgileri yorulma kırılmasının kesin bir işaretidir ve bu çizgilerin şeklinden yorulma kırılmasının başlaması ile ilerlemesi hakkında bilgiler elde edilir.

3. 3. 2. Eğme Sonucu Oluşan Yorulma Çatlakları

Dönen parçaların eğilmesi sonucu oluşan yorulma çatlakları şekil 3. 3 'de gösterilmiştir. Şekilde Y: yorulma çatlakları, S: son kırılma yüzeyini ifade etmektedir.



Şekil 3. 3. 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.

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. Dönen parçaların eğilmesi sonucu oluşan yorulma çatlaklarının ilerlemesi, çekme zorlaması ve çift taraflı eğme zorlaması sonucunda oluşan çatlaklara göre daha hızlıdır. Kırık yüzeyin incelenmesiyle zorlama şekli, seviyesi ve çatlak oluşumu hakkında bilgiler elde edilerek, hasara öncelikle aşırı yükleme mi yoksa bir çentik etkisinin mi neden olduğu anlaşılabilir.

Şekil 3. 4 'de de çeşitli tipte eğme yorulmasından oluşan farklı yorulma kırılmaları gösterilmiştir.

Yorulma gerilimi Gerilme tipi	Gerilme konsantrasyonu yok		Düşük gerilme Konsantrasyonu		Yüksek gerilme Konsantrasyonu	
	Hafifçe yükleme	Cok fazla yükleme	Hafifçe yükleme	Cok fazla yükleme	Hafifçe yükleme	Cok fazla yükleme
1. Titreşimli bükme gerilmesi						
2. Alternatif (değişken) bükme gerilmesi						
3. Dönel eğme gerilmesi						

Şekil 3. 4. Çeşitli tipte eğme yorulmasından oluşan farklı yorulma kırılmalarının gösterilişi

Şekil 3. 5 'de ise yüksek gerilme konsantrasyonlu dönel eğilme gerilmeleri ve az miktarda aşırı yüklemenin neden olduğu 3 e türü bir kırılmayan örnek olarak dönel bir şaftta yorulma kırılması görülmektedir.



Şekil 3. 5. Dönel bir şaftta yorulma kırılması

3. 4. Çeliklerin Yorulma Dayanımları

Sonsuz sayıda yük tekrarını kırılmadan veya aşırı şekilde değişimine uğramadan taşıyabilen bir yapı elemanı, yorulmaya karşı dayanıklıdır denir. Bir yapı elemanın yorulma dayanımı 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. 4. 1. Çeliklerin Yorulma Dayanımının Belirlenmesi

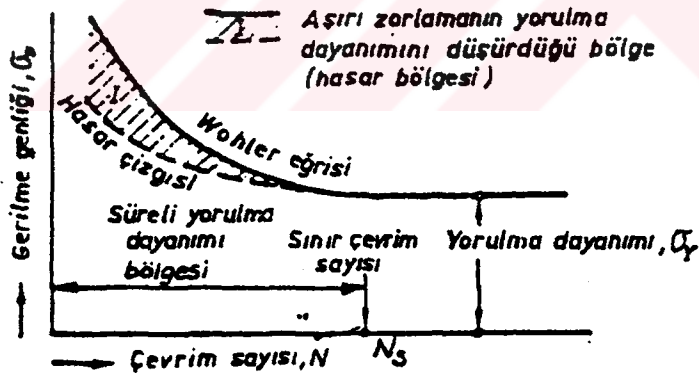
Çeliklerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi için eksene paralel doğrultuda mekanik veya elektrolitik olarak parlatılmış düzgün deney numuneleri kullanılır. Çentik duyarlılığının araştırılması için de, çentik katsayıları belirli çentikli deney numunelerinden yararlanılır. Günümüzde kullanılan yorulma deney mikinaları çekme, çekme-basma, çevresel eğme, ileri - geri eğme ve burma yanında bileşik zorlamaları da mümkün kılmaktadır.

Yorulma dayanımı normal olarak Wöhler yöntemiyle bulunur. Bu yöntemde, malzeme, biçim ve yüzey kalitesi bakımından tümüyle aynı olan deney numunelerinin herbiri aralıksız şekilde ve farklı seviyelerde zorlanarak kırılmanın olduğu çevrim sayıları belirlenir. Bir deney serisinde 6-10 adet numune gereklidir. Belirli bir deney numunesi için başlangıçta ayarlanan yorulma zorlaması deney sırasında değiştirilmez, yani tek kademeli yorulma deneyi sözkonusudur. Buna karşılık çok kademeli yorulma deneyinde zorlama sistematik olarak deney sırasında değiştirilir. Herbir 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 numunelerinde toparlanma olayı görülür ve böylece aralıksız olarak yapılan deneyden daha yüksek yorulma dayanımları elde edilir. Çentikli deney numunelerinde böyle bir toparlanma olayı görülmez.

Deneyin amacına, malzeme ve deney makinasına göre yük ve şekil değiştirme genlikleri kontrol edilir ve bu 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 ayrı gerilme genliği σ_g seçilir. İlk deney parçası üst gerilme genellikle akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek düzeyde zorlanır. Daha sonraki deney parçalarına 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 dağınıklar göstermiyor ise, Şekil 3-6 '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 sayıları da kullanılmaktadır. Bu nedenle σ_Y sembolü yanında sözkonusu sınır çevrim sayısı da verilmelidir. Örneğin sınır çevrim sayısının 10^6 olması halinde σ_Y (10^6) gibi.



Şekil 3. 6. 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" süreli yorulma bölgesi için sözkonusu olup yüksek çevrim sayılarında Wöhler eğrisi ile birleşir (Şekil 3-6) Hasar çizgisi yorulma dayanımı üzerinde bir zorlamanın, daha sonra aynı parçada yorulma dayanımına eşit

bir zorlamada kırılma meydana gelmemek koşuluyla en çok kaç çevrim sayısı taşınabileceğini 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.[13], [14]. Wöhler eğrisinin dağılma bantının güvenli olarak saptanabilmesi, [14] 'ye göre en az 40 ve [15] '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. [16] Ancak gerçek malzeme davranışlarını 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 [17], [18], [19]. Bu yöntemde, saptanması istenen büyüklüğün beklenen dağılma bölgesi - örneğin yorulma dayanımı veya sürekli yorulma bölgesinde belirli bir çevrim sayısına tekabül eden gerilme genliği - basamaklara bölünür. Deneyler beklenen dağılma bölgesinin ortasındaki bir zorlama ile başlar. Deney parçası kırılırsa, bir sonraki deney bir alt basamağın gerilmesi ile yapılır. Parça kırılmazsa bir üst 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. [18]. Bu arada her deney parçası sadece bir kez kullanılır. Sınır çevrim sayısı da dahil olmak üzere, çeşitli çevrim sayılarında dağılma bantının saptanması için en az 40 deney parçası gereklidir. Yöntem çentikli parçalar ve hasar çizgisine de uygulanabilir.

3. 4. 2. Çeliklerin Yorulma Ömrü

Bir deney numunesi veya yapı elemanının yorulma ömrü, yorulma dayanımından daha yüksek bir gerilmede kırılmanın oluştuğu çevrim sayısıdır. Yorulma ömrünün

gösterilmesinde ortalama gerilme σ_{ort} ve gerilme genliği σ_g , sözkonusu kırılma çevrim sayısına indis olarak eklenir.

Örneğin: $N(+8\pm14) = 2,2.10^6$ bir alta gösterimi ile $\sigma_{ort} = +8 \text{ kgf/mm}^2$ ve $\sigma_g = \pm14 \text{ kgf/mm}^2$ olan bir zorlamada, kırılmanın $2,2.10^6$ çevrim sayısında oluştuğu anlaşılmaktadır.



BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Sanayide yaygın olarak kullanılan SAE 8620 türü yüksek mukavemetli sementasyon çeliğinde sertlik derinliğinin yorulma mukavemetine etkisinin araştırıldığı bu deneysel çalışmada kullanılan numunenin seçilmesi, hazırlanması ve yorulma deneyinin uygulanma safhaları sırasıyla aşağıda belirtilmiştir.

4. 1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmada Asil Çelikte üretilmiş 22 mm çapındaki çubuklardan soğuk olarak haddelenerek 16 mm çapa getirilmiş SAE 8620 (21 NiCrMo2) sementasyon çeliği kullanılmıştır. Yüzey tabakası sert olan numunelerde (HV) kullanıldığından ve deney numunelerine de yüzey sertleştirme işlemi yapılacağından mukayese kolaylığı sağlaması için (HV) seçilmiş olup numunelerin dış kısımlarının sertliği 210 HV, iç kısımlarının sertliği 205 HV olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler her grup numuneden 3 tanesine, her bir numuneye 3 'er adet olmak üzere 9 ölçümün ortalamasıdır. 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 8620	0,16 0,24	0,40 0,60	0,60 0,90	0,15 0,35	0,040 en çok	0,040 en çok	0,15 0,35	0,40 0,70
Deney Numunesi	0,24	0,519	0,698	0,234	0,0277	0,0356	0,226	0,451

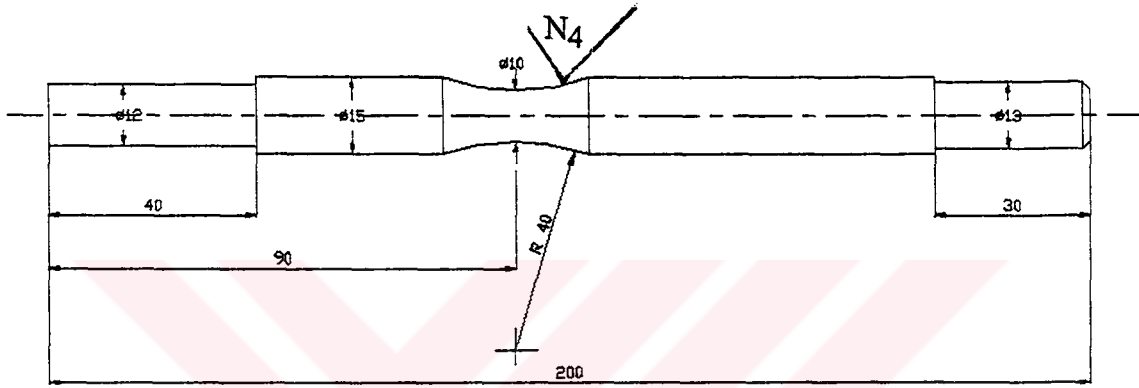
Spektral analiz neticesinde kullanılan malzemenin kimyasal bileşiminin SAE 8620 çeliğine ait standartlar aralığında yer aldığı görülmektedir.

4. 2. Numune Hazırlama

Uygun boyutlarda kesilen deney çubukları işlenmeden önce ısıtma işlemi esnasında çarpılmalarını önlemek için 910 °C 'de normalize edilmiştir. Sonra bilgisayarlı nümerik

kontrollü (CNC) torna tezgahında kopya torna için numune hazırlanmıştır. Kopya torna tezgahında yorulma numuneleri DIN 50113 'e uygun şekilde işlenmiştir (Şekil 4. 1). Numunelerin 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 ortalama pürüzlülük derinliğini göstermektedir.

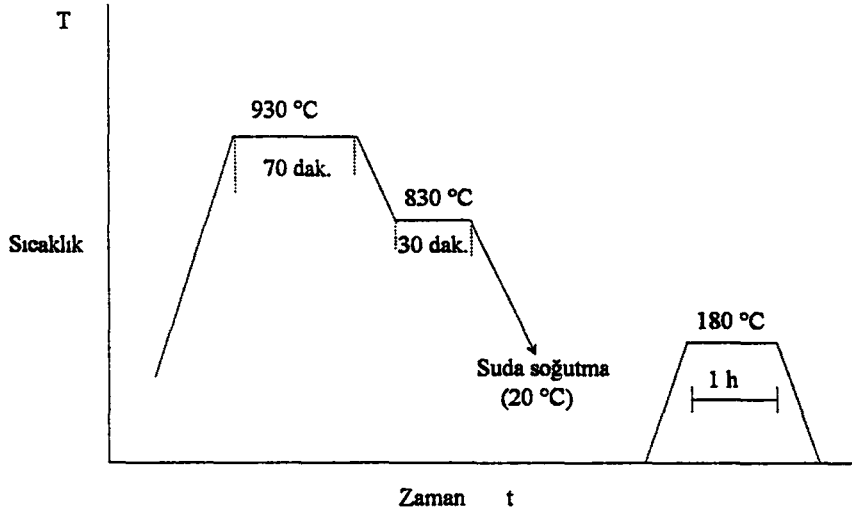
✓N4 (✓N7)



Şekil 4. 1. Yorulma Deney Numunesi

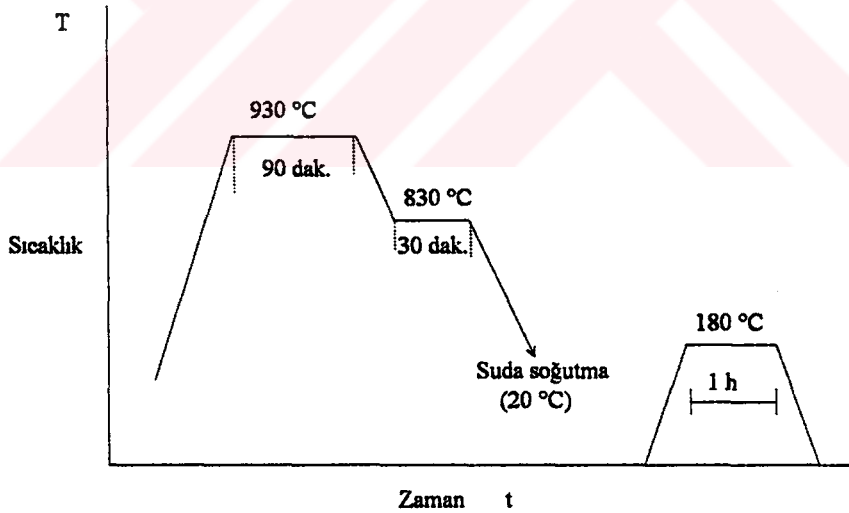
Daha sonra sementasyona tabi tutulan numuneler her bir grupta 16 adet numune olmak üzere iki gruba ayrılmıştır.

I. grup deney numuneleri % 0,8 C içeren gaz atmosferinde 930 °C 'de 70 dak. gaz sementasyonuna tabi tutulup, homojen bir iç yapı oluşturmak için 830 °C 'de 30 dak bekletilip daha sonra su verilerek sertleştirilmiş ve sertleştirme sonrası numunelerdeki gerilmeleri gidermek için menevişlenmiştir. Bu sementasyon işlemi neticesinde 0,68 mm. sertlik derinliği, 720 HV yüzey sertliği elde edilmiştir (Şekil 4.2). Yüzey sertliği markası OFICINE GALILEO MICROSCAN olan 10 gr ile 15 kg arasındaki düşük ağırlıklarda baskı uygulayarak Vickers metodu ile ölçüm yapabilen sertlik ölçme cihazında 196 gr yük kullanılarak ölçülmüştür. Her grup numuneden 3 tanesine her bir numuneye 3 er adet ölçüm yapılmış ve bunların ortalaması alınmıştır.



Şekil 4. 2. I. Grup numunelerin sementasyon işleminin şematik diyagramı

II. grup deney numuneleri de 930 °C 'de 90 dakika sementasyona tabi tutulup 830 °C 'de 30 dakika bekletilip su verilerek sertleştirilmiş ve menevişleme yapılmıştır. Bu işlem neticesinde de 0,78 mm. sertlik derinliği, 697 HV yüzey sertliği elde edilmiştir (Şekil 4.3.) Bu ısıt işlem sonucunda birinci grup deney numunelerine göre 0.1 mm daha fazla sertlik derinliği ve daha farklı yüzey sertliği elde edilmiştir.

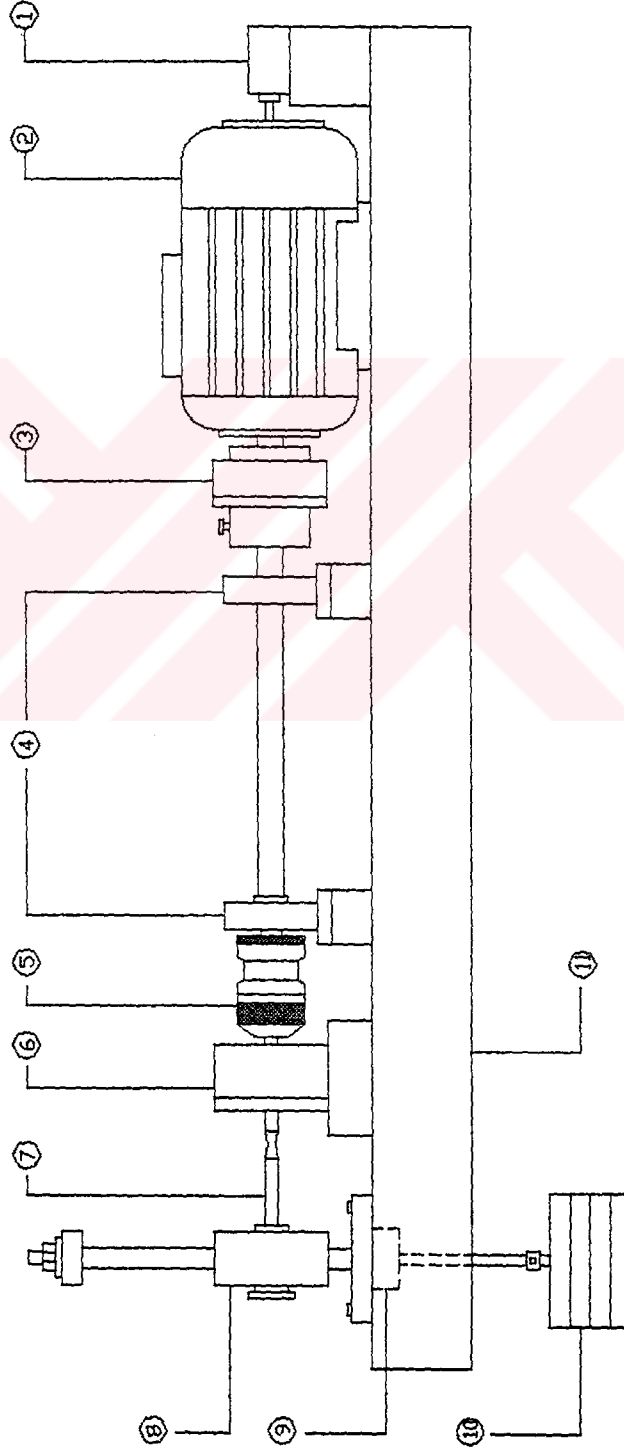


Şekil 4. 3. II. grup numunelerin sementasyon işleminin şematik diyagramı

4. 3. Yorulma Deneyinin Yapılması

Hazırlanan deney numunelerinin yorulma deneyleri, dönen eğmeli gerilmeli yorulma cihazında (Şekil 4. 4) yapılmıştır. Cihaz 1,1 KW gücünde, 2815 devir/dak. kapasiteye sahiptir. Bu cihaz numunelerin mukavemetleri ve boylarında dikkate alınarak özel olarak dizayn edilmiş olup farklı yüklerin uygulanmasına imkan sağlamıştır.

- | | |
|----------------------------|--------------------|
| 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 | |

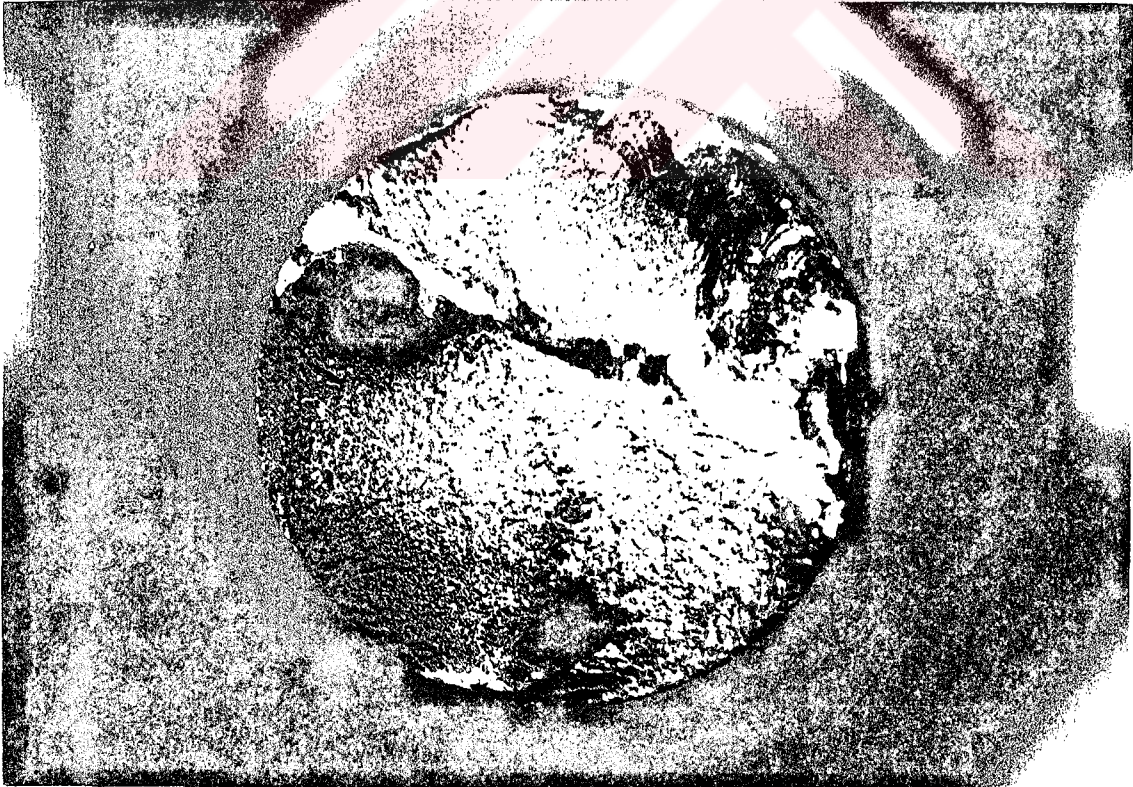


Şekil 4. 4. Eğmeli yorulma deney cihazının şematik görüntüsü

Numunelerin sadece sertlik derinliklerinin mukayesesi yapılacağından yorulma mukavemeti için $N = 10^6$ tekrar sonucu hasar oluşturmeyen genlik gerilmesi yorulma sınırı olarak kabul edilmiştir. $N \geq 10^6$ olduğu takdirde numuneler sonsuz ömürlü kabul edilebilir. Numunelerin yorulma mukavemetlerinin belirlenmesi için tatbik edilen yükler basamak metodu ile tesbit edilmiştir. 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 tablolarda gösterilmiştir. Her bir gruptan bir numunenin yorulma yüzey fotoğrafları X9 büyütülerek 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 semantasyon derinlikleri de görülebilmektedir (Şekil 4. 5, Şekil 4. 6). Tablo 4. 2 'de ısıt işlem görmemiş numunelerin devir sayısına bağlı olarak eğilmeli yorulma mukavemeti verilmiştir.

Tablo 4. 2. Isıl işlem görmeyen numunelerin yorulma deney sonuçları

$\sigma_{eg}(N/mm^2)$	670,052	384,650	345,233	326,241	310,094	287,776
N (Devir)	415	56828	198458	274980	1011750	1034150



Şekil 4. 5. Isıl işlem görmeyen $\sigma_{eg} = 326,241 N/mm^2$, $N = 274980$ devirde kopmuş numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafı

Şekil 4. 5 'de görüldüğü gibi yorulma dış cidardan üç noktadan başlamıştır. Daha sonra üst kenardaki yorulma çatlakları birbirleri ile birleşmiş alt kısımdaki yorulma çatlağıda merkeze doğru ilerleyince azalan kesitte yarı statik sünek bir kopma meydana gelmiştir.



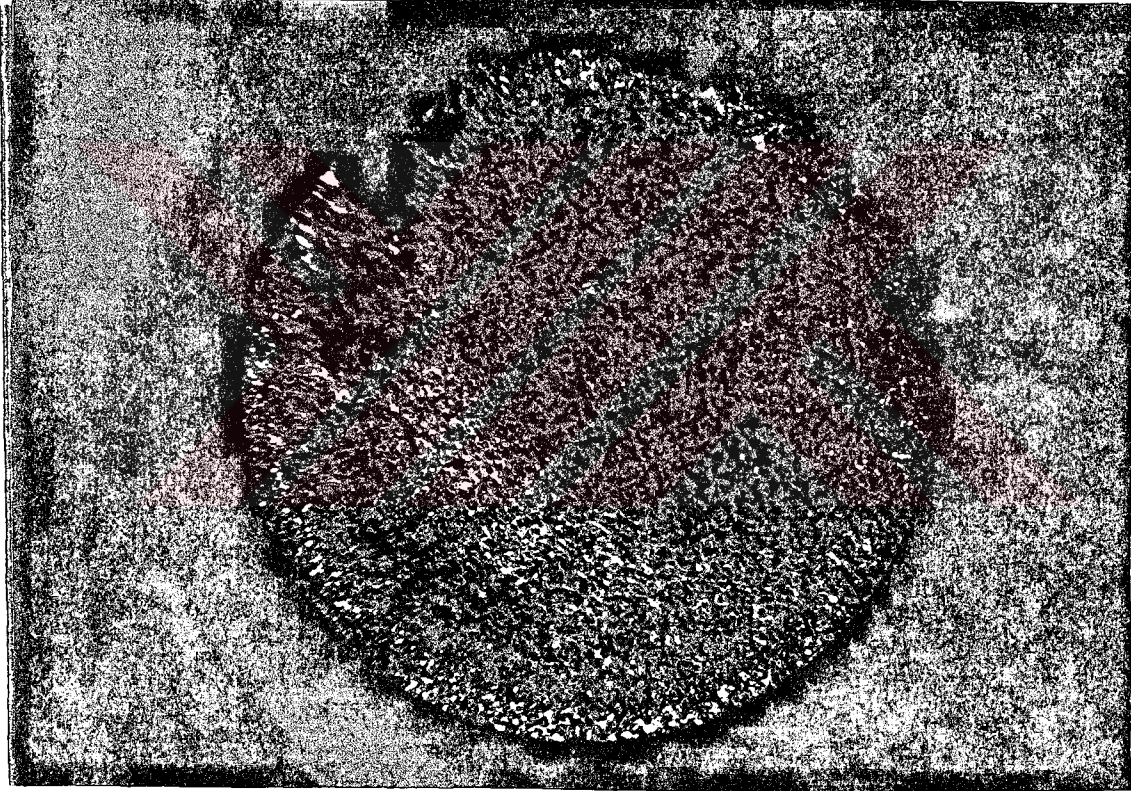
Şekil 4. 6. Isıl işlem görmeyen $\sigma_{eg} = 326,241 \text{ N/mm}^2$, $N = 274980$ devirde kopan numunenin parlatılmış % 2 'lik Nital ile dağlanmış X13,97 büyütülmüş fotoğrafı

Şekil 4. 6 'da ısıtıl 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 1. grup numunelerin devir sayısına bağı olarak eğilmeli yorulma mukavemetleri verilmiştir. Şekil 4. 7 ve Şekil 4. 8 'de ise 0,68 mm sementasyon derinliğine sahip bir numunenin yorulma yüzeyi ile sementasyon derinliğinin fotoğrafları verilmiştir.

Tablo 4. 3. I. grup (0,68 mm sementasyon derinliğine sahip) numunelerin yorulma deney sonuçları

$\sigma_{eg}(N/mm^2)$	1440,588	1343,234	1287,003	1218,137	1147,377	1083,269	878,505
N (Devir)	2149	8659	10045	18030	26965	162627	10 ⁶



Şekil 4. 7. 0,68 mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eg} = 1147,377 \text{ N/mm}^2$, $N = 26965$ devirde kopan numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafı

Şekil 4. 7 'de görüldüğü gibi üst kenarda yüksek anma gerilmesi neticesinde yerel çentik etkisi oluşmuş ve yorulma çatlağının olduğu bölge fotoğrafta açık renkli ve hilal şeklinde olup gevrek kırılmaya maruz kalmıştır. Koyu renkli kısım ise son kırılma yüzeyini göstermektedir. Son kırılma yüzeyinin koyu renkli olmasının nedeni burada yarı statik kopma olduğunu göstermektedir.



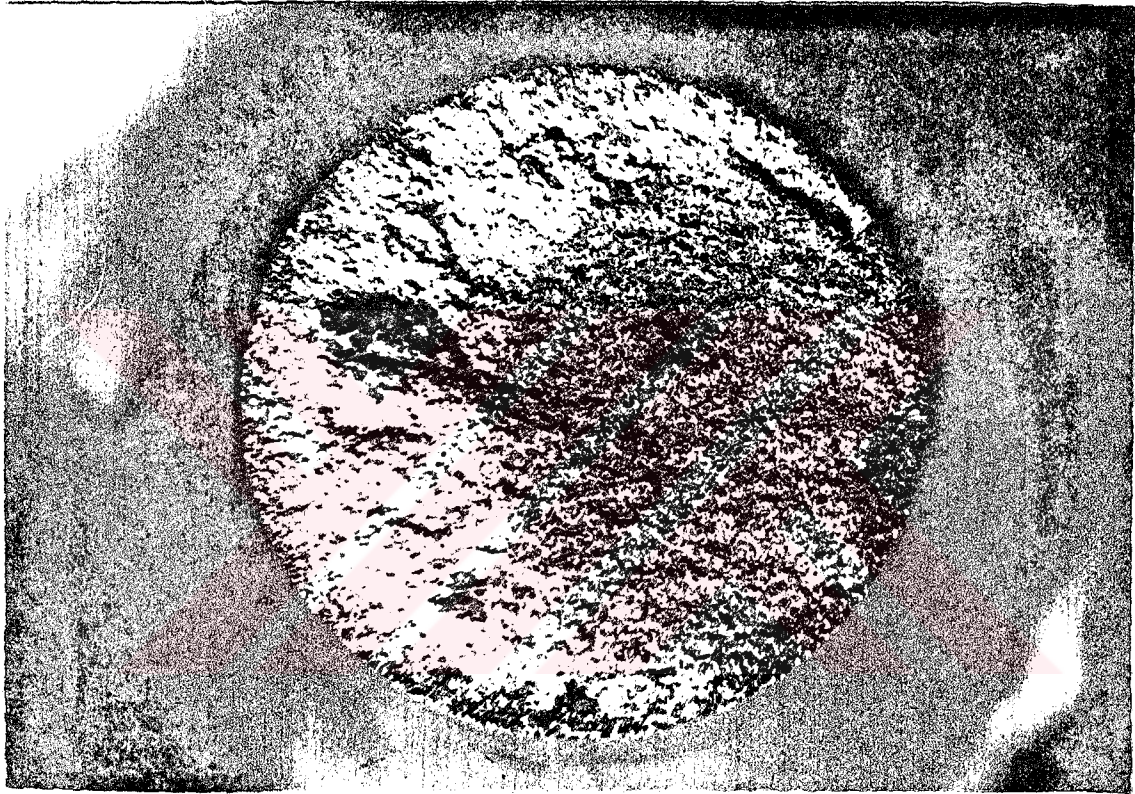
Şekil 4. 8. 0,68 mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eg} = 1147,377 \text{ N/mm}^2$, $N = 26965$ devirde kopan numunenin parlatılmış, % 2 'lik Nital ile dağlanmış X13,97 büyütülmüş fotoğrafı

Şekil 4. 8 'de görülen fotoğraf sadece numunenin homojen olmayan iç yapısını belirlemek için çekilmiş makro bir fotoğraftır. Burada numunenin karbon emdirilen kısımları yani sementasyon derinliği koyu renkli görülmektedir.

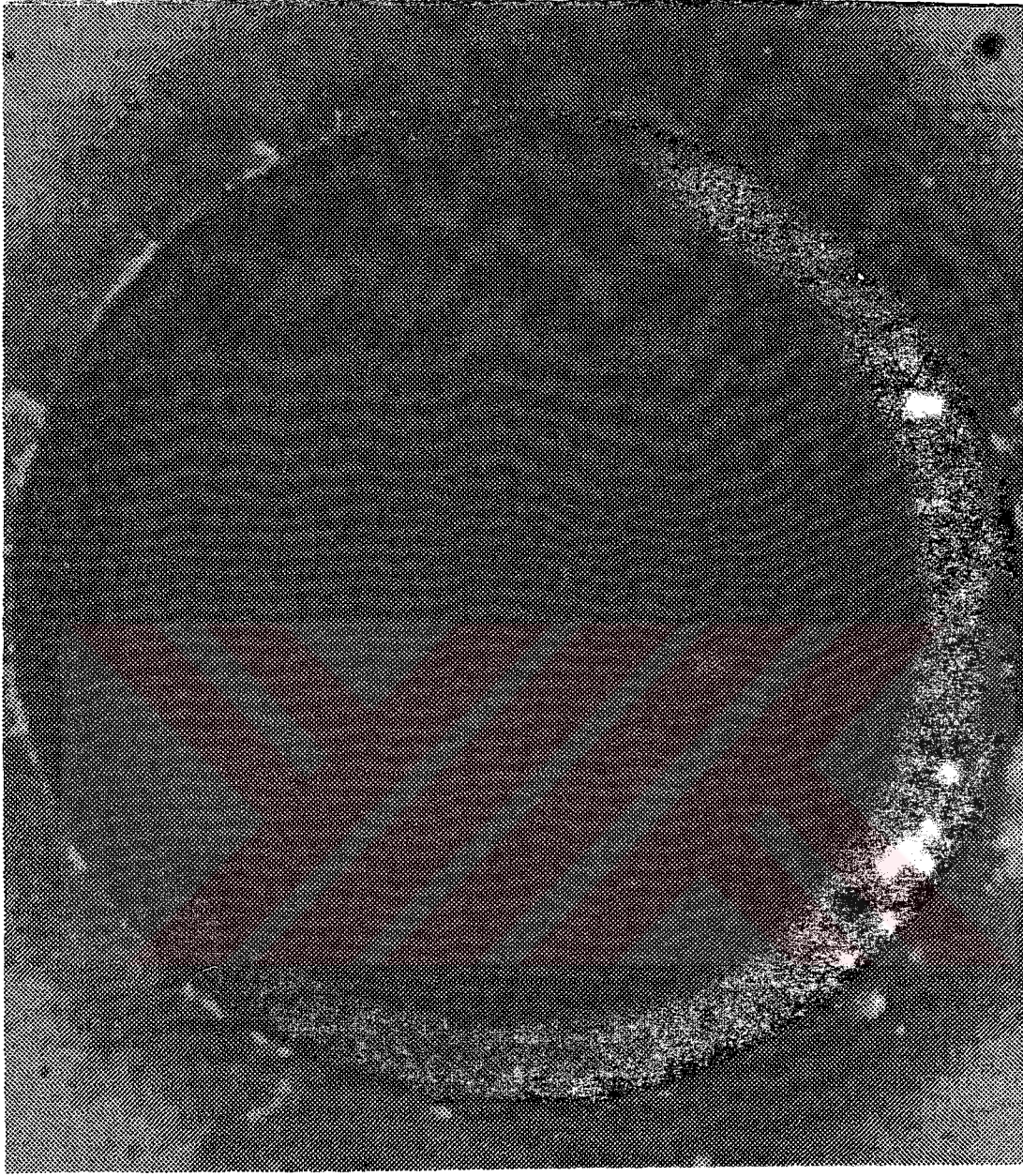
Tablo 4. 4 'de 0,78 mm sementasyon derinliğine sahip numunelerin devir sayısına bağlı olarak eğilmeli yorulma mukavemetleri verilmiştir. Şekil 4. 9 ve Şekil 4. 10 'da da 0,78 mm sementasyon derinliğine sahip bir numunenin yorulma yüzeyi ve sementasyon derinliği fotoğrafları verilmiştir.

Tablo 4. 4. II. grup (0,78 mm sementasyon derinliğine sahip) numunelerin yorulma deney sonuçları

$\sigma_{eg}(N/mm^2)$	1440,588	1343,234	1287,003	1218,137	1147,377	1083,269	954,856
N (Devir)	20641	31086	48501	127362	217002	515969	10^6

Şekil 4. 9. 0,78 mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eg} = 1147,377 N/mm^2$, $N = 217002$ devirde kopan numunenin X9 büyütülmüş fotoğrafı

Şekil 4. 9 'da görüldüğü gibi yine yüksek anma gerilmesi neticesinde üst kenarda yorulma çatlakları oluşmuş ve bu çatlaklar son kırılma yüzeyi olan koyu renkli bölgeye kadar ilerlemiştir. Yorulma çatlaklarının olduğu bölge yine hilal şeklinde görülmektedir. Maksimum çekme gerilmesi yorulma numunesinin dış cidarında oluşmaktadır. Bundan dolayı dış cidardaki herhangi bir hatanın olduğu noktadan yorulma başlamış zamanla yorulma çatlağı kesite hilal şeklinde yayılarak ilerlemiş, daha sonra kesit yükü taşıyamıyacak çapa ulaştığında yarı statik bir kopma meydana gelmiştir. Burada iç kısımda sünek dış kısımda ise gevrek bir kırılma oluşmuştur.



Şekil 4. 10. 0,78 mm sementasyon derinliğine sahip $\sigma_{eg} = 1147,377 \text{ N/mm}^2$, $N = 217002$ devirde kopan numunenin parlatılmış, % 2 'lik Nital ile dağlanmış X13,97 büyütülmüş fotoğrafı

Şekil 4. 10 'da parçanın dış cidarındaki koyu renkli kısım sementasyon derinliğini göstermektedir.

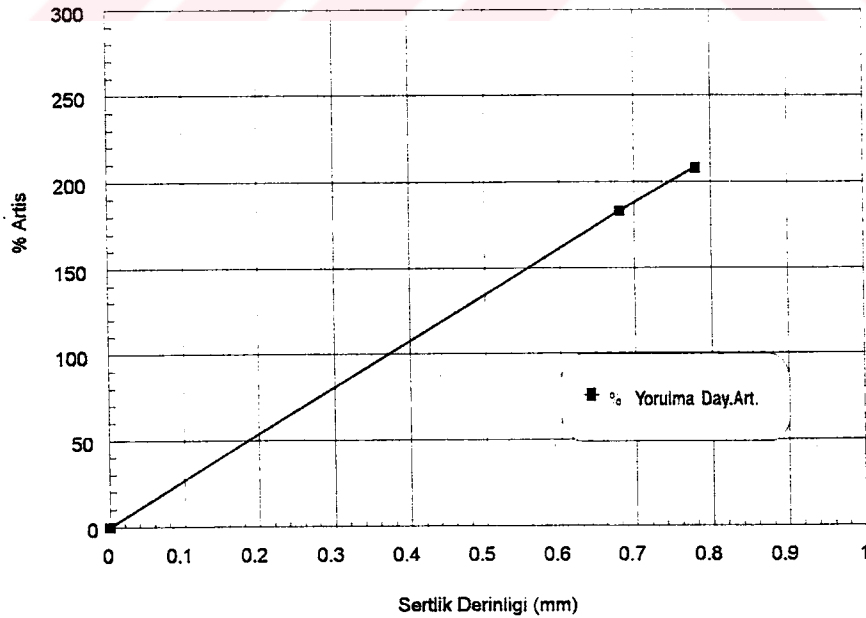
BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Spektral analiz neticesinde kullanılan malzemenin kimyasal içeriğinin SAE 8620 çeliğine ait standartlar içerisinde yer aldığı gözlenmiş olup artan sertlik derinliği ile yorulma dayanımındaki artış 10^6 çevrim sayısı baz alınarak Tablo 5. 1 'de görüldüğü gibi tesbit edilmiştir.

Tablo 5. 1. Sertlik derinliğine bağlı olarak yorulma dayanımındaki artış

Sertlik Derinliği (mm)	σ_D (kgf/mm ²)	% Artış
0	31,6	-
0,68	89,5	183,3
0,78	97,3	207,9

Yüzey sertleştirilerek dayanımda % 208 'e varan bir artış elde edilmektedir. Şekil 5. 1.



Şekil 5. 1. Sertlik derinliğine bağlı olarak yorulma dayanımındaki % artış

Bu çalışma sanayide yaygın kullanılan 8620 türü yüksek mukavemetli sementasyon çeliğinin pratik olarak ısıtılma işlem süresi - dayanım ilişkisini vermektedir. Dişliler, miller, zincir baklaları, rulmanlı yataklar, bir kısım ölçü ve kontrol aletleri, kesici takımlar ve kavrama parçaları gibi makina elemanları yüzey sertleştirme işlemlerine tabi tutularak yorulmaya maruz bölgelerde kullanılmaktadır.

Eğilme momentine maruz kalan parçaların yüzeyinde meydana gelen çekme gerilmesi, yüzey sertleştirmeden dolayı meydana gelen basma gerilmesi neticesinde azalmıştır. Çentik ilerlemesine sebep olan çekme gerilmesinin dışında basma gerilmesindeki artış yorulma ömrünü olumsuz etkilememiştir.

Gaz sementasyonu ile yapılan ısıtılma işlem süresine bağlı olarak artan sertlik derinliği ile yorulma dayanımında oldukça önemli artış sağlanmıştır. Deney numunesinin kırılma bölgesinin çapına bağlı olarak % 6,8 ve % 7,8 gibi bir sertlik derinliği ile yorulma dayanımında elde edilen % 208'e ulaşan bu önemli artış, yüzeylerinin sertleştirilmesi istenilen makina elemanları için sementasyon işlemi ve bunun neticesinde sertleştirmenin önemini açıkça ortaya koymaktadır.

BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Dönen eğme gerilmeli yorulma deney sonuçlarından, yorulma mukavemetinin sertlik derinliği ile yakından alakalı olduğu belirlenmiş olup uygun biçimlendirme ve uygun yüzey sertleştirme işlemleri ile numunelerin yorulma mukavemetinde önemli artış kaydedilmiştir.

Sementasyon işlemi ile numunelerin yüzeyinde meydana gelen çekme gerilmesindeki artış neticesinde yorulma mukavemeti de artmaktadır. Sementasyon derinliğinin numunenin çapı ile orantılı olarak artmasıyla yorulma mukavemetide belli oranda artmaktadır.

Bundan sonraki çalışmalarda değişik sementasyon yöntemlerinin, sertleştirme sıcaklığının ve soğutma ortamının sementasyon derinliğine ve yüzey sertliğine, bunlara bağlı olarak da yorulma mukavemetine etkisi karşılaştırmalı olarak araştırılabilir. Ayrıca;

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

KAYNAKLAR

- [1] CAN, A. Ç.; AKSOY, T., "Yüzeyi Sementasyonla sertleştirilen Parçalarda Sertleşen Kabuk ve Çekirdek Mikroyapılarının Yorulma Mukavemetine Etkisi", D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi, Malzeme ve İmalat Sempozyumu, DENİZLİ, 1987.
- [2] THELNİNG, K-E; TEKİN, A., "Çelik ve Isıl İşlemi" Bofors El Kitabı (Tercüme), İ.T.Ü. Metalurji Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 1984.
- [3] ASİL ÇELİK TEKNİK YAYINLARI 5 "Sementasyon Çelikleri", İstanbul, 1982.
- [4] ERYÜREK, B., "Hasar Analizi" İ.T.Ü Makina Fakültesi, İstanbul, 1993
- [5] TAUSCHER İ. H.; GÜLEÇ, Ş.; ARAN, A., "Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı (Tercüme), Tübitak MBEAE Matbaası, Gebze, 1983.
- [6] GIDERSLEEVE, M. J., "Relationship between Decarburisation and fatigue Strength of through hardened and carburising steels", Materials Science and Technology, Vol. 7., 1991.
- [7] Metals Handbook Volume 2, 8. Baskı American Society for Metals, 1964.
- [8] TOPBAŞ, M. ALİ, "Isıl İşlemler" Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1993
- [9] TARAKÇILAR, A. R.; CAN, A. Ç.; AKSOY, T., "Yüzeyi Sertleştirilen Çentikli parçalarda Sertlik Derinliğinin Yorulma Mukavemetine Etkisi", DE.Ü. Mühendislik Fakültesi, Malzeme ve İmalat Sempozyumu, Denizli, 1987.
- [10] PRESTON, S., "Bending fatigue Strength of carburising steel SS 2506", Materials Science and Technology, Vol. 7., 1991,
- [11] DITTSCHLAG, H.; TAUSCHER, H. Maschinenbautechnik (1955), s. 303...311

[12] RICHTER, G.; Der Machinanschaden (1956), s. 97...106.

[13] BÜHLER, H., ve W. SCHREIBER: Archiv f. Eisenhüttenwesen (1956), s. 201...209

[14] TGL 19336.

[15] EPREMIAN, E., ve R. F. MEHL: Nat. Advis. Comm. Aeron., Techn. Note 2719, (1952).

[16] WIRTHGEN, G.: IfL-Mitt. (1963), s. 74...81.

[17] BÜHLER, H., ve W. SCHREIBER: Archiv f. Eisenhüttenwesen (1957), s. 153...156.

[18] BÜHLER, H., ve W. SCHREIBER: Das Industrieblatt (1958), s. 69...73.

[19] RANSOM, I. T., ve R. F. MEHL: Amer. Soc. Test. Mater. Nr. 137 (1953), s. 3...24.

ÖZGEÇMİŞ

Hacı Emin SÖNMEZ 1959 yılında Niğde-Bor 'da doğdu. İlkokul, ortaokul ve Lise öğrenimini Bor 'da tamamladıktan sonra 1978 yılında ODTÜ Fen ve Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü 'nde öğrenime başladı. Hazırlık sınıfı ve bunu müteakip iki yıldan sonra buradan ayrılarak 1981 yılında A.Ü. Ziraat Fakültesi Tarımsal Mekanizasyon Bölümünde öğrenime başladı. 1985 Haziran döneminde Ziraat Müh. olarak mezun oldu. 1986 yılında başlayan askerlik görevini yedek subay olarak tamamladıktan sonra Haziran 1988 'de Sakarya Meslek Yüksek Okulu 'nda Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. 1994 Şubat döneminde SA.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisansa başladı. Evli ve iki çocuk babası olup halen SA.Ü. Sakarya Meslek Yüksek Okulu Makina Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.