



TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SERTLEŞTİRİLMİŞ SOĞUK-İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN YORULMA
DAYANIMLARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Mak. Müh. Cem S. ÇETİNARSLAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Yöneticisi: Prof. Dr. H. Erol AKATA
EDİRNE-1997

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SERTLEŞTİRİLMİŞ SOĞUK-İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN YORULMA
DAYANIMLARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

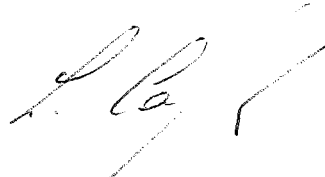
Mak. Müh. Cem S. ÇETİNARSLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı


Bu tez 24.10.1997 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Tarafından Kabul Edilmiştir.



Prof. Dr. H. Erol AKATA



Prof. Dr. Levon J. ÇAPAN



Doç. Dr. Remzi ASLAN

**TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SERTLEŞTİRİLMİŞ SOĞUK-İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN YORULMA
DAYANIMLARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Cem S. ÇETİNARSLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Yöneticisi: Prof. Dr. H. Erol AKATA

EDİRNE - 1997

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

	ÖNSÖZ	i
	ÖZET	ii
	ABSTRACT	iii
	KULLANILAN SEMBOLLER	iv
	BÖLÜM 1. ÇELİKLERİN ISIL İŞLEMLERİ	
1.1.	Giriş	1
1.2.	Tam Tavlama	1
1.3.	Küreleştirme	2
1.4.	Gerilme Giderme Tavlama	4
1.5.	Ara Tavlama	4
1.6.	Normalleştirme (Normalizasyon)	5
1.7.	Kaba Tane Tavlama	7
1.8.	Homojenleştirme (Difüzyon Tavlama)	7
1.9.	Sertleştirme (Su Verme)	7
1.10.	İzotermal Dönüşüm Diyagramları	10
1.11.	Yüzey Sertleştirme	17
1.11.1.	Sementasyon	17
1.11.2.	Nitrürasyon	19
1.11.3.	Karbonitrürasyon	19
1.11.4.	Alevle Sertleştirme	20
1.11.5.	İndüksiyonla Sertleştirme	20
1.11.6.	Yüzey Sertleştirme İşlemlerinin Karşılaştırılması	20
1.12.	Artık Gerilmeler	21
	BÖLÜM 2. TAKIM ÇELİKLERİ	
2.1.	Giriş	23
2.2.	Takım Çeliklerinin Özellikleri	23
2.2.1.	Sertleşme Derinliği	24
2.2.2.	Sertleşmede Deformasyon Durumu	24
2.2.3.	Tokluk	24
2.2.4.	Aşınma Dayanımı	24
2.2.5.	Kızıl Sertlik	25

2.2.6.	Talaşlı İşlenebilirlik	25
2.2.7.	Karbonsuzlaşmaya Dayanıklılık	25
2.3.	Takım Çeliği Türleri	26
2.3.1.	Suda Sertleşebilen Takım Çelikleri	27
2.3.2.	Şok Dirençli Takım Çelikleri	28
2.3.3.	Soğuk İş Takım Çelikleri	28
2.3.4.	Sıcak İş Takım Çelikleri	29
2.3.5.	Yüksek Hız Çelikleri	30
2.3.6.	Kalıp Çelikleri	31
2.3.7.	Özel Amaçlı Takım Çelikleri	31
BÖLÜM 3. YORULMA		
3.1.	Giriş	33
3.2.	Yorulma Hasarının Oluşum Safhaları	35
3.3.	Yorulmaya Etki Eden Faktörler	39
3.3.1.	Korozyon Etkisi	40
3.3.2.	Sıcaklık	40
3.3.3.	Yük Tekrar Frekansı	41
3.3.4.	Yükleme Şeklinin Wöhler Eğrisine Etkisi	41
3.3.5.	Boyut Faktörü	42
3.3.6.	Yüzey İşleme Faktörü	42
3.3.7.	Gerilme Genliğinin Etkisi	43
3.3.8.	Ön Gerilmenin Etkisi	43
3.3.9.	Yüzey Sertleştirme İşlemlerinin Etkisi	43
3.3.9.1.	Yüzeyin Dövülmesi	44
3.3.9.2.	Elektrolitik Kaplama ve Metal Püskürtme	44
3.3.10.	Gerilme Yığılmaları Etkileri	44
3.4.	Wöhler Eğrileri	46
3.4.1.	Wöhler Eğrilerinin Bölgelerinin Açıklanmaları	49
3.5.	Smith Diyagramları	50
BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA		
4.1.	Giriş	53
4.2.	Mekanik Deneyler	55
4.2.1.	Çekme Deneyleri	55
4.2.2.	Yorulma Deneyleri	57
4.3.	Sonuç ve Değerlendirme	62
KAYNAKLAR		
ÖZGEÇMİŞ		
		64

ÖNSÖZ

Isıl işlemler, çelikler ve yorulma malzeme biliminin önemli konulardır. Bu çalışmada, bu üç konu birleştirilerek, ısıl işlem öncesi ve sonrası bir takım çeliğinin çekme ve yorulma değerleri incelenmiştir. Konu geniş olduğu için, yapılması düşünülen incelemelerin bir kısmı yapıp teze dahil edilmiş, geri kalan kısmı ise ileriki çalışmalara bırakılmıştır.

Bu konuda yaptığım çalışmaları büyük bir titizlikle yönlendiren ve her konuda desteğini esirgemeyen Hocam Sayın Prof. Dr. H. Erol AKATA'ya, en başta Araş. Gör. M. Tahir ALTINBALIK ve Araş. Gör. Alper ZENGİN olmak üzere, deneyler kısmında yardımcı olan Araş. Gör. Metin AYDOĞDU'ya ve emeği geçen tüm meslektaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Eylül 1997

Mak. Müh. Cem S. ÇETİNARSLAN

ÖZET

Bu tezde, ısıl işlemler ve takım çelikleri hakkında kısaca bilgi verildikten sonra, yorulma olayı ve yorulma kırılmasının oluşumu, yorulma dayanımına ilişkin genel tanımlamalar, yorulma olayında çok kullanılan Wöhler ve Smith diyagramları açıklanmıştır. Deney malzemesi olarak SPEZIAL K (X210Cr12) soğuk iş takım çeliği seçilmiştir. Deneyler, malzemenin satın alınmış ve sertleştirilerek 600°C'de temperlenmiş çekme ve yorulma deney parçaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tezin sonunda, deneysel verilerin ışığında, elde edilen sonuçlar Tablo ve Grafikler ile verilmiş ve yorumlanmıştır.

ABSTRACT

In this thesis; after it was given a short information on heat treatments and tool steels, fatigue phenomena and fatigue fracture development, Wöhler and Smith diagrams in relation to fatigue strength was explained. SPEZIAL K (X210Cr12) cold work tool steel was chosen as experimental material. Experiments were carried out by using tensile and fatigue specimens. Some of these specimens were tempered at 600 °C upon hardening.

Finally, the results obtained in the light of experimental data were shown and interpreted by use of tables and graphics.

KULLANILAN SEMBOLLER

σ, τ : Gerilme

σ_{em}, τ_{em} : Emniyet Gerilmesi

σ_G, τ_G : Gerilme Genliği

$\sigma_{üst}, \tau_{üst}$: Üst Gerilme

σ_{alt}, τ_{alt} : Alt Gerilme

σ_{ort}, τ_{ort} : Ortalama Gerilme

t : Zaman

σ_Y, τ_Y : Yorulma Dayanımı

σ_{ϕ} : Çekme Dayanımı

n : Tekrar Sayısı

T : Gerilme Tekrarı

N : Yorulma Ömrü

R : Gerilme Oranı

b_0 : Boyut Faktörü

b_1 : Yüzey Kalite Faktörü

$\beta_{\phi en}$: Çentik Katsayısı

σ_{ak} : Akma Gerilmesi

$\sigma_{artık}$: Artık Gerilme

σ_{akgg} : Gerilme Giderme Sonrası Akma Gerilmesi

σ_{akyk} : Yeniden Krisalleşme Sonrası Akma Gerilmesi

$\sigma_{akn,tt}$: Normalizasyon veya Tam Tavlama Sonrası Akma Gerilmesi

BÖLÜM 1. ÇELİKLERİN ISIL İŞLEMLERİ

1.1. GİRİŞ

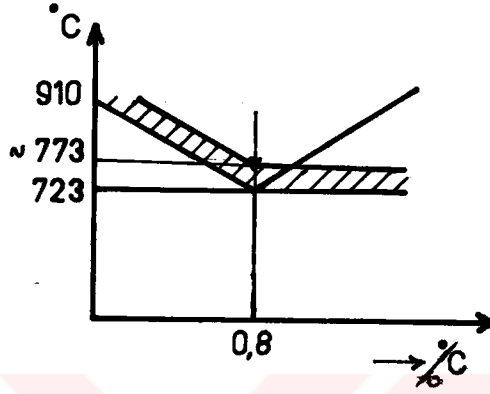
Isıl işlem, " bir metal veya alaşıma katı halde, arzu edilen özellikleri elde edebilmek amacıyla uygulanan, zamana bağlı, ısıtma ve soğutma işlemlerinin bir arada uygulanması " olarak tanımlanabilir. Bütün çelik ısıtma işlemleri ostenitin dönüşümü ile ilgilidir. Ostenitin dönüşümü sonucunda ortaya çıkan ürünlerin özellikleri ve görünüşleri, herhangi bir çeliğin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirler. Çelik ısıtma işleminde ilk aşama, malzemeyi ostenit elde etmek üzere belirli bir kritik bölgedeki veya bunun üzerindeki bir sıcaklığa ısıtmaktır. Çoğu zaman, istenilen sıcaklığa kadar olan ısıtma hızı, ısıtma işlem çevrimindeki diğer faktörlerden daha az önemlidir. Buna karşılık önceden büyük oranda soğuk şekil değiştirmiş, dolayısıyla da iç gerilmeler etkisi altındaki malzemeler, iç gerilmelerden azaltılmaları için çarpılmaları önlemek amacıyla daha yavaş ısıtılmalıdır. Ayrıca kalın ve ince kesitlere sahip değişik kesitli parçalar, mümkün olduğu oranda ve ısıtma gerilmeleri çarpılmaları azaltmak amacıyla, ince kesitli kısımları daha yavaş olacak bir biçimde ısıtılmalıdır. Genellikle herhangi bir hasara yol açmamak için, ısıtma hızı mümkün olabilen en düşük seviyede tutulmalıdır [1].

1.2 TAM TAVLAMA

Bu işlem çeliği belirli bir sıcaklığa kadar ısıtmak ve dönüşüm sıcaklığından çok yavaş geçecek şekilde, tercihan fırında veya bir izolasyon maddesi içinde soğutmaktan ibarettir. Yavaş soğutma genellikle düşük sıcaklıklara kadar devam ettirilir. İşlemin amacı tane küçültme, yumuşatma, elektriksel ve manyetik özellikleri iyileştirilmesi ve bazı durumlarda talaşlı işlemin kolaylaştırılmasıdır. Fırında soğutmada sıcaklık çok yavaş azaldığı için tam tavlama çok yavaş bir işlemdir. Dolayısıyla da Fe - Fe₃C denge diyagramına en yakın mikro yapılar elde edilir.

Tam tavlama sıcaklıkları ötekoit altı çeliklerde A₃ sıcaklıklarının 35 - 40 °C üzerinde olacak şekilde seçilir (Şekil 1.1). A₃ sıcaklığının hemen üzerinde çeliğin daha önceki geçmişi nedeniyle % 100 ostenit dönüşümü gerçekleşmeyebilir. Önerilen aralığın üzerine ısıtılması halinde ise

% 100 ostenit dönüşümü gerçekleşmeyebilir. Önerilen aralığın üzerine ısıtılması halinde ise oluşan küçük ostenit taneleri birleşerek tane irileşmesi dolayısıyla da ısıl işlemden beklenen faydanın elde edilememesi söz konusu olur.



Şekil 1.1. Tam Tavlama

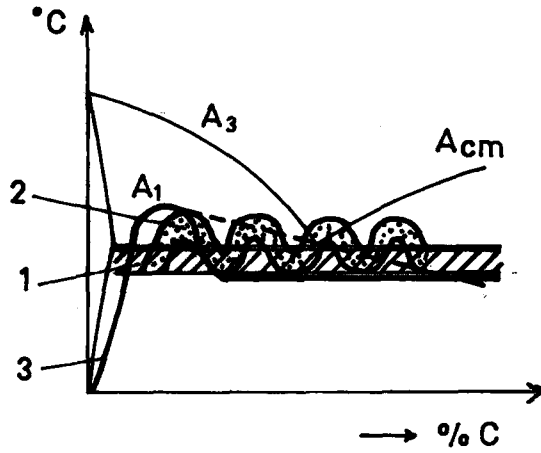
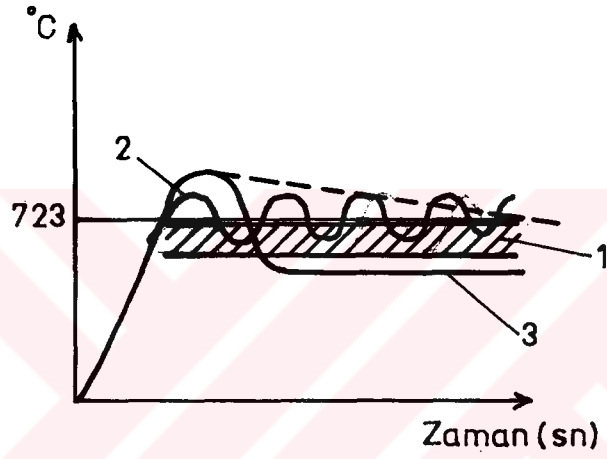
Ötektoid üstü çeliklerde tane küçültme işlemi 723 °C daki ötektoid sıcaklığınının 35 - 40 °C kadar üzerinde gerçekleşir. Bu sıcaklığın üzerine ısıtılması halinde ostenit taneleri kabalaşır (büyür) ve soğutma sırasındaki dönüşümde iri taneli perlitler elde edilir. Ötektoid üstü çeliklerdeki tam tavlama mikro yapısı küçük fakat kalın tabakalı perlit taneleri ve bunları çevreleyen sürekli sementit ağı şeklindedir. Ortaya çıkan sürekli sementit ağı gevrekliği ve sertliği nedeniyle malzemelerin yumuşamasına izin vermez ve talaşlı işleme sırasında gerek kesici ucu daha fazla zorlama ve gerekse de yüzeyin bozuk çıkması nedeniyle talaşlı işlemeyi kolaylaştıran bir ısıl işlem olamaz. Bu nedenle ötektoid üstü çeliklerde tam tavlama son ısıl işlem olmamalıdır. Bunun yerine küreleştirme uygulanmalıdır.

1.3. KÜRELEŞTİRME

Tam tavlama uygulanmış ötektoid üstü çelikler perlit ve sürekli sementit ağı nedeniyle talaşlı şekillendirilebilirlikleri zayıftır. Bu durumu önlemek amacıyla sementitlerin perlit içinde küresel hale getirilip mümkün olduğunca düzgün dağıtılmasını sağlayan küreleştirme tavlaması uygulanır. Küreleştirme aşağıda belirtilen üç yöntemden herhangi biri uygulanarak sağlanabilir (Şekil 1.2).

1. 723 °C sıcaklığın hemen altında çok uzun süre bekletmek
2. Bu sıcaklığın hemen üzerinde ve hemen altında kalınacak şekilde uzun süreli ısıtma ve soğutma işlemleri uygulamak
3. 723 °C' un biraz üzerine ısıtma ve fırın içinde çok yavaş soğutma veya 723 °C' un altında uzun süreli tutma

Küreleştirme sonunda sürekli sementit ağı parçalanır ve ferrit matrix (fon) içinde küresel bir biçimde düzgün olarak dağıtılır.

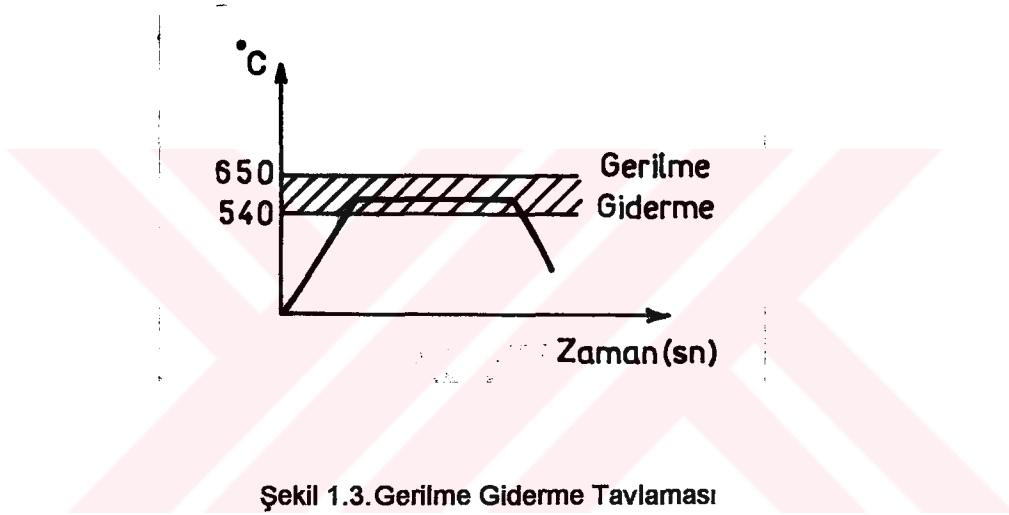


Şekil 1.2. Küreleştirme

Küreleştirme tavlamaşının aşın derecede uzatılması sementit parçacıklarının birleşerek uzamasını sağladığından talaşlı şekillendirme güçleşir.

1.4. GERİLME GİDERME TAVLAMASI

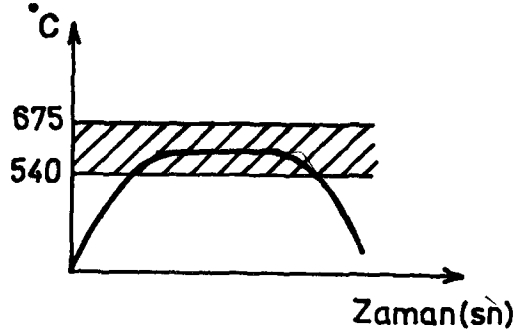
Daha önceden büyük oranda talaşlı veya talaşsız şekillendirilmiş parçalarda ortaya çıkan artık gerilmelerin giderilmesi amacıyla eliklerin 540°C ile 650°C arasındaki sıcaklıklarda makul bir süre bekletilmesi ve nisbeten yavaş soğutulmasıdır (şekil 1.3).



Gerilme giderme tavlamaşı sırasında malzemenin akma gerilmesi düşeceği için artık gerilmeler belirli bir deformasyon oluşturarak azaltılmış veya tamamen giderilmiş olur.

1.5. ARA TAVLAMA

Soğuk şekil değiştirmiş levha veya ubuklar 540°C ile 675°C arasında makul bir süre bekletilerek yavaş soğutulduklarında yeniden kristalleşme gerçekleştiği için yumuşar ve daha büyük miktarlarda şekil verilebilir hale gelir. Ara tavlama olarak nitelendirilen bu işlem gerilme giderme tavlamaşına çok benzer (şekil 1.4).



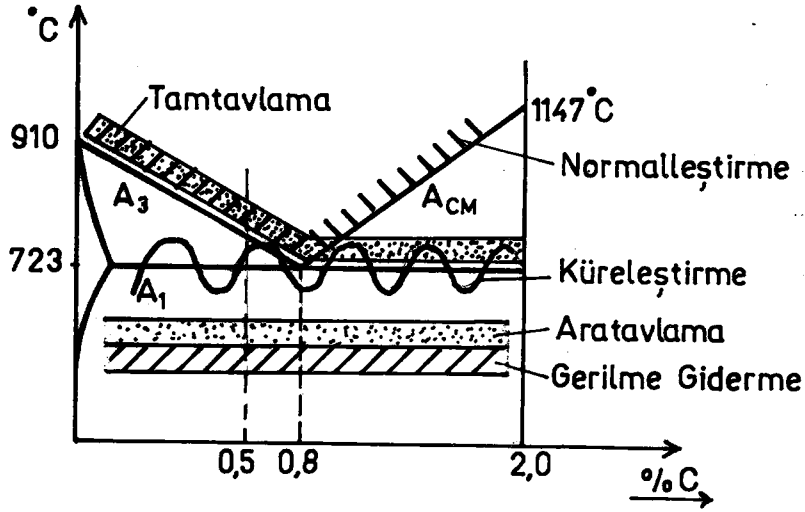
Şekil 1.4. Ara Tavlama

1.6. NORMALLEŞTİRME (NORMALİZASYON)

Normalleştirme, çeliklerin üst kritik sıcaklıkların (A_3 ve A_{CM}) yaklaşık 40 -50°C üzerindeki sıcaklıklara ısıtılması, bu sıcaklıkta ostenit dönüşümü tamamlanana kadar bekletilmesi ve fırın dışında açık havada oda sıcaklığına kadar soğutulması şeklindeki bir ısıtma işlemi çevriminin adıdır. Normalizasyonun amacı tam tavlamaya kıyasla daha sert ve daha yüksek mukavemetli çelikler elde etmek olduğundan bazı uygulamalarda son ısıtma işlemi olarak uygulanır. Normalizasyonun amacı, talaşlı işlenebilirliği iyileştirmek, döküm sırasındaki dendritik yapıyı düzenlemek, sertleştirme işlemlerindeki başarıyı arttırmak üzere tanelerin ve mikroyapıların iyileştirmesi olabilir. Açık havadaki soğutma sırasında soğuma hızı fırında soğutmaya kıyasla çok daha yüksek olduğundan ostenitin dönüşümü sonucunda oluşacak mikroyapı daha önce belirtilen metastabl (yarı kararlı) demir-karbon denge diyagramındaki mikro yapılardan daha farklı olacaktır.

Bilindiği gibi ostenitin dönüşüm ürünleri olan ferrit ve sementitin sertlikleri çok farklıdır. Ferrit çok yumuşak, sementit ise çok sert bir mikroyapıdır. Normalize edilmiş parçalarda sementit plakaları veya lamelleri birbirlerine çok daha yakın mesafelerde olduğu için ferritin plastik şekil değiştirmesini de güçleştirerek genel olarak mukavemetin artmasına sebep olur. Aynı şekilde sertlik de tam tavlamaya kıyasla daha yüksektir.

Değişik karbon oranlarına ve çeliklerin daha önceki geçmişlerine bağlı olarak tam tavlama, küreleştirme, normalleştirme işlemlerinin hepsi talaşlı şekillendirmeyi kolaylaştırabilir (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Normalleştirme ve Diğer Isıl İşlemlerin Sıcaklık Aralıkları

Hangisinin seçilebileceği karbon oranına bağlıdır. Bu konudaki araştırmalara göre talaşlı şekillendirme için en uygun mikroyapılar karbon oranına göre Tablo 1.1' de belirtilmektedir.

Tablo 1.1 Talaşlı İşleme İçin Karbon Oranına Göre Seçilecek Isıl İşlemler

%C	Optimum mikroyapı
0.06-0.2	Soğuk Haddelenmiş
0.2-0.3	$d_{eş} < 75$ mm Normalleştirme $d_{eş} > 75$ mm Soğuk Haddelenme
0.3-0.4	Tam Tavlama (Kaba Perlit)
0.4-0.6	Tam Tavlama, Küreleştirme
0.6-1	% 100 Küreleştirme

1.7. KABA TANE TAVI

Çeliğin ostenit alanı içerisinde normalleştirme sıcaklıklarından daha yüksek sıcaklıklarda bekletirli, perlit dönüşümü tamamlanincaya kadar çok yavaş olarak fırında bekletilmesidir. Bekletme süresinin aşırı uzatılması ostenit tanelerini, dolayısıyla perlit tanelerini aşırı büyütebileceğinden çeliklerin darbe dayanımları azalabilir. Bu ısıl işlemin amacı özellikle ötekoit altı çeliklerde talaşlı işlemeyi kolaylaştırmaktır.

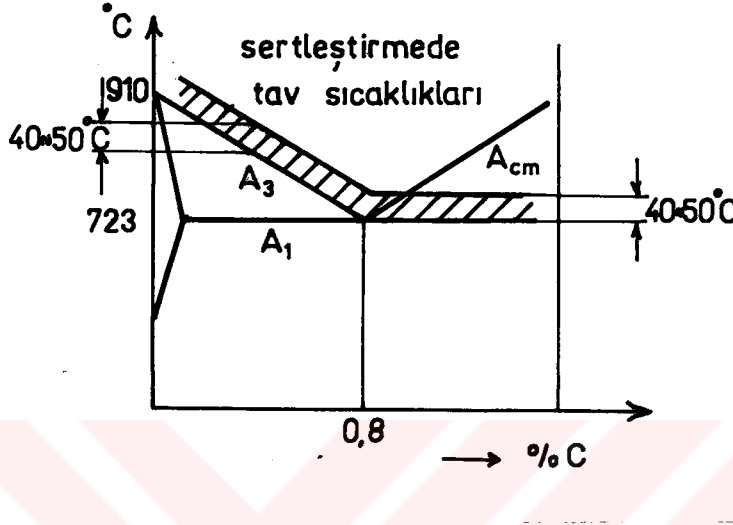
1.8. HOMOJENLEŞTİRME (DİFÜZYON TAVI)

Katılma sırasında tanelerin içerisinde oluşan kimyasal bileşim farklarını (mikrosegregasyon) difüzyon (yayınma) yolu ile gidermek amacıyla katılma sıcaklığının altında yapılan uzun süreli tavlama. Çeliklerde 1050-1300°C arasında uygulanır ve tane irileşmesine sebep olduğu için ayrıca tam tavlama veya normalleştirme uygulamak gerekir.

1.9. SERTLEŞTİRME (SU VERME)

Tam tavlama sıcaklıklarındaki çeliklerin çok hızlı soğutulması şeklinde uygulanan bir işlemdir (Şekil 1.6). Yavaş veya orta soğuma hızlarında karbon atomları ostenit yapının dışına difüzyon yoluyla çıkabilirler. Böylece demir atomlarında küçük bir hareket sonucunda hacim merkezli kübik hale dönüşebilirler. Bu şekildeki γ ' dan α ' ya dönüşüm bir çekirdeklenme ve büyüme süreci gösterecek bir biçimde zamana bağlı bir karakterdedir. Soğuma hızını arttırdığımızda karbonun difüzyonu için yeterli süreyi bırakmadığımız yapı HMK hale dönüşemez, bu durumda ortaya çıkan yapı martenzit olarak isimlendirilir ve hacim merkezli tetragonal yapı içinde hapsedilmiş karbonun aşırı doymuş bir katı çözeltilisidir. Kare prizma şeklindeki bu yapıda yükseklik karbon oranına bağlı olmak üzere c/a oranı 1.08'e kadar çıkar. Bu şekilde büyük oranda distorsiyona (çarpılmaya) uğramış martenzitin sertliğinin en önemli nedenidir. martenzitteki atomlar ostenite kıyasla birim kafeste daha az yer işgal ettiği için (atomsal dolgu faktörü martenzitte daha azdır) martenzit dönüşümü sırasında bir hacim artışı söz konusu olur. Bu sonuç su verme sırasında malzemede veya parçalarda çatlak oluşabilme olasılığını artırır. Mikro yapıda iğneli ve sivri uçlu bir görünüm gösteren martenzit aşırı bölgesel iç gerilmeler nedeniyle martenzite dönüşmeyen kısımların (matrix) büyük oranda plastik şekil

değiştirmesine neden olur. Böylece ortaya çıkan aşırı dislokasyon yoğunluğu nedeniyle martenzitik yapı son derece gevrek olur.



Şekil 1.6. Sertleştirmede Tav Sıcaklıkları

Martenzit dönüşümünün bazı önemli özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

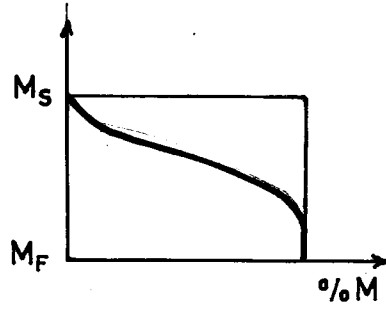
1. Dönüşüm difüzyonsuzdur ve kimyasal bileşim değişmez.

2. Dönüşüm sadece soğutma ile birlikte gelişir ve soğutma durdurulursa dönüşümde durur. Böylece dönüşüm sadece sıcaklıktaki azalmaya bağlı, zamana bağlı değildir. Oluşan martenzitin miktarı sıcaklık azalmasıyla lineer değildir. Dönüşüm sırasında ilkin martenzit miktarı az daha sonra yüksek, dönüşümün sonuna doğru tekrar azdır.

Martenzit dönüşümünün başladığı sıcaklık M_s , dönüşümün tamamlandığı sıcaklık ise M_f olarak adlandırılır. Soğutma sırasında M_s in altındaki bir sıcaklıkta beklendiği takdirde martenzit dönüşümü durur. Sıcaklık tekrar düşürülmedikçe, tekrar martenzit oluşmaz.

3. Belirli bir alaşım için martenzit dönüşümü kendisine ait M_s sıcaklığında başlar ve bu sıcaklık hiç bir şekilde soğutma hızına bağlı değildir. Bu sıcaklık sadece çeliğin kimyasal bileşimine bağlıdır.

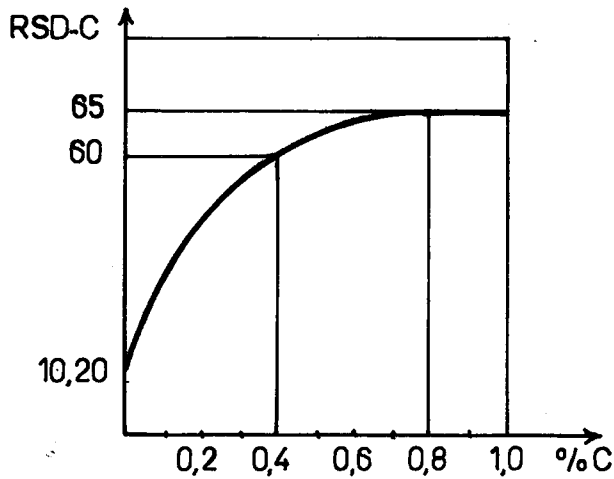
$$M_s = [1000 - (650 * \%C) - (70 * \%Mn) - (35 * \%Ni) - (70 * \%Cr) - (50 * \%Mo)] \text{ (}^\circ\text{F)} \quad [2]$$



Şekil 1.7. Sıcaklığa Bağlı Martenzit Yüzdesi [2]

Martenzit dönüşümünün bittiği sıcaklık tam olarak belirli değildir. Bazı çeliklerde oda sıcaklığının çok altına kadar düşebilir. Bu durum su verme sonrasında pratik olarak %100 martenzitin elde edilemeyeceği anlamına gelir (Şekil 1.7).

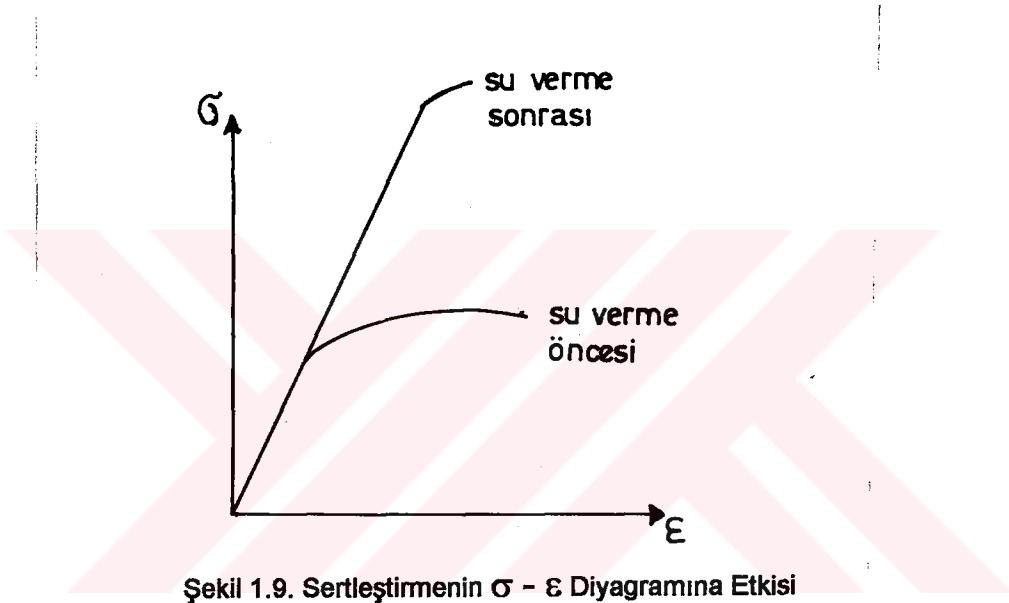
4. Martenzit hiç bir zaman, hatta oda sıcaklığında bile, bir denge konumuna ulaşamaz. Böylece martenzit kararsız ostenit ile denge ürünü olan ferrit ve sementit arasında bir geçiş yapısı olarak nitelendirilebilir.



Şekil 1.8. Martenzit Sertliğinin Karbon Yüzdesine Bağlılığı

5. Martenzitin en önemli özelliği yüksek sertliğidir. Buna karşılık oluşan martenzitin sertliği de tetragonal kafesi gerdiren karbon oranı ile yakından ilişkilidir. Buna karşılık % 0,4' ten sonraki karbon artışları martenzit sertliğini çok fazla etkilemez. % 0,8' den sonrası ise hiç etkilemez (Şekil 1.8).

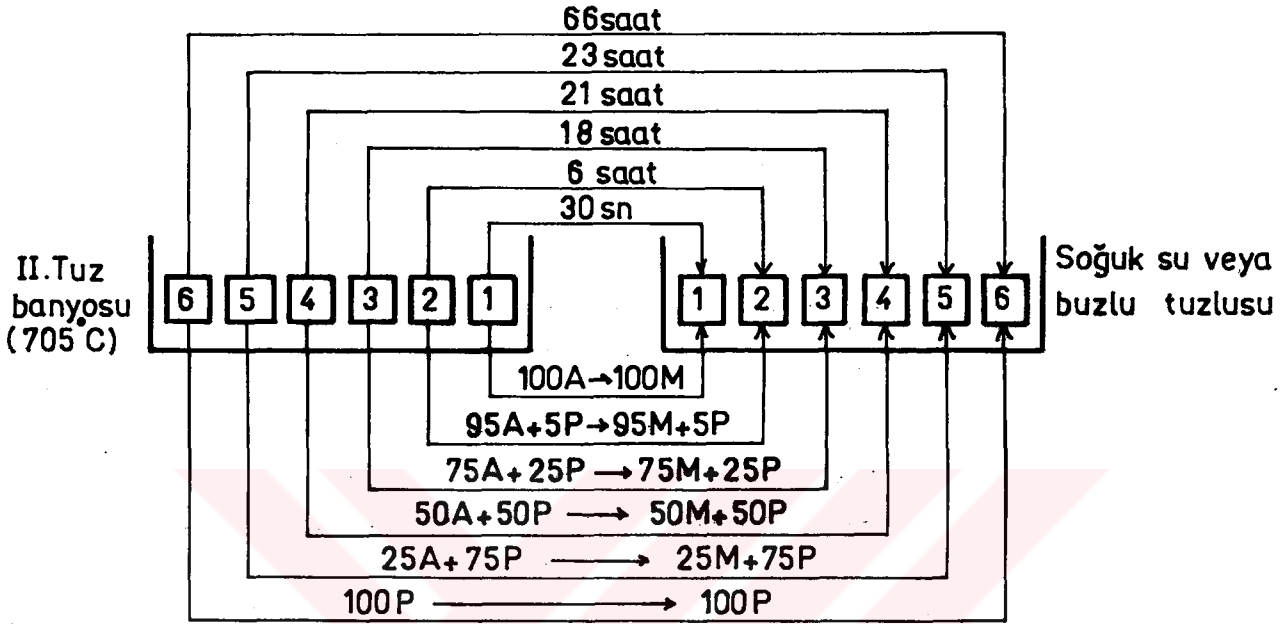
Su verme sonucunda, çelikler son derece gevrekleşir. Bu durum, aynı çeliğin su verme öncesi ve sonrası $\sigma - \epsilon$ diyagramlarının temsili olarak gösterildiği Şekil 1.9' daki diyagramda görülmektedir. Su verme sonrasında gevrekliği azaltmak amacıyla, sertliğin azalmasına pahasına temperleme uygulamak gerekir.



1.10. İZOTERMAL DÖNÜŞÜM DİYAGRAMLARI (ZAMAN, SICAKLIK, DÖNÜŞÜM DİYAGRAMLARI)

Bu diyagramlar belirli bir çelik için soğutma hızına ve inceleme süresine bağlı olmak üzere, ostenitten değişik mikro yapıların elde edilme koşullarını gösteren diyagramlardır. Diyagramların çıkartılmasında ostenitleme sıcaklığından gittikçe azalacak bir şekilde, fakat sabit bir sıcaklıkta değişik süreler sonundaki dönüşüm ürünlerinin belirlenmesi esas alınır. Soğutma hızlarının çok yüksek tutulabilmesi amacıyla küçük ve dikdörtgen parçalar kullanılır. Böyle bir diyagramın hazırlanmasında altı aşama söz konusudur:

1. Aynı çubuktan kesilmiş çok sayıda parça birer tel yardımıyla bağlanarak deneye hazır hale getirilir.



Şekil 1.10. 705°C'deki Ostenitin Oda Sıcaklığındaki

Kaba Taneli Perlite Dönüşüm Aşamaları [2]

2. Deney parçaları fırın veya erimiş tuz banyosu içinde belirli bir ostenitleme sıcaklığına getirilir. Bu sıcaklık, örneğin ötekoit çelik için 775°C olabilir. Bu sıcaklıkta ostenit dönüşümü tamamlanana kadar beklenir.

3. Parçalar ferrit dönüşümünün altındaki bir sıcaklıkta bulunan belirli bir erimiş tuz banyosu içine atılır.

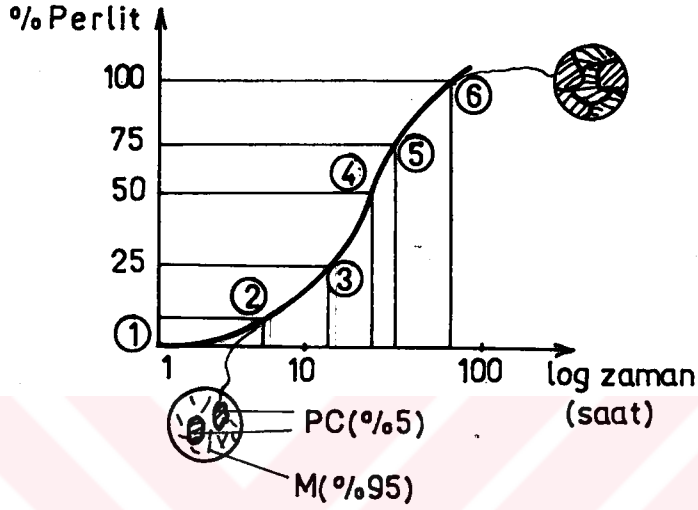
4. Söz konusu ikinci tuz banyosunda değişik sürelerde tutulmuş deney parçalarına, tuz banyosundan çıkartılarak soğuk su veya buzlu tuzlu su içinde su verilir.

5. Soğutmadan sonra her parçanın sertliği kontrol edilir ve mikro yapısı ortaya çıkartılır.

6. Yukarıdaki işlemler değişik sıcaklıklardaki tuz banyoları için de tekrarlanır. Böylece söz konusu çelik için ZSD (TTT) diyagramı elde edilmiş olur. Bu sırada şu iki gerçeğin unutulmaması gerekir.

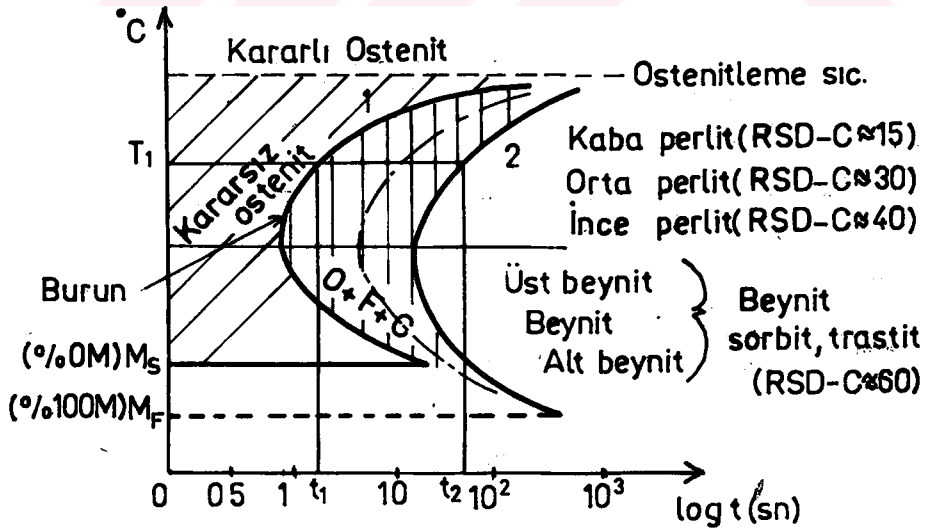
a) Martenzit sadece düşük sıcaklıklarda ani olarak ve ostenitten dönüşür.

b) Ostenit, A_1 sıcaklıklarının hemen altındaki sıcaklıklarda bekletilerek, oda sıcaklığında kararlı olan bir yapıya dönüşmüşse, daha sonraki bir hızlı soğutma ile martenzit elde edilemez (Şekil 1.11).



Şekil 1.11. 705°C'deki Ötektik Çeliğe Ait Perlitten Ostenite Dönüşüm Eğrisi

Bu deney, farklı sıcaklıklarda ve çok sayıda deney parçasıyla tekrarlanırsa Şekil 1.12' de gösterilen grafik elde edilir.



Şekil 1.12. % 0.8 C'lu Çeliğe Ait ZSD (TTT) Diyagramı

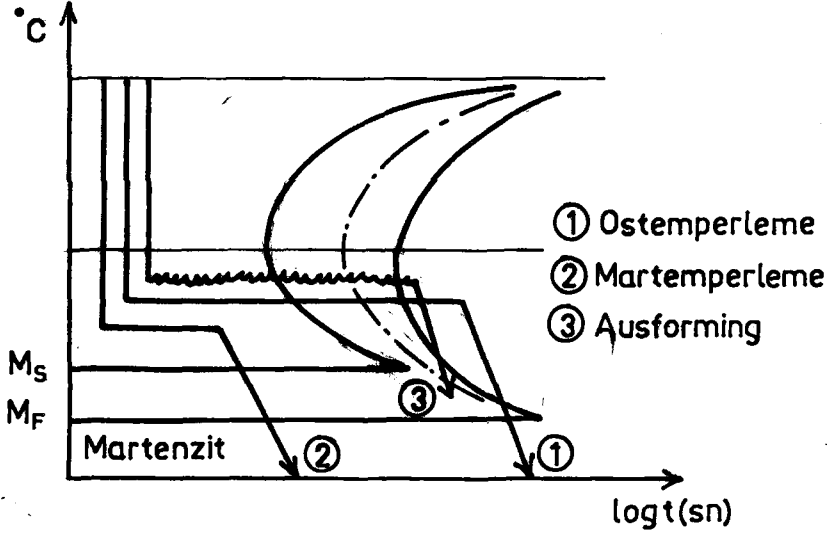
1 numaralı eğri, ostenitten dönüşüm ürünlerinin elde edilmeye başladığı sabit sıcaklıktaki zaman değerlerini gösterir. Örneğin T_1 sıcaklığında, t_1 zamanında ostenitten dönüşüm başlamaktadır. 2 numaralı eğri, ostenitten oda sıcaklığında kararlı dönüşüm ürünlerinin dönüşümlerinin tamamlandığı sabit sıcaklıktaki süreleri belirtir. Örneğin T_1 sabit sıcaklığında t_2 süresinde ostenit tamamen dönüşmüştür. Sabit dönüşüm sıcaklıklarında yukarıda açıklanan süreler, verilen örnekten doğal olarak bir miktar farklı olacaktır.

Sıcaklık eksenine ile 1 numaralı eğri arasında kalan alan içindeki sabit sıcaklık ve sürelerde mikro yapı ostenitten ibarettir. Buna karşılık söz konusu sıcaklıklar demir-karbon denge diyagramına göre ötekoit sıcaklığın altında olduğu için ostenit "kararsız ostenit" olarak adlandırılır. 1 numaralı eğrinin sıcaklık eksenine en yakın olduğu kısımlar burun olarak adlandırılır. 1 ve 2 numaralı eğriler arasında ostenit, ferrit, sementit bir arada bulunur. 2 numaralı eğri ise ostenitten, oda sıcaklığında kararlı dönüşüm ürünlerinin dönüşümlerinin tamamlanma sürelerini sabit sıcaklık için verir.

Buna karşılık sabit dönüşüm sıcaklıklarının değerine bağlı olarak kararlı dönüşüm ürünleri farklı görünüm ve sertlikte olabilir. Bilindiği gibi ostenitin kararlı ürünleri ferrit ve sementittir. Bu iki fazın karışımında sementit lamelleri veya parçacıkların kalınlığı, sürekliliği kararlı dönüşüm ürünlerinin isimlendirilmesinde belirleyici rol oynar. Sementit lamelleri sürekli olduğu takdirde karışımın adı perlittir. Lamellerin kalınlığı ise, perlitin kaba, orta ve ince perlit olarak adlandırılmasına sebep olur.

Perlitin düzenli ve lamelli görünüşüne karşılık, difüzyonun zorlaştığı durumlarda (düşük sıcaklıklar) öncelikle ortaya çıkar. Düşük karbonlu ferrit bölgelerinin ilkin yanlarında daha sonrada içinde kalacak şekilde sementit plakacıklarının oluştuğu bir mekanizma düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. Bu şekilde ortaya çıkan sementit + ferrit karışımı "beynit " olarak adlandırılır.

Su verme konusuyla ilgili olarak martenzitin sert ve gevrek bir mikro yapı olduğu belirtilmişti. Aynı zamanda martenzitin sertliği karbon oranıyla ilişkilidir ve maksimum %0.8 C için $RSD-C \cong 65-66$ olabilir. Martenzitin gevrekliği yanında çok hızlı soğutmanın yol açtığı iç gerilmeler ve çarpılmalar makina parçalarının kullanımını da sınırlar. Buna karşılık ZSD diyagramından, alt beynitin martenzite yakın sertliğe sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda kararlı bir ürün olduğu için oda sıcaklığındaki beynitik yapı martenzite kıyasla çok daha sünektir. Buna göre iki özel ısıtma işlemi geliştirilmiştir. Bu özel ısıtma işlemleri martemperleme ve ostemperleme olarak adlandırılır (Şekil 1.13)



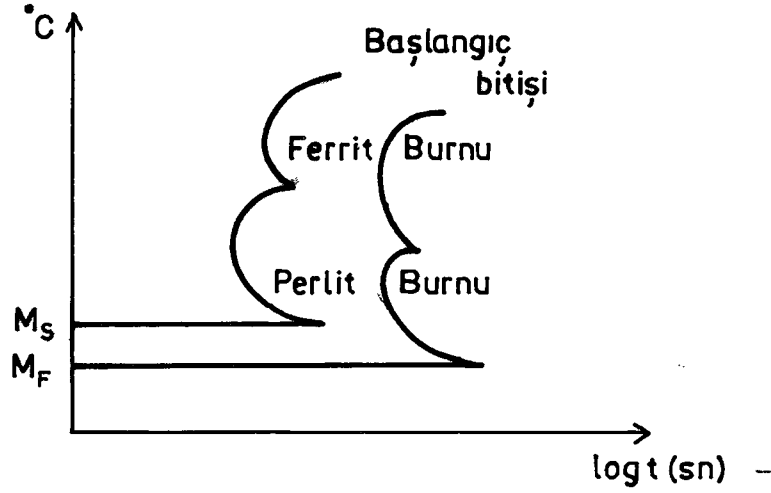
Şekil 1.13. Ostemperleme, Martemperleme ve Ausforming İşlemleri

OSTEMPERLEME : Çeliğin ostenitleme sıcaklığından ve işleminden sonra burun noktasını kesmeyecek bir biçimde hızlı olarak beynit oluşum bölgesindeki bir sıcaklıktaki tuz banyosuna daldırmak ve bu sıcaklıkta beynit oluşumu tamamlanana kadar beklemek ve oda sıcaklığına soğutmakla gerçekleştirilen bir ısı işlem sürecidir. Böylece oluşan beynit yeterince sert ve martenzite kıyasla daha sünek olduğu için düzgün mekanik özellikler elde edilmiş olur.

MARTEMPERLEME : Çeliği ostenitlemeden sonra burun noktasını kesmeyecek bir hızda M_s sıcaklığının hemen üzerindeki bir tür tuz banyosuna daldırmak, bu sıcaklıkta bir numaralı eğriye gelmeyecek şekilde bekletmek ve hızla soğutmak şeklinde uygulanan bir ısı işlem sürecidir. Bu yöntemle bekletme sırasında bir ısı denge oluşturulduğu için iç gerilmelerle çarpılmalar ve klasik su vermeye kıyasla çok daha azdır. İkinci bir temperleme işlemine gerek duyulmayabilir. Daha çok alaşımsız çeliklerde ve karmaşık şekilli kalıp parçalarının sertleştirilmesinde kullanılır.

AUSFORMİNG : Ostemperlemeye benzer bir süreçte ikinci tuz banyosunda bekletme yerine, bu sıcaklıkta yaklaşık olarak sabit sıcaklık koşullarında çeliklerin haddelenmesi veya dövülmesi gerçekleştirildiği takdirde haddelenme sonundaki malzemenin tane boyutu çok küçültülebilir. Bu durum malzemelerin kırılma tokluğunun iyileştirilmesine yol açar (Şekil 1.13).

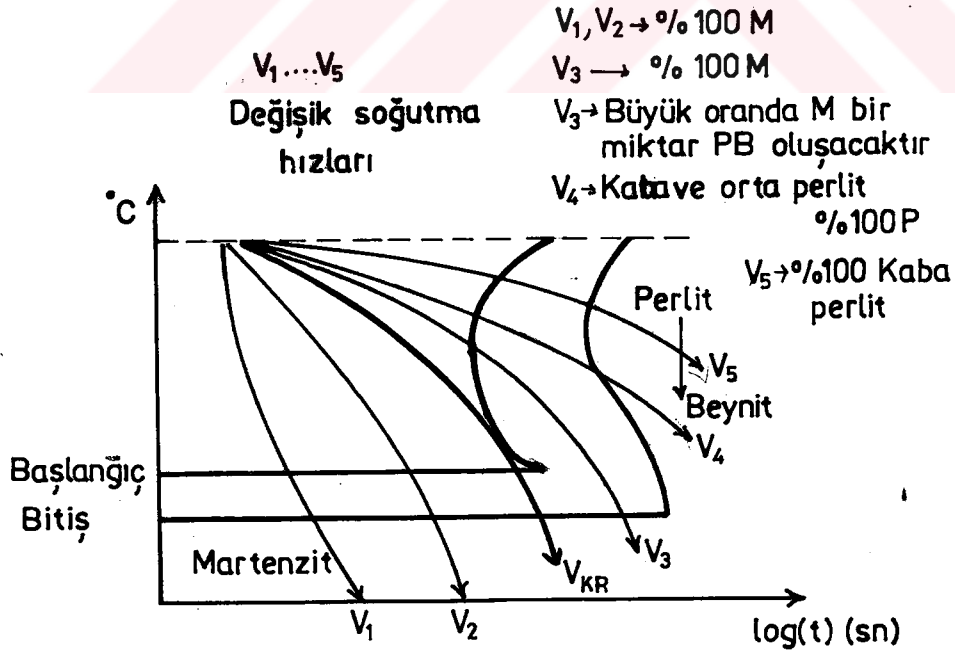
%0.8 C'lu alaşımsız ötektoid çeliğin TTT diyagramları çizilirken eksenler, değişik sıcaklıklardaki kararlı veya kararsız mikro yapılar açıklanmıştır. Bu tür bir çelikte ostenitin değişik sabit sıcaklıklarda ve değişik sürelerde tutulması sonucunda karşılaşılabilecek mikro yapılar martenzit perlit veya beynit olabilir. Buna karşın ötektoid altı veya üstü çeliklerde, bunların yanında ferrit veya sementit ağı ve çift burunlu S eğrisi ortaya çıkabilir (Şekil 1.14).



Şekil 1.14. Çift Burunlu S Eğrileri

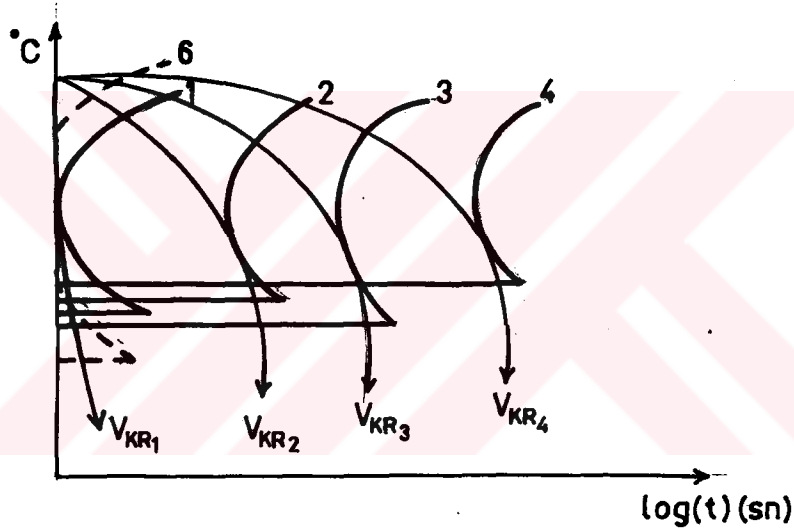
Çeliklerde ticari ve klasik su verme işlemlerinde ostenitleme sıcaklığına çıkartılan parçalar fırından dışarı alınarak değişik ortamlarda (tuzlu su, musluk suyu, buzlu su, yağ veya sakın hava) soğumaya bırakılır.

Söz konusu soğutma ortamlarının soğutma etkinliği farklı olduğu için her birinde değişik değerlerde olmak üzere $v = \Delta T / \Delta t$ değişik soğutma hızları elde edilir. Bu hız ne kadar yüksekse birim zamandaki soğuma sıcaklık farkıda o kadar büyük olur. Herhangi bir çelik için %100 martenzit elde edilebilecek soğuma hızı o çeliğin "kritik hızı" olarak adlandırılır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15. Kritik Soğuma Hızının ZSD Diyagramı Yardımıyla Belirlenmesi

Bazı çeliklerde bu hız sakin havada soğutma da bile elde edilebilir. Bu tür çelikler hava çelikleri olarak nitelendirilir. Kritik hız tanımına göre bir hava çeliği doğal olarak yağda veya su vermede de %100 martenzit verebilir. Buna karşılık suda kesinlikle sertleştirilmemelidir (çatlama ve kırılma olmaması için). Benzer olarak bazı çeliklerde kritik soğuma hızı yağda soğutmada elde edilebilir (yağ çelikleri). Bazılarında ise sadece suda soğutmada kritik hıza ulaşılabilir (su çelikleri) (Şekil 1.16).



Şekil 1.16 Farklı Çeliklerde Dönüşüm Başlangıç Eğrileri

Klasik sertleştirme işlemlerinde sadece %100 martenzit elde edilen soğutma çevrimleri söz konusu olur (martenzitin yanısıra diğer ostenit kararlı ürünleri bulunduğu anda bu işlem başarısız bir su verme işlemidir).

Bu süreç genel sertleştirme sürecinin çok özel durumlar dışında birinci aşamasını oluşturur. Bu durumdaki bir malzeme yüksek sertlikte fakat aynı zamanda çok yüksek iç gerilmeler

barındıran son derece gevrek bir karaktere sahiptir ve çelikler bu halleri ile bırakıldıklarında bazen birkaç saat bazen bir gecelik bir sürede iç gerilmeler etkisinde çatlayarak sertleştirilmiş parçalar kullanılamaz hale gelir. Bu tehlikeye karşılık su verme sonrasında değişik sıcaklıklarda olmak üzere (çeliğin türüne bağlı olarak) mutlaka temperlenir.

1.11. YÜZEY SERTLEŞTİRME

Bir çok endüstriyel uygulamada aşınmaya dayanıklı sert bir yüzey ve nisbeten yumuşak, fakat tokluğu yüksek iç ısınmaya ihtiyaç duyulur. Yüzey bölgesi doku veya tabaka, iç kısımlar ise çekirdek olarak adlandırılır. Bu amaca hizmet eden başlıca beş tip yüzey sertleştirme yöntemi vardır. Bunlar sırasıyla:

1. Sementasyon (karbonlama).
2. Nitrürasyon (azotlama)
3. Karbonitrürasyon.
4. Alevle sertleştirme.
5. İndüksiyonla sertleştirme.

İlk üç yöntemde kimyasal bileşim değiştirilir (Sementasyonda karbon ilave edilir, nitrürasyonda azot ilave edilir ve karbonitrürasyonda hem karbon, hem azot ilave edilir). Buna karşılık son iki yöntemde çeliğin kimyasal bileşimi değiştirilmez. Bu nedenle karbon oranları %0.3 veya daha yüksek olan, yani sertleştirilebilir nitelikteki çeliklere uygulanır.

1.11.1 SEMENTASYON

Yüzey sertleştirme için kullanılan en eski ve en uzun yöntemdir. Genellikle %0.2veya daha az karbonlu çelikler yeteri miktar CO bulunan bir atmosferin içine yerleştirilir. Sementasyon sıcaklığı genellikle 925°C civarındadır. Bu sıcaklıkta $Fe+2CO \rightarrow Fe(C)+CO_2$ şeklinde bir reaksiyon gelişir. Bu reaksiyona göre ortaya çıkan atomik karbon, çeliğin yüzeyinden çok hızlı bir biçimde girerek yüzeydeki karbon konsantrasyonunu %1.2' ye çıkartır (Şekil 1.17).

Sıvı sementasyonda parçalar erimiş siyanür içinde bekletilir. Sementasyon derinliği gaz veya katı sementasyonundaki mertebelerde elde edilebilir. Buna karşılık su verme sırasında patlama tehlikesine karşı önlem alınmalıdır. Sıvı banyoda bileşim ayarlanarak ve gaz sementasyonunda fırın gazının bileşimi kontrol edilerek karbonitrürasyon işlemi de gerçekleştirilebilir.

1.11.2 NİTRÜRASYON

Bu yöntemde parçaların içinde bulunduğu sıvı veya gaz ortamda, sıcaklığın sementasyona kıyasla daha düşük olması nedeniyle atomik halde azot ortaya çıkar. Azot yüzeyden içeriye yayılarak ilerlediğinde Fe, Cr ve/veya Al ile birleşerek nitrürlerini oluşturur. Bu nitrürler içinde en sert ve uygun olanları krom nitrür ve alüminyum nitrür olduğu için, nitrürasyon işlemi bu elementlerin en az %1 oranında bulunduğu özel çeliklerde daha etkili olur.

Nitrürasyonda sıcaklıklar 500°C civarındadır. Bu durum ısı nedeniyle çarpılmaların ya da boyut değişimlerinin ortaya çıkabildiği diğer genel veya yüzey sertleştirme işlemlerine göre önemli bir avantaj oluşturur. Uygun malzeme (Cr ve Al'lu çelik) kullanılarak, bitmiş parçalara önemli bir boyut değişikliği oluşturmaksızın uygulanabilen bir yüzey sertleştirme işlemidir. Buna karşılık sıcaklığın ve azotun yayınma hızının düşüklüğü nedeniyle sert tabaka kalınlığı sementasyondan çok daha azdır (20 saatte 0.3mm.).

Son yıllarda iyon nitrürasyonu adı verilen ve oda sıcaklığında yapılabilen bir yüzey sertleştirme işlemi bu konuda birçok avantaj sağlamaktadır.

1.11.3 KARBONİTRÜRASYON

Daha önce de açıklandığı gibi sementasyon için kullanılan sıvı veya gaz atmosferlerin bileşimleri ve ısı işlem sıcaklığı ve ısı işlem sıcaklığı ayarlanarak yüzeye hem karbon hem de azot verilebilir. Ortamdaki azot konsantrasyonu arttırıldığı ve sıcaklık düşürüldüğü takdirde işlem nitrürasyona daha yakın bir karaktere bürünür (Tersi de doğrudur).

1.11.4 ALEVLE SERTLEŞTİRME

Sertleşebilen nitelikteki çeliklerin sadece yüzey bölgesi oksitlenmiş alevi ile ısıtıldığında çeliğin ısı iletim katsayısı gereği henüz içi kısım ostenitleme sıcaklığına ulaşmadan yüzeyde, belirli bir kalınlık dahilinde ostenit fazı ortaya çıkabilir. Bu durumdaki parça yüzeyine uygun bir donanımla su püskürtülürse ostenitlemiş bölgeler sertleşebileceğinden yüzey sertleştirme işlemi gerçekleştirilmiş olur. Dönel simetrik parçalara uygulanması daha kolaydır.

1.11.5 İNDÜKSİYONLA SERTLEŞTİRME

Prensip itibarıyla alevle yüzey sertleştirmeye benzer olan bu yöntemde sertleştirilecek bölgenin ısıtılması yüksek frekanslı alternatif gerilimle sağlanır. 1000 Hertz frekansta 4.57 mm. ile 8.09 mm. arasında değişebilen sert tabaka kalınlığına karşılık 1000000 Hertz'de 0.25 mm. ile 0.76 mm. arasında sertleştirilmiş tabaka kalınlığı elde edilebilir. Bu yöntemin uygulanacağı çelik malzeme karbon itibarıyla doğrudan su vermeye uygun olmalıdır. Yöntemde bu nitelikteki bir çeliğin yüzeyinden belirli bir derinlikteki kısmı yüksek frekanslı gerilimin etkisiyle ostenit bölgesine ısıtılır. Bu sırada parça düşey yönde hareket ettirildiği için su püskürtülen bir aparatın önünden geçer ve hızla soğutulduğu için de martenzit oluşumu sağlanır. Yüksek frekanslı gerilimin geçirildiği bobinin veya sargının şekline bağlı olarak silindirik dış veya iç yüzeyler, düzlem bölgeler veya eğrisel yüzeyler bu yöntemle sertleştirilebilir. Parçanın tüm yüzeyi sertleştirilebileceği gibi, yüzeyde belirli bir bölgede sertleştirilebilir.

1.11.6 YÜZEY SERTLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Buraya kadar açıklanan 5 tip yüzey sertleştirme işlemi amaç olarak iş parçalarının sadece yüzeylerinde ve belirli bir derinlikte bölgenin sertleştirilmesini hedeflemektedir. Sementasyon, nitrürasyon ve karbonitrürasyonda uygun kimyasal yapıdaki çeliklerin yüzeylerinden itibaren, gittikçe azalan konsantrasyonlarda karbon veya azot atomları yayındırılmaktadır. Böylece yüzeydeki karbon miktarı doğrudan su verme yoluyla, sertleştirilmeye yeterli miktara çıkarılmaktadır. Bu yöntemle iş parçası 930°C gibi nispeten yüksek bir sıcaklığa çıkartıldığı için, sementasyon öncesi parçanın geçmişi göz önünde bulundurulmalıdır.

Buna karşılık nitrürasyon 570°C sıcaklıkta çelik yüzeyinde azot atomları yayındırma esasına dayanır. Sıcaklığın sementasyona kıyasla daha düşük olması ısı çarpımlarının etkisini azaltır.

Karbonitrürasyon ilk iki yöntemin özelliklerini bir arada bulunduran ve sıcaklığın ikisi arasında değer aldığı bir ısıtma işlemidir. Alevle, indüksiyonla sertleştirmede çeliğin kimyasal bileşimi değiştirilmeden, yüzeyde bölgesel ısıtmalar, dolayısıyla bölgesel sertleştirmeler sağlanır. Karbon oranına bağlı olarak alevle, endüksiyonla sertleştirmedeki sertlik değerleri değişebilir (Martenzit sertliğinin karbon oranına bağımlılığı).

Bu durumda sementasyon, teorik olarak en yüksek yüzey sertlik değerlerini vermesi yanında özellikle gaz, nisbeten de sıvı sementasyonda doğrudan su vermenin mümkün olduğu yöntemin önemli bir avantajını oluşturur.

Nitrürasyonda sertlik değeri sementasyona yakın, bazı durumlarda ise daha da yüksek olabilir. Aynı zamanda nisbeten düşük sıcaklıkta gerçekleştirildiği için ısıtma çarpımları diğer sertleştirme yöntemlerine kıyasla çok daha düşüktür. Buna karşılık Cr veya Al (%1'ler oranında) içeren çeliklere uygulanabilmesi ve gerek sertleşme derinliğinin düşüklüğü ve gereksede sürenin uzun olması en önemli dezavantajlardır. Aynı zamanda fırın atmosferinin şartlandırılmasında gelişkin kontrol aletlerinin kullanılması gerekmektedir.

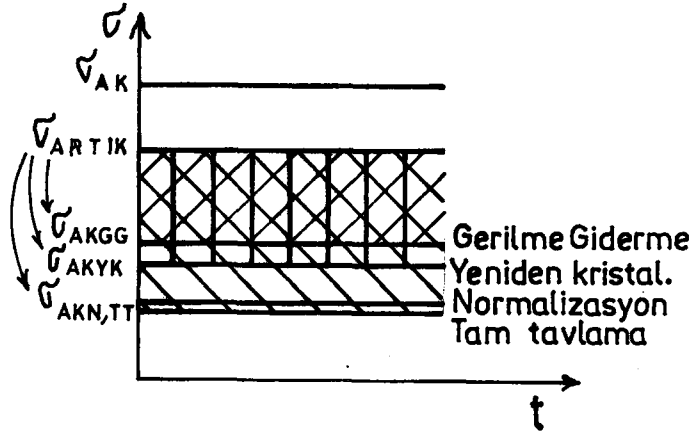
Alev veya indüksiyonla sertleştirmede, sertleşebilir nitelikte çelik malzemenin kullanılması gerekmektedir. Isıtıcıların parça geometrisine uygun olarak seçilmesi veya dizayn edilmesi, parçanın hareket hızının kontrol edilmesi zorunlulukları vardır.

1.12 ARTIK GERİLMELER

Bu gerilmeler parça kuvvet etkisinden uzaklaştırılsa bile kaybolmayan gerilmeleri tanımlar. Artık gerilmeler genellikle üniform olmayan veya bölgesel plastik şekil değiştirmeler sonucunda meydana gelir. Artık gerilmeler, ısıtma işlemi sırasında, iş parçasında sıcaklık dağılımı bozukluklarına veya uygun olmayan koşullarda faz değişikliklerine neden olduğundan sonuçta çarpımlara veya çatlak oluşumuna ve bazı durumlarda da parçanın serviste çok çabuk hasara uğramasına yol açarlar.

Artık gerilmeler yüzeyde çekme, iç kısımlarda basma veya tam tersi olarak ortaya çıkabilir. Gerek parçanın kullanılabilirliğini, gerekse ısıtma işlemi etkinliğini arttırmak üzere mümkün olduğunca, son işlemlerden önce giderilmelidir. Bunun için, " gerilme giderme tavlama ", " yeniden kristalleşme tavlama ", " normalizasyon tavlama " veya " tam tavlama " yöntemlerinden birisi işin ciddiyetine bağlı olarak parçaya uygulanabilir.

Söz konusu ısıtma işlemlerinde ısıtma işlemi sıcaklığına karşılık gelen akma gerilmesi, artık gerilmelerden daha düşük olacağından, aradaki fark plastik şekil değiştirmeler yoluyla giderilmiş olur.



Şekil 1.18. Artık Gerilmelerin Çeşitli Isıl İşlemlerle Giderilmesi

BÖLÜM 2. TAKIM ÇELİKLERİ

2.1. GİRİŞ

Teknik olarak bir takımın yapısal herhangi bir parçası olarak kullanılan çelikler takım çeliği olarak söylenebilir. Daha özel olması için aşınma dayanımı, tokluk, sertlik ve mukavemet gibi arzu edilen karakteristiklerinin elde edilmesine imkan veren ısıtma işlemlere gelebilecek şekilde alaşımlandırılmış bir çelik takım çeliği olarak adlandırılmalıdır. Makina yapım çelikleri olan ısıtma çeliklerini de anımsatabileceği için bu tanımın bile henüz çok genel olacağı anlaşılabilir.

Günümüz endüstrisinde kullanıldığı anlamda "takım çeliği" terimi, aşınmaya dayanıklılıkları ve yüksek sertlikleriyle karakterize edilen çok itinalı olarak üretilmiş bir grupta yüksek kaliteli çeliği ifade eder. Takım çeliklerinin belirli türleri ayrıca yüksek sıcaklıklardaki yumuşamaya karşı yüksek direnç gösterirler. Isıtma çeliklerinden hassas üretimleri ve kalite kontrol metodları itibarıyla ayrılırlar. Takım çelikleri genel olarak, curuf olmayacağından emin olunan ve çok hassas ergitme şartları kontrolü sağlanabilen küçük tonajlı elektrik ocaklarında ergitilir. Kritik uygulamalar için kullanılan takım çelikleri ise vakum ergitme işlemleri ile üretilir. Takım çeliklerinin üretilmesi sırasında çok dikkatli muayene yöntemleri kullanılır. Örneğin elde edilen çubuklara, yüzeysel ve iç hataların bulunması için manyetik partikül ve ultrasonik muayene yöntemleri uygulanabilmektedir.

Alaşım elementlerinin yüksek fiyatlı oluşu, hassas üretim sürecinin gerekliliği ve kalite kontrole uygulanışı takım çeliklerinin pahalı olmasına yol açar. Buna karşılık, insan emeğiyle çok uzun zamanda yapılabilecek, çoğu zamanda yapılması mümkün olmayan karmaşık şekilli elemanların ve makina parçalarının bazen milyonlarcasının üretilmesine olanak veriyor olduklarını düşünürsek, takım çeliklerinin bu yüksek fiyata değer olduklarını söyleyebiliriz.

2.2. TAKIM ÇELİKLERİNİN ÖZELLİKLERİ

Takım çelikleri, daha öncede belirtildiği gibi alaşımlı çeliklerdir. Takım çeliklerinden beklenen özellikleri ise şu şekilde açıklamak mümkündür.

2.2.1. SERTLEŞME DERİNLİĞİ

Bu özellik söz konusu çeliklerin sertleşebilirlikleri ile ilişkilidir. Sertleşme derinliği düşük olan çeliklere genellikle suda su verilir. Sertleşebilirlik, artan alaşım miktarı ile artar. Sertleşebilirliği düşüren tek alaşım elementi kobaltdır. Büyük kesitlerin her yerinde büyük sertlik değerleri elde edebilmek için, yüksek alaşımlı çelik seçmek gerekir.

2.2.2. SERTLEŞMEDE DEFORMASYON DURUMU (BOYUT KALICILIĞI)

Takım çelikleri ısıtma ve soğutma sırasında genişledikleri ve büzüldükleri için boyutlarındaki değişim miktarları, karmaşık şekilli kalıplar söz konusu olduğunda çok önemlidir. Zira, karmaşık olarak dizayn edilmiş takım çeliklerini su vermeden sonra da koruyabilmelidir. Dolayısıyla boyut kalıcılığı iyi ya da çok iyi olarak belirtilen çeliklerden yapılan kalıplar, ısıtma işleminden önce en son şekle çok yakın boyutlarda işlenebilir ve su vermeden sonra çok az bir taşlama gerekir. Fakat bu özellikleri orta veya kötü olarak belirtilen çeliklerden, çok karmaşık şekilli kalıplar, çatlama tehlikesi nedeniyle yapılmamalıdır. Genel olarak havada sertleşebilen çelikler en az distorsiyon gösterir, yağda sertleşenler orta seviyede orta sertleşenler ise en büyük distorsiyon gösterirler.

2.2.3. TOKLUK

Tokluk terimi takım çelikleri için, şekil değişimi sırasındaki enerji absorbe yeteneğinden ziyade, kırılmaya karşı gösterdiği direnç olarak düşünülmelidir. Takımlar rijit cisimlerdir ve çok küçük plastik deformasyonlar bile takımı kullanılamaz hale getirir. Şok (darbe) dirençli takım çeliklerini oluşturan S ve H gruplarındaki orta ve düşük alaşımli takım çelikleri bu özelliği en iyi sağlayan gruplardır. Görece yumuşak ve tok bir iç kısım bırakan düşük sertleşebilir çeliklerde iyi tokluk değerleri verirler. Yüksek karbonlu soğuk iş takım çelikleri ise gevrek karakterlidir ve toklukları düşüktür.

2.2.4. AŞINMA DAYANIMI

Genelde bütün takım çelikleri oldukça iyi aşınma dayanımı gösterirler , fakat bazıları bu özellik bakımından çok belirgindir. Aşınma dayanımı aşınmaya veya boyutsal toleranslardaki değişime gösterilen direnç olarak tanımlanabilir. Aşınma dayanımı, sadece kesici kenarlardan

veya parçanın tüm yüzeyinden istenebilir. Genel olarak sert, çözünmemiş karbür parçacıklarının varlığı aşınma dayanımını artırır.

2.2.5. KIZIL SERTLİK

Sıcak sertlik olarak da bilinen bu özellik, çeliğin ısı etkisiyle yumuşamaya (sertlik azalmasına) gösterdiği dirençle ilişkilidir. Yüksek hız ve sıcak iş takım çelikleri için seçici faktör olarak önemli olan bu özellik malzemenin temperlemedeki sertlik azalmasına gösterdiği dirençle de ilişkilidir. İyi bir kızıl sertliği olan bir takım çeliği , çalışma sıcaklığının 450-500°C dolayında olması durumunda rahatlıkla kullanılabilir. Sert, kararlı karbürlerin oluşmasına neden olan alaşım elementleri kızıl sertliği artırır. Bu özellik bakımından iyi olan takım çelikleri büyük oranda tungsten, krom ve molibden içerirlerdir.

2.2.6. TALAŞLI İŞLENEBİLİRLİK

Bu, malzemenin kolayca kesilebilme ve talaşlı işlemeden sonra iyi bir yüzey kalitesi elde edilebilme özelliğidir. Tablo 2.1.'de verilen işlenebilme oranları, kalıp ve takımların işlenmesi sırasında çeliklerin talaşlı şekillendirilebilme durumlarını belirtmektedir. Bu özelliğe etki eden faktörler, tavllanmış durumdaki sertlik, çeliğin mikro yapısı ve sert karbürlerin miktarlarıdır. Diğer alaşımli çeliklerle karşılaştırıldığında, takım çeliklerinin işlenmesi önemli oranda daha zordur.

Takım çeliklerinin işlenebilirliği artan karbür ve alaşım miktarıyla azalır. Çünkü karbon ve alaşım miktarları arttıkça düşük tavlama sertlikleri elde etmek zorlaşır. Karbonun vanadyum, krom ve molibden gibi kararlı karbür oluşturu elementlerle birlikte varlığı, tavlama sonrası çözelti dışında kalan çok sayıda sert karbür parçacıklarını oluşturması dolayısıyla işlenebilirliği azaltır.

2.2.7. KARBONSUZLAŞMAYA DAYANIKLILIK

Bu, takım çeliklerinin seçiminde oldukça önemli olan bir faktördür. Zira, ısıl işlem donanımının seçimini ve sertleştirmeden sonra yüzeyden kaldırılması gereken malzeme miktarını etkiler. Karbonsuzlaşma, genellikle çeliklerin 700°C üzerinde ısıtılması durumunda oluşur ve koruyucu önlemler alınmadığı (koruyucu ortam içinde ısıtmak gibi) takdirde yüzeydeki karbonun bir kısmı kaybedilir. Bu ise, su vermeden sonra sert bir yüzey yerine

yumuşak bir yüzeyin elde edilmesine yol açar. Karmaşık şekle sahip kalıplar, sertleşmeden sonra büyük oranda taşlanamazlar. Bu yüzden karbonsuzlaşma göstermemelidirler. Orta karbonlu takım çelikleri en az karbonsuzlaşma gösterirler. Şok dirençli takım çelikleri bu özellik bakımından kötü, sıcak iş takım çelikleri orta ve diğer takım çeliklerinin çoğunluğu ise iyi bir karbonsuzlaşmaya sahiptirler.

2.3. TAKIM ÇELİĞİ TÜRLERİ

Takım çeliklerini sınıflandırmak için çeşitli yaklaşımlar vardır. Bunlardan bir tanesi, sertleştirme ortamına göredir; suda sertleşebilen takım çelikleri, yağda sertleşebilen ve havada sertleşebilen takım çelikleri gibi. Alaşım miktarı başka bir sınıflama yoludur; düşük orta ve yüksek alaşımli takım çelikleri gibi. Son yöntem takım çeliklerinin uygulanış biçimine göre yapılan sınıflamadır; sıcak iş takım çelikleri, şok dirençli çelikler (darbe çelikleri), yüksek hız çelikleri, soğuk iş takım çelikleri gibi.

Tablo 2.1. Takım çelikleri grupları ve işlenebilirlik oranları [3]

TAKIM ÇELİĞİ GRUPLARI	TALAŞLI İŞLENEBİLİRLİK ORANLARI
W- Suda sertleşebilen takım çelikleri	100
S- Şok dirençli takım çelikleri	85
O- Yağda sertleşebilen düşük alaşımli takım çelikleri	90
A- Orta alaşımli, havada sertleşebilen soğuk-iş takım çelikleri	85
D- Yüksek karbon, yüksek kromlu soğuk-iş takım çelikleri	40-50
H- Kromlu sıcak-iş takım çeliği	75
H- Tungstenli veya molibdenli sıcak-iş takım çeliği	50-60
T- Tungstenli yüksek hız takım çelikleri	40-55
M- Molibdenli yüksek hız takım çelikleri	45-60
L- Düşük alaşımli özel amaçlı takım çelikleri	90
F- Karbon-Tungstenli özel amaçlı takım çelikleri	75
P- Kalıp çelikleri	75-100

Tablo 2.1.'de AISI normuna göre takım çeliklerinin gruplaması yapılmaktadır. Tabloda gösterilen talaşlı işlenebilirlik oranları, suda sertleşebilen takım çeliklerinin işlenebilirliği 100 alınarak, buna göre karşılaştırma şeklinde yapılmıştır. Gerçekte, bu 100 değeri otamat çeliklerinin işlenebilirliğinin %30'u kadardır. Tabalodanda görüldüğü gibi yüksek hız çeliklerinin işlenebilirliği en düşüktür.

2.3.1 SUDA SERTLEŞEBİLEN TAKIM ÇELİKLERİ (W - GRUBU)

Bu çelikler, bazı yüksek karbonlu tipleri sertleşebilirliği ve aşınma dayanımını arttırmak amacıyla düşük miktarlarda krom ve vanadyum içermelerine rağmen genel olarak sade karbonlu (alaşımsız) çeliklerdir. Karbon oranları % 0,60 ila % 1,40 arasında değişir ve bu çelikler karbon oranına göre üç alt grupta incelenebilir.

a - % 0,60% 0,75 C 'lular: Çekiçler beton kırıcılar gibi tokluğun asıl aranılan özellik olduğu yerlerde kullanılır.

b - % 0,75% 0,90 C 'lular: Tokluk ve sertliğin eşit oranda önemli olduğu zımbalar, kesme bıçakları gibi yerlerde kullanılır.

c - % 0,90% 1,40 C 'lular: Aşınma dayanımının daha önemli olduğu ağaç işleme takımları, matkaplar, raybalar gibi yerlerde kullanılır.

Genel olarak bu tip takım çelikleri alaşımlı takım çeliklerinden daha ucuzdur ve uygun bir ısı işlem yardımıyla yumuşak bir merkeze karşılık sert martenzitik bir yüzey elde edilir. Bu çeliklere yüksek sertlik değerlerinin elde edilmesi için suda su verilmelidir. Bu nedenle önemli miktarda distorsiyon gösterirler. Bütün takım çelikleri içinde en iyi işlenebilirliğe ve karbonsuzlaşma direncine sahiptirler. Fakat sıcaklığa dirençleri kötüdür. Düşük kızıl sertliklerinden ötürü, kesme kenarlarında önemli miktarda ısı ortaya çıkan şartlar altında kullanılamazlar. Kullanım alanları; düşük kesme hızları, düşük kuvvetler ve görece yumuşak malzemeler olan ağaç, prinç, alüminyum ve sertleştirilmemiş düşük karbonlu çelikler gibi malzemelerin kesilmesi ile sınırlıdır.

2.3.2 ŞOK DİRENÇLİ TAKIM ÇELİKLERİ (S - GRUBU)

Bu tür takım çelikleri tekrarlı darbelere dayanım kabiliyeti ve tokluğun önemli olduğu durumlar için geliştirilmiştir. Karbon yüzdeleri genellikle yüksek değildir ve %0.45-0.65 arasındadır. Asıl alaşım elementleri silisyum, krom, tungsten ve bazende molibdendir. Krom sertleşebilirliği artırıp aşınma dayanımını iyileştirirken, silisyumda ferritin mukavemetini yükseltir. Tungsten bu çeliklere bir miktar kızıl sertlik özelliği kazandırırken, molibden sertleşebilirliğin artmasına yardımcı olur. Bu çeliklerin çoğu yağda sertleşebilir olmasına rağmen, bazılarında tam sertleşebilme için suda su verilmelidir. Yüksek silisyum miktarı karbonsuzlaşmayı hızlandırma eğilimi gösterdiği için, karbon kaybını minimize etmek amacıyla uygun tedbirler alınmalıdır. Kızıl sertlik, aşınma dayanımı ve talaşlı işlenebilirlik açısından orta kalitededirler ve sertlikleri genellikle RSD-C=60'ın altındadır. Bu gruptaki çelikler soğuk dövme kalıplarının, zımbaların, pnömatik takımların, kesme bıçaklarının ve keskinlerin yapımında kullanılırlar.

2.3.3 SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİKLERİ

Takım ve kalıp uygulamalarını büyük kısmında, bu gruptan bir veya birkaç çeliğin kullanılması nedeniyle, bu grup takım çelikleri en önemli grup olarak dikkate alınabilir.

Yağda sertleşebilen düşük alaşımlı grup (O-Grubu); mangan ve daha az miktarlarda krom ve tungsten içerir. Suda sertleşebilen takım çeliklerinden daha az distorsiyon gösterirler ve çok iyi boyut kalıcılığına sahiptirler. Bu çelikler nisbeten daha ucuzdur ve yüksek karbon içerikleri oda sıcaklığında ve civarında yeterli aşınma dayanımı sağlar. Yüksek silisyum oranları, karbürün tavlınmış durumda grafitleşmesini sağlayıp talaşlı işlenebilirliği iyileştirir. Bu çelikler iyi bir talaşlı işlenebilirliğe ve karbonsuzlaşma dayanımlarına sahip olmalarına karşılık toklukları orta değerdedir ve kızıl sertlikleri düşüktür. Saç işleme kalıpları, broşlar, ovalama takımları ve raybalarda kullanılırlar.

%1 karbonlu ara alaşımlı tipleri (A-Grubu) ; %3'e kadar mangan, %5'e kadar krom ve %1'e kadar da molibden içerirler. Artan alaşım miktarlar özellikle mangan ve molibden havada sertleşme özelliklerini artırır. Bu grup çok iyi boyut kalıcılığına, iyi bir aşınma dayanımına ve orta derecede tokluk, kızıl sertlik ve karbonsuzlaşma dayanımına sahiptir fakat talaşlı işlenebilirlikleri kötü ile orta arasındadır. Ovalama takımları çapak alma ve saç çekme kalıplarında kullanılırlar.

Yüksek karbon, yüksek krom tipleri (D - Grubu) % 2.25' e kadar karbon % 12 civarında krom içerirler. Ayrıca molibden, vanadyum ve kobalt bulunur. Yüksek karbon ve kromun etkisi ile iyi bir aşınma dayanımı ve boyut kalıcılığına sahiptir. Bu özellikleri dolayısıyla tel, çubuk ve boru çekme matrislerinde, ovalama kalplarında ve master yapımında kullanılırlar.

2.3.4 SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİ (H - GRUBU)

Takımlar ve kalıplar, çoğu zaman, sıcak dövme, ekstrüzyon, basınçlı döküm ve plastik kalıplamada olduğu gibi, şekil verilen malzemenin sıcak oluşu nedeniyle aşırı ısı etkisine girerler. Bu tür uygulamalar için geliştirilen takım çelikleri sıcak iş takım çeliği olarak bilinir ve iyi bir kızıl sertliğe sahiptirler. Kızıl sertlik için gerekli alaşım elementleri, krom, molibden ve tungstendir. Fakat kızıl sertliğin kabul edilebilir seviyede olması için bu elementlerin toplamının en az % 5 olması gerekir. Sıcak iş takım çelikleri üç alt grupta incelenebilir.

a - Kromlu sıcak iş takım çelikleri (H11....H19): Bunlar en az % 3,25 krom, daha az oranlarda vanadyum, tungsten ve molibden içerir. Karbür oluşturuvcu vanadyum, tungsten ve molibden gibi elementlerce desteklenen orta seviyede krom miktarları, dolayısıyla da iyi derecede kızıl sertlikleri vardır. Karbon miktarlarının ve toplam alaşım yüzdesinin nispeten az olması, normal çalışma sertliklerinin RSD - C = 40 ila 55 arasında bulunmasına neden olur. Daha yüksek tungsten ve molibden miktarları kızıl tokluklarını bir miktar azaltır. Bu çelikler 300 mm 'ye kadar olan kesitlerin bile havada tam olarak sertleşebileceği oranda sertleşme kabiliyeti olan çeliklerdir. Havada sertleşebilirlikleri ve dengelenmiş alaşım içerikleri nedeniyle sertleşme sırasında düşük miktarlarda şekil değişimi göstermelerine neden olur. Bunlardan H11 çeliğinin ilginç bir uygulama alanı, özellikle süpersonik uçaklarda yüksek gerilmeler altındaki elemanlarda kullanılmasıdır. Bu çeliğin klasik yüksek mukavemetli çeliklere göre en önemli avantajı 540 °C 'ye kadar erişen sıcaklıklarda sürekli ısı altında bile yumuşamaya karşı gösterdiği direnç ve aynı zamanda 2100 MPa' lık çekme dayanımında orta seviyede bir tokluk ve süneklik gösterebilmesidir. H11 çeliğinin bu uygulamalar için diğer bir önemli avantajı ostenitik durumda çok kolay biçim verilebilmesidir. İyi kaynak kabiliyeti ve düşük ısı genleşme katsayısı yanında orta seviyede korozyon ve oksidasyon dayanımı vardır.

b - Tungstenli sıcak iş takım çelikleri (H21....H26): En az % 9 tungsten ve % 2 ila 12 arasında krom içerirler. Bu yüksek alaşım elemanları kromlu sıcak iş çeliklerine göre, bu çeliklerin yüksek sıcaklıklardaki yumuşamaya dirençlerinin daha iyi olmasına yol açar. Buna

karşılık RSD - C = 45 ila 55 arasında olan çalışma sertliklerinde daha gevrek karakterli olmalarına yol açar. Havada düşük distorsiyonlarla sertleştirilebileceği gibi tufal kaybını minimize etmek amacıyla yağ veya sıcak tuz banyosunda da sertleştirilebilir. Çok daha büyük tokluklara sahip olmalarına rağmen bu çelikler yüksek hız çeliklerinin karakteristik özelliklerinin çoğuna sahiptir. Örneğin H26 tipi gerçekte T1 yüksek hız çeliğinin düşük karbonlu bir çeşididir. Bu sıcak iş takım çelikleri malafalar, prinç ve nikel alaşımları ve çeliklerin sıcak ekstrüzyon takımlarında kullanılır.

c - Molibdenli sıcak iş takım çelikleri (H41....H43): % 8 kadar molibden, % 4 krom ve daha az oranlarda tungsten ve vanadyum içerirler. Bu çelikler tungstenli sıcak iş çeliklerinin özelliklerine denk niteliklere sahiptir ve benzer yerlerde kullanılırlar. Bileşim olarak molibdenli yüksek hız çeliklerine, karbon oranının daha düşük olması dışında benzerdir, fakat toklukları daha yüksektir. Tungstenli sıcak iş çeliklerine göre biraz daha ucuzdurlar ve sıcak çatlamaya karşı tungstenlilerden daha dayanıklıdır. Buna karşılık ısıtma sırasında karbonsuzlaşmaya dayanıklılıklarının daha az olması nedeniyle ısıtma sırasında daha büyük dikkat gösterilmesini gerektirirler.

Sıcak iş takım çelikleri, takım çeliği grubu olarak nisbeten düşük karbon içerikleri nedeniyle toklukları iyidir. Kızıl sertlikleri iyi, aşınma dayanımları ile talaşlı işlenebilirlikleri orta derecededir. Sadece karbonsuzlaşmaya dayanımları zayıftır, fakat havada sertleştirildiklerinde çok iyi boyut kalıcılığı gösterirler.

2.3.5 YÜKSEK HIZ ÇELİKLERİ

Bu çelikler, takım çelikleri içinde en yüksek alaşımlı olanlarıdır. Genellikle büyük miktarlarda tungsten veya molibdenle birlikte krom, vanadyum ve bazende kobalt içerirler. Bazı tiplerinde %1.5'e kadar olabilmesine rağmen , karbon oranları %0.7 ila 1 arasındadır.

Yüksek hız çeliklerinin esas kullanım alanları kesme takımları yapımı olmasına rağmen ekstrüzyon kalıplarında, sac işleme zımbaları ve kalıplarında da kullanılabilirler.

Yüksek hız çeliklerinin bileşimleri, çok iyi kızıl sertlik ve kabul edilebilir darbe dayanımı oluşturacak şekilde ayarlanır. İyi bir boyut kalıcılığına sahiptirler ve hava,yağ ve erimiş tuz banyosunda sertleştirilebilirler. Derin sertleşebilir gruptandır ve iyi bir aşınma dayanımına, orta derecede talaşlı işlenebilirliğe ve orta ile kötü arası karbonsuzlaşma dayanımına sahiptirler.

Yüksek hız çelikleri iki alt gruba ayrılabilir; molibdenli yüksek hız çelikleri (M-Grubu) ve tungstenli yüksek hız çelikleri (T-Grubu). En çok kullanılan tungstenli yüksek hız çeliği 18-4-1 (T1) çeliğidir. Rakamlar sırasıyla tungsten, krom ve vanadyum yüzdelerini verir. Molibdenlilerinin biraz daha ucuz olmaları dışında iki grup arasında önemli bir fark yoktur.

Ortadan daha iyi kalite kızıl sertlik arandığında kobaltlı yüksek hız çelikleri tavsiye edilir. Kesilecek malzeme, yüksek oranda aşındırıcı ise daha yüksek vanadyum miktarları arzu edilir. T15 tipinde, kobalt ve vanadyumun uygun bir karışımı, kızıl sertlik ve aşınma direncinin maksimum değerlerini vermektedir. Yüksek kobaltlı yüksek hız çeliklerinin kullanımı, ısı işlemlerinde karbonsuzlaşmaya karşı daha dikkatli bir koruma yapmayı gerektirir ve bunlar oldukça gevrek oldukları için aşırı darbe ve titreşimlere karşı korunmalıdır.

Sert ve ısıya dayanıklı bir matris içindeki çok sayıda aşınmaya dayanıklı karbürlerin varlığı, buçelikleri kesme takımları yapımına uygun kılar. Yüksek hız çelikleri matkaplar, raybalar, testereler, ağaç işleme takımları ve broşlar gibi kesme takımları yapımında kullanılırlar.

2.3.6 KALIP (DÖKÜM KALIPLARI) ÇELİKLERİ (P-GRUBU)

Bu çelikler asıl alaşım elementi olarak krom ve nikel, yardımcı elementler olarak da molibden ve alüminyum içerirler. Bu çeliklerin çoğu, takım çeliği kalitesinde üretilen alaşımli sementasyon çelikleridir. Genellikle tavlı durumdaki çok düşük sertlikleri ve pekleşmemeleri ile karakterize edilirler. Bu özellikten faydalanarak sert bir cismi bu malzemenin yüzeyine bastırarak istenilen kalıp boşluğu oluşturulabilir. Daha sonra bu çelikler sementle edilerek RSD-C=58 İLE 64 arasında bir yüzey sertliğine kadar sertleştirilebilirler. P4 tipi haricinde bu çelikler kötü bir kızıl sertliğe sahiptir ve bu yüzden hemen hemen tümüyle düşük sıcaklıkta çalışan basınçlı döküm kalıplarında ve plastik enjeksiyon kalıplarında kullanılırlar. P20 ve P21 tipleri normal olarak RSD-30 ile 35 arasındaki sertliklerde ve ıslah edilmiş halde satılırlar ve büyük karmaşık kalıpların işlenmesine derhal geçilebilir. Önceden sertleştirilmiş oldukları için, sonradan bir ısı işleme gerek kalmaz ve böylece boyut değişimleri de önlenmiş olur.

2.3.7 ÖZEL AMAÇLI TAKIM ÇELİKLERİ

Bir çok takım çeliği genel sınıflamanın hiç birine girmez ve özel amaçlı takım çelikleri olarak sınıflandırılabilir. Belirli özel bir uygulama için özel olarak geliştirilmişlerdir ve başka bir uygulama için standart takım çeliklerine göre çok daha pahalıya mal olur. Düşük alaşımli (L-Grubu) tipleri asıl alaşım elementi olarak krom ve bunun yanında vanadyum, molibden ve

nikel içerir. Yüksek krom miktarları karmaşık yapıli demir-krom karbürlerin oluşumu yoluyla aşınma dayanımı sağlar ve molibdenle birlikte sertleşebilirliği artırır. Vanadyum tane irileşmesini engellerken, nikel de tokluğu artırır. Bu çelikler yağda sertleşebilir ve boyut kalıcılığı orta kalitededir. Tipik kullanım alanları yataklar, rulmanlar, bilezikler, kavrama aynaları, kamlar ve anahtar ağızı gibi yüksek aşınma dayanımı ile birlikte iyi bir tokluğun gerektiği makina-takım yapımıdır. Yüksek karbonlu tipleri, kalıplar, kılavuzlar, ölçü aletleri, mandrellerin yapımında kullanılırlar.

Karbon tungsten tipi (F-Grubu, yüksek karbon ve tungstenli yapıları, suda sertleşebilen, genellikle düşük sertleşebilirlikli ve yüksek aşınma dayanımlı olmalarını sağlar. Bazı işlem şartlarında bu çelikler W-Grubu takım çeliklerinin dört ile on katı aşınma dayanımına sahip olabilirler. Nisbeten gevrek olmaları dolayısıyla, aşırı aşınma, düşük sıcaklıklar ve az darbeli uygulamalarda kullanılırlar. Tipik kullanım yerleri, kağıt kesme bıçakları, tel çekme lokmaları ve bazı torna kalemleridir.

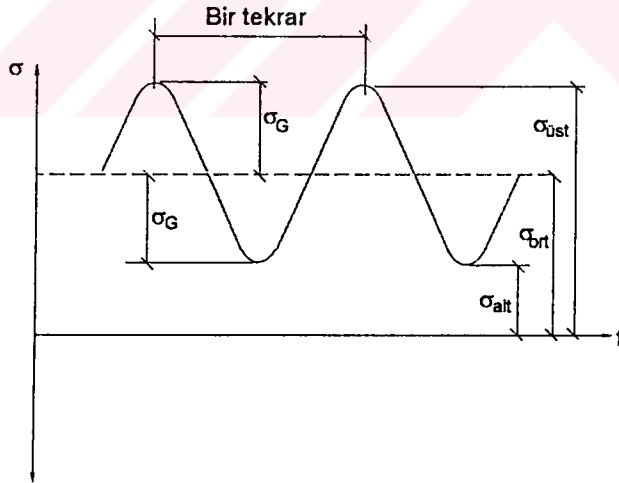


BÖLÜM 3. YORULMA

3.1 GİRİŞ

En yüksek değeri statik kırılma büyüklüklerine ulaşmayan, ancak zamanla değişen ve tekrarlanan bir zorlamanın, malzemede kırılmaya kadar gidebilen olumsuz etkilerine yorulma denir. Söz konusu tekrarlanan zorlamalar böyle bir etki (hasar) yaratma koşulu aranmaksızın, genel olarak yorulma zorlamaları diye adlandırılır. Malzemelerin yorulma davranışı ve konstrüksiyonların yorulma açısından hesaplanması, etkenlerin çokluğu nedeniyle statik zorlamalara göre, oldukça karmaşıktır. Makina parçalarının çoğunlukla dinamik zorlamalar altında çalıştığı ve özellikle makina mühendisliğinde konstrüksiyonların yorulma dayanımlarının statik dayanımlardan daha önemli olduğu unutulmamalıdır.

Yorulma ömrü, kırılıncaya kadar uygulanan tekrar sayısıyla verilir.



Şekil 3.1. Yorulmada Kullanılan Değişkenlerin Tanımı

Yorulma Dayanımı (σ_y): Malzemenin bir tekrar sayısında kırılmadan kalabileceği maksimum gerilme değeridir. Tekrar sayısı mutlaka verilmelidir.

Gerilme Tekrarı (T): Bir tekrar, gerilme - zaman fonksiyonunda periyodik olarak tekrar edilen en küçük kısımdır.

Tekrarlama Sayısı (n): Bir parçanın herhangi bir durumda yük tekrar sayısı.

Yorulma Ömrü (N): Verilen bir gerilmede numunenin dayanabildiği tekrar sayısı.

Üst Gerilme ($\sigma_{üst}$): Bir gerilme tekrarındaki en büyük cebrik gerilme değeridir. Çekme gerilmesi pozitif, basma gerilmesi negatif olarak kabul edilir.

Alt Gerilme (σ_{alt}): Bir gerilme tekrarındaki en küçük cebrik gerilme değeridir. Çekme gerilmesi pozitif, basma gerilmesi negatif olarak kabul edilir.

Gerilme Genliği (σ_G): Mutlak değer olarak üst veya alt gerilme değeri ile ortalama gerilme arasındaki farktır.

Ortalama Gerilme (σ_{ort}): Bir tekrardaki üst ve alt gerilmenin matematiksel ortalaması yani $\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{üst} + \sigma_{alt}}{2}$ dir. Yorulma dayanımının hangi σ_{ort} için bulunduğu çoğunlukla $\sigma_y = \sigma_{ort} \pm \sigma_G$ veya $\sigma_y = \dots$ için $\sigma_y \pm \sigma_G$ şeklinde gösterilir. Yorulma dayanımının sayısal değeri ise genliğin mutlak değerine eşittir. $\sigma_y = |\sigma_G|$

Başka bir şekilde verilmediği takdirde yorulma zorlamasının türü çekme, basma ve eğme zorlamaları için sırasıyla ç, b ve e indisleri ile verilir. Burulmada ise τ kayma gerilmesi sembolü asıl olmak üzere yukarıda belirtilenler geçerlidir.

Gerilme Oranı (R): $\sigma_{alt} / \sigma_{üst}$ oranıdır.

Gerilme - Ömür Diyagramı (Wöhler Diyagramı): Gerilmelerin, yorulma ömürlerine karşılık çizildiği eğrilerdir. Genellikle $\sigma - \log N$ şeklinde çizilirler.

Sürelî Yorulma Dayanımı: Belli bir çevrim sayısına karşılık (örneğin $N = 100000$) verilen yorulma dayanımı değeridir.

Yorulma Ömrü: Bir deney parçası veya yapı elemanının yorulma ömrü, yorulma dayanımından daha yüksek bir gerilmeye kırılmanın olduğu çevrim sayısıdır. Yorulma ömrünün gösteriminde ortalama gerilme ve gerilme genliği, sözkonusu kırılma çevrim sayısına indis olarak eklenir. $N_{(+8\pm14)} = 2 \cdot 10^6$ gösterimi ile $\sigma_{ort} = +8 \text{ kgf/mm}^2$ ve $\sigma_G = \pm 14 \text{ kgf/mm}^2$ olan bir zorlamada, kırılmanın $2 \cdot 10^6$ çevrim sayısında olduğu anlaşılmaktadır.

3.2 YORULMA HASARININ OLUŞUM SAFHALARI

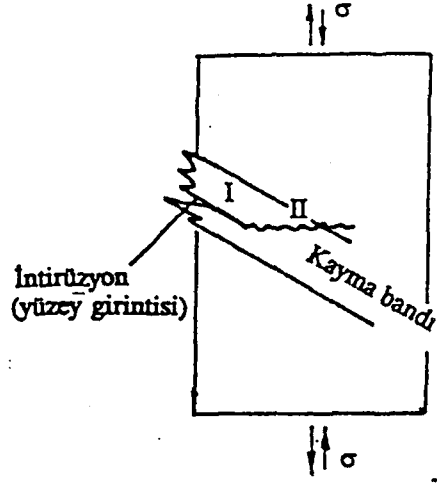
Kırılma esas alındığında, yorulma hasarı genel olarak 4 aşamadan oluşur. Bunlardan son aşama olan kırılma, hariç tutulduğunda ilk 3 aşama Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

1. Yorulma çatlığının çekirdeklenmesi: Yerel ve tersinir olmayan plastik şekil değiştirmeler sonucu yüzeyde intrüzyonların (yüzey girintilerinin) oluşması.

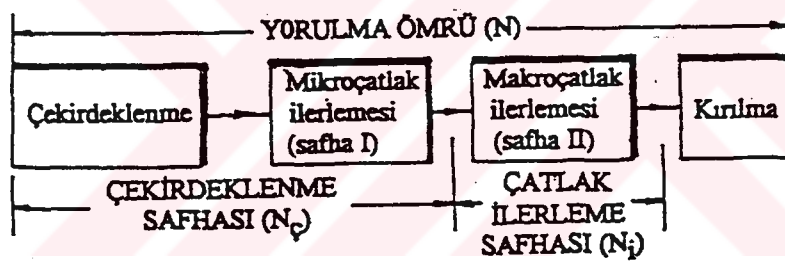
2. Çatlığın yerel plastik deformasyon (kayma) bandında ilerlemesi: Çekirdeklenen çatlığın, yüksek kayma gerilmelerinin mevcut olduğu ve çekme doğrultusuyla 45 açı yapan kayma bandı içinde ilerlemesi. Buna "safha 1" çatlak ilerlemesi adı verilir.

3. Çatlığın maksimum çekme gerilmesinin etki ettiği düzlemde ilerlemesi: Uzunluğu makro çatlak olarak kabul edilebilecek ölçüde olan çatlığın maksimum çekme gerilmesine dik düzlemde ilerlemesi. Buna "safha 2" çatlak ilerlemesi adı da verilir.

4. Kırılma: Çatlak uzunluğunun kritik bir değere ulaşması, kalan kesidin kırılması. Bu kırılmaya "zoraki kırılma" adı da verilmekte olup, kırılma sünek veya gevrek biçimde olabilir. Şekil 3.3'te tüm safhalar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Yorulma Hasarının İlk Üç Safhası



Şekil 3.3. Yorulma Hasarının Safhaları [4]

Yorulma hem çekirdeklenme hem de çatlak ilerlemesi safhalarında plastik deformasyon sonucu oluşur. Her safhaya karşılık gelen tekrar sayısı kolaylıkla saptanamaz. Kırılma, ömrün en son tekrarında oluşur ve hasarın bu safhası yorulmadan ziyade yarı statik bir kırılmadır. Mikroskopik etüdümler çatlak çekirdeklenmesinin yorulma ömrünün ilk başlarında oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. Safha 1 çatlak ilerlemesinin hangi tekrar sayısından sonra başladığını saptamak kolay değildir. Ancak, buna pratikte gerek yoktur. Bu durumda yorulma hasarının ilk iki safhası birleştirilerek bir basitleştirme yapılabilir. $N = N_c + N_i$

Burada, N yorulma ömrü, N_c ilk iki safha için geçen tekrar sayısı olup, ilk iki safhanın toplamı çekirdeklenme safhası olarak kabul edilmiştir. N_i ise makro çatlak ilerlemesinde (safha 2) geçen tekrar sayısıdır. Bu basitleştirmeden sonra ortaya şu soru çıkmaktadır: Bir mikroçatlak ne zaman makroçatlak haline gelir? Makroçatlağın klasik tanımı, çıplak gözle seçilebilecek

uzunluğa sahip çatlaktır. Ancak bu tanım oldukça kabadır. Bir çatlak, kırılma mekaniği prensipleri uygulanabilecek kadar büyükse makroçatlak olarak kabul edilir. Bu değer alüminyum alaşımlarında 0,125 mm ve çeliklerde 0,2 mm civarında olduğu deneysel olarak gösterilmiştir.

Yorulma safhalarının bu kadar detaylı olarak incelenmesinin nedeni, farklı uygulamalarda farklı safhaların önem kazanmasıdır. Aşağıdaki üç örnek bize bu konuda fikir verebilir.

1. Otomobil motoru: Çatlak oluşmamalıdır. Sonsuz ömür istenir, bu nedenle çatlak ilerlemesi safhası konu dışındadır. Amaç, çatlak çekirdeklenmesi oluşmayacak şekilde tasarım ve imalattır.

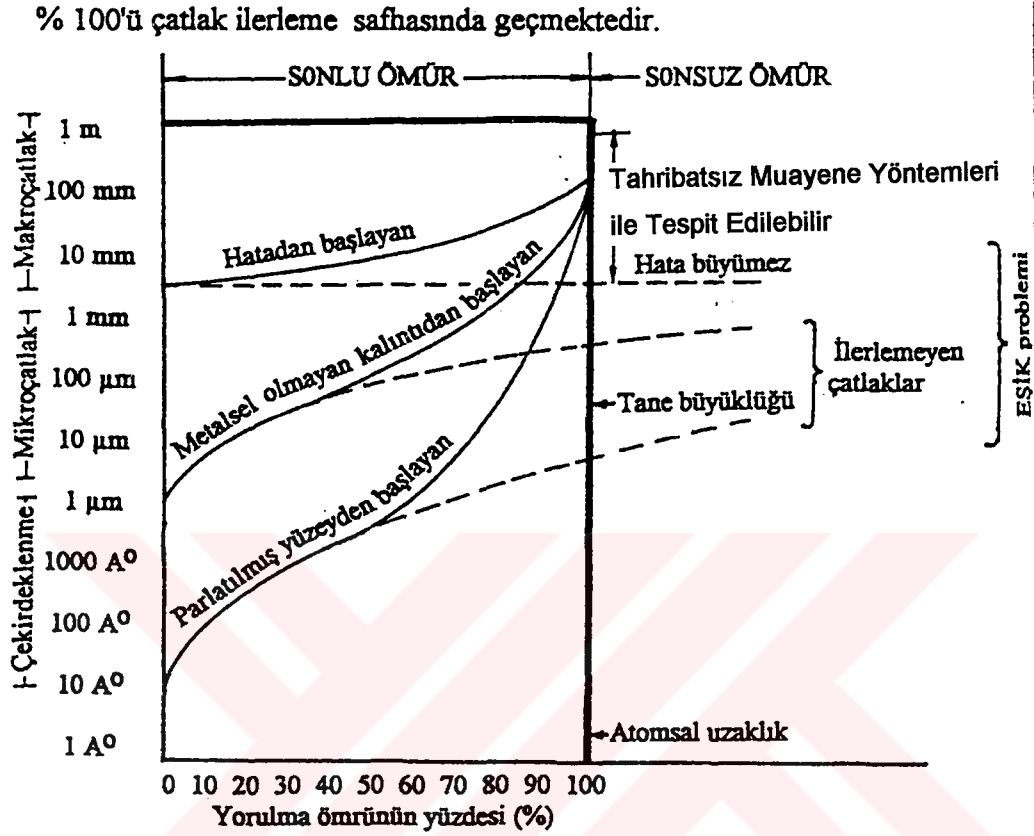
2. Nükleer basınçlı kap: Kaynakla imal edilen bu yapılarda bir takım başlangıç hataları beklenmelidir. Bu nedenle, çatlak çekirdeklenmesi önemini kaybetmiştir. Çatlak ilerleme safhası (çok yavaş) önem kazanmıştır.

3. Uçak gövdesi: Sonlu bir ömür kabul edilmelidir. Bu nedenle tasarım ve imalatta hem çekirdeklenme hemde çatlak ilerleme safhaları önem kazanır.

Yorulma çatlağı genellikle malzeme yüzeyinde oluşur. Bunun nedenlerini şöyle sıralayabiliriz:

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

Çatlak, yüzeyde birden fazla noktada çekirdeklenebilir. Gerilme genliği arttıkça, bunların sayıları artar. Ancak yorulma sınırına yakın gerilme değerlerinde tek bir çatlak çekirdeklenmesi olabilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.5. Yorulma Çatlağı Uzunluğunun Yorulma Ömrünün Yüzdesine Göre Değişimi

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

3.3. YORULMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Standart deney parçaları 8-10 mm. çapında olup ayna parlaklığında yüzeye sahiptirler. Herhangi bir çentik içermezler ve 10^6 ve daha yüksek tekrar sayılarına karşılık gelen yorulma dayanımı yorulma sınırı olarak kabul edilebilir. 10^6 'dan küçük tekrar sayılarında çift logaritmik

skaladan yorulma dayanımı doğrusal bir değişim gösterir. 10^3 'ten düşük tekrarlara karşılık gelen yükler statik yük olarak kabul edilebilir.

Yorulma olayı bilindiği gibi kesin bir olay olmadığından aynı gerilme genliklerinde dahi değişik kırılma sayıları elde edilebilmektedir. Bundan da anlaşılabilceği gibi birçok faktör yorulma olayına etkilidir. Bu faktörleri şu şekilde sıralayabiliriz:

- Korozyon Etkisi
- Sıcaklık
- Yük Tekrar Frekansı
- Yükleme Şekli
- Boyut Faktörü
- Yüzey İşleme Faktörü
- Gerilme Genliğinin Etkisi
- Ön gerilmenin Etkisi
- Yüzey Sertleştirme İşlemlerinin Etkisi (Yüzeyin dövülmesi, çekiçlenmesi, kaplanması)
- Gerilme Yığılmalarının Etkisi

3.3.1. KOROZYON ETKİSİ

Vakumda yapılan deneylerde numuneler normal yorulma deneyine göre daha fazla yük tekrarına dayanırlar. Korozyon etkisi yapan gazların çok küçük miktarları bile sonucu oldukça fazla etkiler. Sulu çözeltilerde yapılan yorulma deneylerinde Wöhler Eğrisinin daha aşağıda yer aldığı ve 10^9 tekrarıdan sonra bile düşmeye devam ettiği görülmüştür.

3.3.2. SICAKLIK

Yaklaşık 200°C 'ye kadar sıcaklığın bir etkisi yoktur; ancak daha yüksek sıcaklıklarda yorulma dayanımı azalır. Yüksek sıcaklıklarda çeliklerin dayanımı statik veya tekrarlı gerilmelerin uygulama süresine bağlıdır. 0°C 'nin altındaki sıcaklıklarda çeliklerin çekme, akma dayanımları ile yorulma dayanımları artmaktadır. -20 ile 40°C arasındaki yani pratikte çok rastlanan sıcaklık aralıklarında yorulma dayanımlarındaki bu artış farkedilir değildir.

3.3.3. YÜK TEKRAR FREKANSI

Metallerde 10^4 tek./dak. kadar ısınma meydana gelmez. Bu nedenle bu bölgede frekansın bir etkisi yoktur. Plastik maddelerde 10 Hz. civarında dahi ısınma meydana gelir ve böylece yumuşar yani dayanım değeri düşer.

3.3.4. YÜKLEME ŞEKLİNİN WÖHLER EĞRİSİNE ETKİSİ

Yorulmada aksel, eğilme ve burulma olmak üzere 3 temel yükleme mevcuttur. Yorulma sınırı eğilme ile saptandığından, pratikteki eğilme yükleri için düzeltmeye gerek yoktur. Ancak tam değişken aksel yüklemeye maruz parlatılmış deney parçalarının yorulma sınırı eğilmeye maruz deney parçalarının yorulma sınırının % 85'i kadardır. Parlatılmış parçaların tam değişken burulmadaki yorulma sınırı ise eğilmedeki sınırın % 58'i kadardır. Yükleme Wöhler Eğrisi 10^3 tekrara karşılık gelen noktasını da aşağıdaki gibi etkiler.

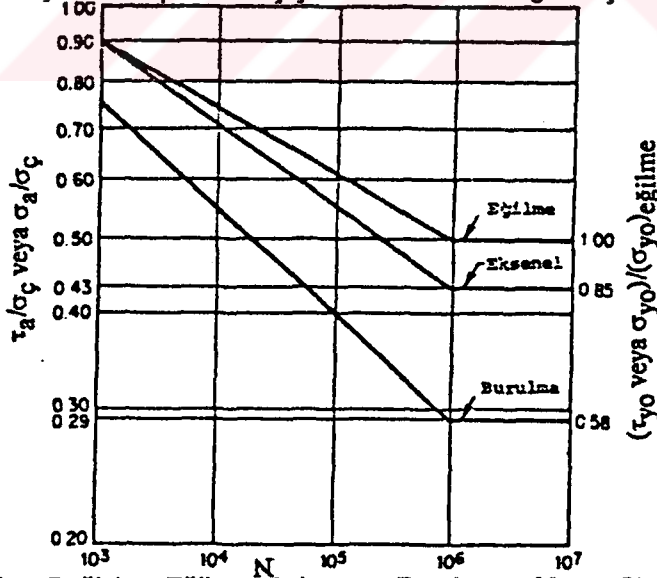
* Tam değişken eğilmede $\sigma_g = 0.9 \sigma_g$

* Tam değişken aksel yüklemeye $\sigma_g = 0.9 \sigma_g$

* Tam değişken burulmada $\tau_g = 0.9 \tau_b$

Burada τ_b malzemenin burulma dayanımıdır. Eğer τ_b 'nin değeri bilinmiyorsa $\tau_b = 0.82\sigma_g$ alınabilir. Bu durumda $\tau_g = 0.74\sigma_g$ elde edilir.

Üç tip yüklemeye maruz parlatılmış çeliklerde Wöhler Eğrileri şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Tam Değişken Eğilme, Çekme ve Burulmaya Maruz Standart Çelik Parçalarda Wöhler Eğrileri

Yukarıda verilen düzeltme değerleri, çeliklerin yorulmasında kısa sürede bir tahmin yürütmek amacıyla kullanılan rehber değerlerdir. Bunlar gerçek değerlere oldukça yakın sonuç verirler. Daha kesin değerler için, göz önüne alınan malzemenin deneylerle Wöhler Eğrilerini saptamak veya mevcutsa ilgili kaynaklardan temin etmek gerekir.

3.3.5. BOYUT FAKTÖRÜ

Parça kesitinde üniform olmayan gerilmelere neden olan eğilme ve burulma şeklindeki yüklemelerde yorulma sınırı, parça boyutları arttıkça azalır. Örneğin ince bir telin yorulma sınırı standart deney parçasının yorulma sınırından daha yüksektir. Buna karşılık 50 mm. çapındaki bir parçadaki yorulma sınırı standart parçadaki değer %85'i kadardır. Daha büyük parçalarda bu değer %75'e kadar düşebilir.

Eğilme halinde boyut faktörünün değerleri parça çapına bağlı olarak aşağıda verilmiştir. Bu katsayı eğilme ve burulma zorlamalarında kullanılır. Çekme ve basma zorlamalarında kuvvetin bütün zorlanan kesite eşit dağıldığı kabul edildiğinden bu katsayı 1 alınır.

Tablo 3.1. Boyut Faktörü

Çap D (mm)	Faktör
D < 10	1
10 < D < 50	0.9
50 < D < 230	$1 - (D - 7.6)/380$

Boyutun 10^3 tekrar noktasına etkisi, 10^6 tekrar noktasına nazaran ihmal edilecek kadar küçüktür.

3.3.6. YÜZEY İŞLEME FAKTÖRÜ

Yorulma kırılmaları daima max. gerilmelerin bulunduğu noktalardan başlamaktadır. Yüzeylerin oluşturulması sırasında kesme takımlarının yüzeyde oluşturduğu pürüzler ve döner elemanlardaki ince dişler yorulma dayanımını azaltan gerilme yığılmaları oluştururlar. Makina elemanının yüzeyinin hassas veya kaba işlenmesi de dayanım değerlerini etkiler. Kaba işlenmiş yüzey, pürüzlü bir çeşit çentikli yüzeydir. İşlenme kabalaştıkça yüzeydeki pürüzler

artar ve dayanım küçük oranda da olsa azalır. Genellikle taşlanmış ve parlatılmış çelik yüzeylerde parlatma çizgileri ana çekme gerilmesi yönünde ise yorulma dayanımı en yüksek değerine ulaşır.

Tablo 3.2. Yüzey İşleme Faktörünün yorulma Dayanımı Üzerine Etkisi

Çekme Dayanımı (N/mm ²)	300	400	500	600	700	800	1000
Parlatılmış	1.00	1.00	1.000	1.00	1.000	1.000	1.00
İnce taşlanmış	1.00	0.99	0.985	0.99	0.975	0.972	0.97
Taşlanmış	0.97	0.96	0.950	0.94	0.935	0.932	0.93
Hassas tornalanmış	0.93	0.92	0.910	0.90	0.890	0.885	0.88
Tornalanmış	0.91	0.90	0.880	0.86	0.840	0.820	0.78
Tufallı	0.80	0.74	0.670	0.61	0.560	0.510	0.43

3.3.7. GERİLME GENLİĞİNİN ETKİSİ

Gerilme genliği yorulmada birinci derecede değişkendir. Daha önce anlatıldığı gibi uygulanan gerilme genliklerinde küçük bir azalma veya artma malzeme ömrü üzerinde büyük oranda değişiklikler yapar.

3.3.8. ÖN GERİLMENİN ETKİSİ

Pratikte çoğunlukla karmaşık gerilme durumlarıyla karşılaşılır. Yorulma kırılmalarının bir kayma bandındaki değişen kayma ve kesme etkilerinden oluştuğu daha önceden anlatılmıştı. Bir kayma düzlemindeki kesme gerilmesi genliği büyüdükçe bu düzlemdeki birim uzama genliği de büyük demektir.

3.3.9. YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİNİN ETKİSİ

Yüzey sertleştirme kullanıldığı zaman parçanın bütün yüzeyi sertleştirilmelidir. Çünkü sertleştirilmemiş bölge sınırlarında yorulma dayanımı keskin bir şekilde düşmektedir.

Nitrürasyonla da iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Nitrürasyon, tabaka kalınlığına bağlı olarak, eğilme yorulması dayanımını % 20-35 arasında iyileştirmektedir.

3.3.9.1. YÜZEYİN DÖVÜLMESİ

Yüzeyde artık basma gerilmesi oluşturan dövmelemler, çekişlemler de ısı yüzey sertleştirmeleri gibi yorulma dayanımını yaklaşık olarak % 27-33 arttırmaktadır veya küçük bilyalarla yüzeyin dövülmesi yerine haddelerle basınç uygulayarak ta yüzeyde artık basma gerilmeleri oluşturularak orantılı olarak eğilme yorulması dayanımında yaklaşık % 10-25 arasında artışlar sağlamak mümkün olmuştur.

3.3.9.2. ELEKTROLİTİK KAPLAMA VE METAL PÜSKÜRTME

Krom kaplama aşınma ve korozyona karşı korunma sağlar fakat yorulma dayanımını kötü yönde etkiler. Metal püskürtme çok ince ve küçük çatlaklar demek olan boşluklar ve tabakalar meydana getirdiği için yorulma dayanımını düşürür. Örneğin bazı araştırmacılara göre metal püskürtme yolu ile kaplanmış Al-Cu-Mg alaşımı için bu düşüş yaklaşık % 14 olmaktadır.

3.3.10. GERİLME YIĞILMALARI ETKİLERİ

Kesit değişimleri, delikler, kama yuvaları buldukları noktalarda çentik etkisi yaparak aşırı gerilme artışlarına yol açtıkları için çatlakların başlangıç noktalarını teşkil ederler. Dolayısıyla yorulma dayanımı değerlerini önemli ölçüde etkilerler. Yorulma zorlamaları altında biçim ve yüzey etkilerine karşı olan duyarlık malzemeden malzemeye farklıdır. Söz konusu davranışın ölçütü olarak yorulma çentik katsayısı $\beta_{\text{çen}}$ tanımlanır. Bu katsayı düzgün şekilde yüzeyi parlatılmış dolu bir çubuğun yorulma dayanımının, çentikli bir parçanın yorulma dayanımına oranıdır.

$$\beta_{\text{ç en}} = \frac{\sigma_{Y\text{ç entiksiz}}}{\sigma_{Y\text{ç entikli}}}$$

Yorulma çentik katsayısının saptanmasında aynı malzemeden çentiksiz ve çentikli (yuvarlak veya sivri çentikli, boyunu, enine delikler içeren vb.) deney parçaları kullanılır. Çentikli parçada bulunan kuvvet veya momentten yorulma dayanımına geçebilmek için mukavemetin temel denklemlerinden yararlanılır ve böylece çentiksiz parçanın yorulma dayanımında daha düşük değerler elde edilir.

Çentikli parçalarda yorulma dayanımı olarak bu şekilde saptanan gerilme değerine anma gerilmesi veya hesaplanan gerilme adı verilir. Gerçekte çentik dibinde ve çevresinde bu anma gerilmesinden oldukça yüksek gerilme yığılmaları bulunmaktadır.

Yorulma çentik katsayısı belirlenirken daha güvenilir sonuçlara ulaşmak için değerlendirmede istatistik yöntemler kullanılmalıdır. Yorulma çentik katsayısına çentik şekli, çentik boyutları, malzeme, sıcaklık, ortam, ortalama gerilmenin seviyesi, zorlama türü (çekme, eğme, burma), zorlama frekansı ve süresi gibi değişik faktörler etki ettiğinden ilgili çizelge ve diyagramların kullanımında dikkatli olunmalıdır. Yorulma çentik katsayısına değişik faktörlerin etkisine örnek olarak X22CrMoV12.1 ısıya dayanıklı alaşımlı çeliği için oda sıcaklığı ve 550°C'de, eğme değişken, çekme basma değişken ve burma değişken zorlamaları altında çevresel sivri çentikli ($r=0.1$) deney parçalarında saptanan yorulma çentik katsayısı değerleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 3.3. Gerilme Yığılmalarının Etkisi

Zorlama Türü (Değişken)	Deney Sıcaklığı °C	Yorulma Dayanımı (Düz Çubuk) kg / mm ²	Yorulma Dayanımı (Çentikli Çubuk) kg / mm ²	Yorulma Çentik Katsayısı
Eğme	20 (1)	± 49	± 21	2.3
	550 (2)	± 27	± 13	2.1
Çekme - Basma	20 (1)	± 45	± 13.5	3.3
	550 (2)	± 25	± 9.5	2.6
Burma	20 (1)	± 33	± 21	1.6
	550 (2)	± 22	± 14	1.6
(1) Sınır çevrim sayısı 10.10 ⁶				
(2) Sınır çevrim sayısı 38.10 ⁶				

Aynı zorlama türü için en yüksek yorulma çentik katsayısı, ortalama gerilmenin sıfır olduğu durumda yani değişken yorulma dayanımı için bulunur. Yüzey dayanımını arttıran sementasyon, alevle yüzey sertleştirme, endüksiyonla yüzey sertleştirme, nitrüleme, soğuk haddeme, bilya püskürtme gibi işlemler sonucu yorulma çentik katsayısı azalır. Sıcaklık, ortalama gerilme, yükleme süresi ve gerilme genliğine bağlı olarak ve çelik türüne göre yüksek sıcaklıktaki yorulma çentik katsayısı oda sıcaklığı değerinden düşük veya yüksek olabilir.

3.4. WÖHLER EĞRİLERİ

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

Sonsuz sayıda yük tekrarını kırılmadan taşıyabilen bir yapı elemanı, yorulmaya karşı dayanıklıdır denir. Taşınabilir en büyük anma gerilmesi genliği de yapı elemanının yorulma dayanımı olarak adlandırılır. Bir yapı elemanının 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.

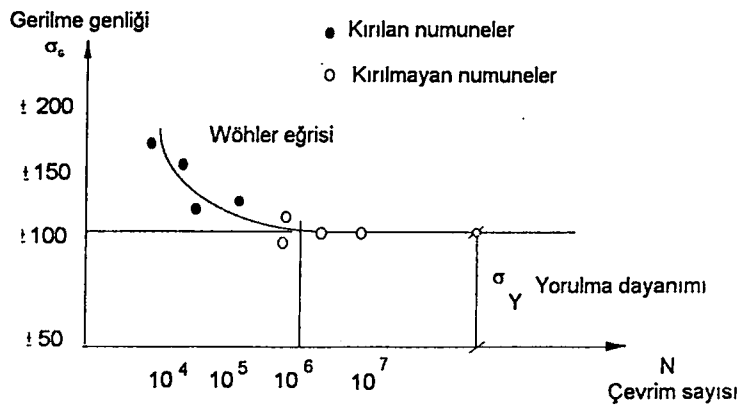
Malzemelerin yorulma dayanımlarının saptanması için eksene paralel doğrultuda mekanik veya elektrolitik olarak parlatılmış düzgün deney parçaları kullanılır. Çentik duyarlılığının saptanması için de, çentik katsayıları belli çentikli deney parçalarından yararlanılır. Günümüzde kullanılan yorulma deney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

Yorulma dayanımı normal olarak Wöhler yöntemi ile bulunur. Bu yöntemde, malzeme, biçim ve yüzey kalitesi bakımından tümüyle aynı olan deney parçalarının herbiri aralıksız şekilde ve farklı seviyelerde zorlanarak kırılmanın olduğu çevrim sayıları saptanır. Bir deney serisinde

çoğunlukla 6-10 adet deney parçası gereklidir. Belirli bir deney parçası için başlangıçta ayarlanan yorulma zorlanması deney sırasında değiştirilmez, yani tek kademeli yorulma deneyi söz konusudur. Buna karşın çok kademeli yorulma deneyinde, zorlama sistematik olarak deney sırasında değiştirilir. Her bir zorlama kademesi belirli çevrim sayıları arasında sabit kalır; zorlamanın sırası istenildiği gibi değiştirilebilir, yani giderek artabilir, azalabilir veya karışık olabilir. Sadece iki zorlama seviyesinin bulunduğu deneyler iki kademeli yorulma deneyi olarak adlandırılırlar.

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

Deneyin amacına, malzeme ve deney makinasına göre yük veya 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 veya alt gerilme sabit tutularak her deney için ayrı gerilme genliği seçilir. İlk deney parçası, üst gerilme genellikle akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek düzeyde zorlanır. Daha sonraki deney parçalarına ise gittikçe daha düşük zorlamalar uygulanarak 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 dağılımlar göstermiyorsa, Wöhler eğrisi elde edilir. (Ortalama gerilme veya alt gerilmenin her bir değeri için ayrı bir Wöhler eğrisi bulunur.)



Şekil 3.7. Wöhler Eğrisi

Bu grafikte normal olarak absis (çevrim sayısı) logaritmik, ordinat (gerilme genliği) ise metrik bölümlü olarak seçilir (Şekil 3.7). Sonsuz çevrim sayısında kırılmanın görülmediği en büyük gerilme genliği yani eğrinin asimptotuna karşılık gelen değer yorulma dayanımıdır. Diğer yandan belirli bir çevrim sayısından sonra (Ns: 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 $2 \cdot 10^6$ hafif metaller için $10 \cdot 10^6$ - $50 \cdot 10^6$ sınır çevrim sayıları da kullanılmaktadır. Bu nedenle σ_y sembolü yanında söz konusu sınır çevrim sayısı da verilmelidir.

Yorulma dayanımından daha büyük gerilme genliklerinin bir süre uygulanmasının muhakkak hasara veya diğer bir deyişle yorulma dayanımının azalmasına yol açacağı söylenemez. Önemli olan bu aşırı yüklemelerin seviyesi ve bunlara ait çevrimlerin sayısıdır. Yorulma dayanımının malzemeye bağlı, teknolojik ve deney tekniği ile çok sayıda faktör etkilediğinden, bu deneyi normal Wöhler yöntemi yani 6-10 deney parçası yardımı ile güvenilir bir şekilde gerçekleştirmek oldukça güçtür. Wöhler eğrisini dağılıma bantının ortalama eğrisi olarak veya yorulma dayanımını belirli bir yüzde olasılıkla verebilmek için çok sayıda deney yapılması ve bunların istatistik olarak değerlendirilmesi zorunludur. Wöhler eğrisinin dağılıma bantının güvenli olarak saptanabilmesi, 40-200 deney parçasını gerektirir. Hasar çizgisinin de kesin belirlenebilmesi için çok sayıda deney yapılmalıdır.

Sürel yorulma ve yorulma dayanımlarını hesaplayabilmek amacıyla Wöhler eğrisi için bazı analitik ifadeler önerilmiştir. Ancak, gerçek malzeme davranışlarını içermeyen bütün bu ifadeler, yorulma dayanımı ile statik değerlerden elde edilen değerler (örneğin çekme dayanımı) arasında kurulan amprik bağıntılardan daha iyi sonuç vermezler. İstatistiksel olarak güvenli yorulma dayanımı değerleri elde etmek için Merdiven yöntemi olarak adlandırılan yaklaşım kullanılabilir. Bu yöntemde, saptanması istenen büyüklüğün beklenen dağılıma bölgesi (örneğin yorulma dayanımı veya sürel yorulma bölgesinde belirli bir çevrim sayısına tekabül eden gerilme genliği) basamaklara bölünür. Deneyler beklenen dağılıma bölgesinin ortasında 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.

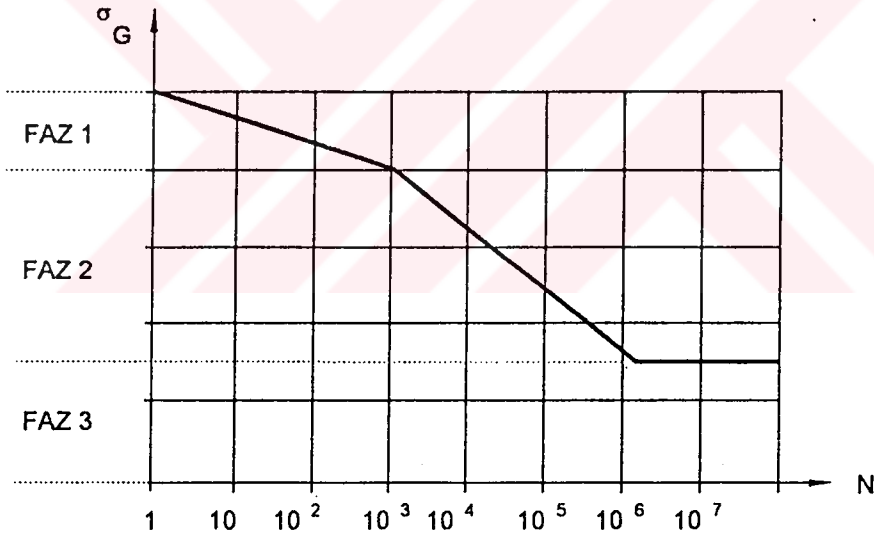
Gerilme genliği bu şekilde değiştirilerek belirli sayıda deney yapıldıktan sonra sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilir. Bu yöntemin üstünlüğü tüm deneylerin hepsinin kendiliğinden ortalama değer etrafında toplanmasıdır. Bu arada her deney parçası sadece bir kere kullanılır. Sınır çevrim sayısı da dahil olmak üzere çeşitli çevrim sayılarında dağılıma bantının

saptanması için ne az 40 deney parçası gereklidir. Yöntem çentikli parçalar için de uygulanabilir.

3.4.1. WÖHLER EĞRİLERİNİN BÖLGELERİNİN AÇIKLANMALARI

Değişik çeliklerle yorulma deneylerinden elde edilmiş olan Wöhler Eğrileri incelenirse büyük bir benzerlik olduğu farkedilecektir. Deney parçaları, birkaç yüz veya birkaç bin tekrara kadar sadece bilinen statik çekmedeki kopma gerilmelerinden biraz daha az bir gerilmeye dayanabilecektir. Fakat tekrar sayıları 10^3 mertebesini geçtikten sonra yük taşıma kapasiteleri hızla artar ve Wöhler Eğrisi hızla düşmeye başlar. Fakat sınır olarak bütün çelik tipleri, parçaların birkaç milyon tekrarda bile kırılmaksızın dayanabileceği bir sınır gerilmeye ulaşır.

Bir Wöhler Eğrisi böylece üç faza ayrılabilir (Şekil 3.8). Birinci faz alçak tekrarlı yorulma fazı, ikinci faz yüksek bölge yorulma fazı, üçüncü faz alçak bölge yorulmasıdır. Malzemenin yorulma olayındaki mekanizması bu üç fazda oldukça farklıdır.



Şekil 3.8. Wöhler Eğrisinin Bölgeleri

1.Faz: Statik veya alçak tekrarda oluşan faza genellikle pratikte daha az rastlanır. Çünkü çok az sayıda makine parçası normal çalışma ömründe tam olarak statiktir. Statik deney makinalarında bulunan malzeme özellikleri bundan dolayı pek anlamlı değildir. Yük değişiyorsa

birkaç yüz tekrarda deneylerinde gösterdiği gibi malzemenin içlerinde bozulmalar başlar ve parça kırılır.

2. Faz: Daha büyük pratik önemi vardır. Deney parçasının yüzeyi yüksek büyütme altında incelenirse deney parçasının eksenine ile bir açı yapan bir dizi bantlar görülür. Bunlar yüzeydeki kayma düzlemlerini gösterir. Bu kaymaların etkisi ile mikroçatlaklar oluşur, ilerler ve malzeme yükü taşıyamaz hale gelir.

3. Faz: Eğrinin yatıklaşmaya ve asimptotik bir gidişe başladığı bölgedir. Demir esaslı malzemelerde bu olay belirgin bir şekildedir ve yorulma dayanımı dediğimiz belirli bir genliğin altında parça kırılmaz olarak kabul edilebilir.

3.5. SMİTH DİYAGRAMLARI

Değişken ve dalgalı bölgeler için saptanmış bir sıra Wöhler Eğrisinden elde edilen sonuçlar yorulma dayanımı diyagramlarında toplu olarak verilebilir. Bu diyagramlar her zorlama şekli için ortalama gerilme, gerilme genliği, alt gerilme ve üst gerilme arasındaki bağıntıları grafik olarak gösterir. Yorulma dayanımına etki eden zorlama değerleri arasındaki bağıntıları en açık şekilde belirttiği için Makina Mühendisliğinde genellikle Smith Yorulma Dayanımı olarak kullanılır. Birbirine dik iki eksenin absise ortalama gerilmeler, ordinata ise herbir ortalama gerilmeye ait yorulma dayanımının alt ve üst gerilmeleri taşınır (Şekil 3.9).

Değişik ortalama gerilmeler için bulunan noktaların birleştirilmesi ile alt ve üst gerilmelerin sınır çizgileri elde edilir. Ordinat ekseninin sağında üst sınır çizgisi üst gerilmeleri, alt sınır çizgisi alt gerilmeleri belirler. Ordinat ekseninin solunda ise alt sınır çizgisi üst gerilmeleri, üst sınır çizgisi alt gerilmeleri gösterir. Alt ve üst sınır çizgileri doğrudan çok az saptıklarından çizim kolaylığı bakımından birer doğru ile gösterilebilirler. Absis ve ordinatta aynı ölçek kullanıldığında 45° açı ile çizilen açıortayı ile ortalama gerilmelerin değerini verir. $\sigma_y = |\sigma_G|$ olduğuna göre her ortalama gerilme değerine karşılık gelen yorulma dayanımı değeri diyagramdan okunabilir. Böylece 0 noktasında malzemenin değişken yorulma dayanımı; alt gerilme sınır çizgilerinin absisi kestiği noktalarda da çekme ve basma dalgalı dayanım değerleri bulunur.

Makine parçalarında çoğunlukla kalıcı şekil değişimlerine müsaade edilmediğinden diyagram üstten akma gerilmesi ile sınırlanır. Akma gerilmesinin üzerindeki yorulma değerleri ancak çok özel durumlar için aranır ve kesikli çizgilerle gösterilen bu bölüm dayanım hesaplarında kullanılmaz (Akma sınırı üzerindeki değişken zorlamalar "kısa ömürlü yorulma" olarak adlandırılır. Sürekli yorulma bölgesinin üst sınırını oluşturan bu alan için kırılma çevrim

dayanımının diğer bir gösterim Şekli tercih edilir. Apsise alt gerilmeler, ordinata ise tekrar alt gerilmeler ve buna karşılık gelen st gerilmeler taşınır.

Kaynak tekniğinde ise son yıllarda daha çok Moore Kommer-Jasper diyagramından yararlanılmakta ve apsiste gerilme oranı R ordinatta ise buna karşılık gelen st gerilme verilmektedir.

Bazı lkelerde Smith Diyagramının yanında Haigh diyagramı da kullanılmaktadır. Bu diyagramda absiste ortalama gerilme, ordinatta ise gerilme genliği bulunmaktadır.



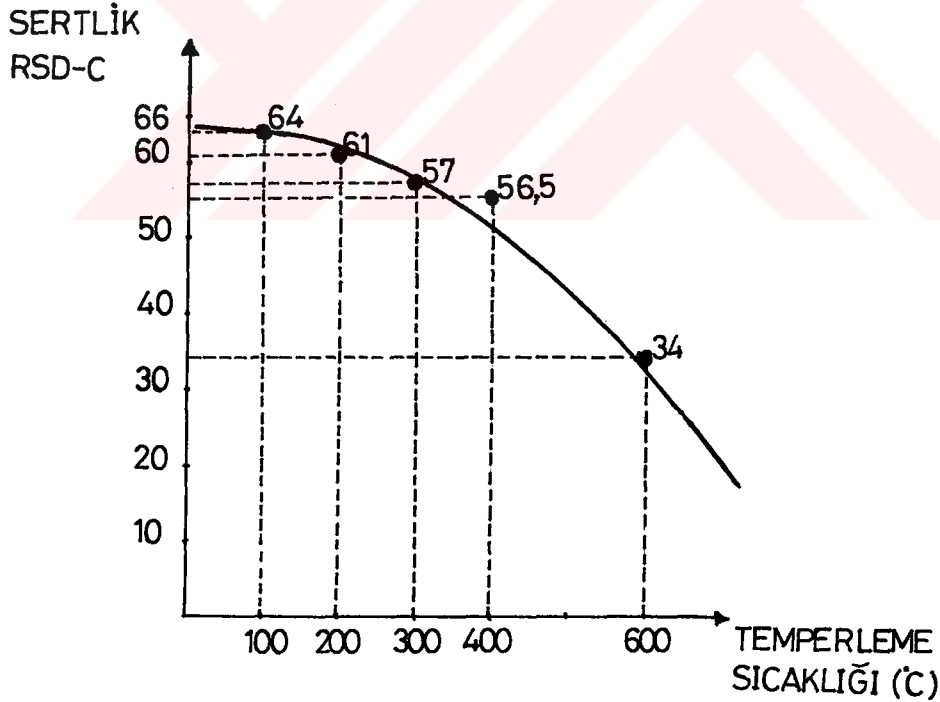
BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. GİRİŞ

Deneysel çalışmada, deney malzemesi olarak soğuk plastik şekil verme kalıplarında çokça kullanılan X210Cr12 soğuk iş takım çeliği seçilmiştir. Deney malzemesinin ticari adı SPEZIAL K'dır. Bu tip bir malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 4.1.'de verilmiştir (Osmanlı Çelik Kataloğu). Deney malzemesinden talaşlı işleme yoluyla hazırlanan silindirik parçalara kataloglarda önerilen 960°C'de su verme tavlaması uygulanarak yağda su verilmiş ve değişik sıcaklıklarda 2'şer saat süreyle temperlenmiştir.

Tablo 4.1. Deney Malzemesinin Kimyasal Bileşimi (Katalog Değerleri) [6]

Böhler Yeni Markası	Böhler Eski Markası	DIN Normu	AISI Normu	Alaşım Elementleri				
				C	Cr	Mo	V	W
K 100	Spezial K	1.2080 X210Cr12	D3	2.0	11.5	-	-	-



Şekil 4.1 Deney Malzemesinin Sertlik-Temperleme Sıcaklığı Diyagramı

Isıl işlemler T.Ü. Müh.-Mim. Fakültesi Isıl İşlemler laboratuvarında benzer çalışmalar için yapılmış olan ve ısınma eğrisinin Şekil 4.2'de gösterildiği fırında gerçekleştirilmiştir.



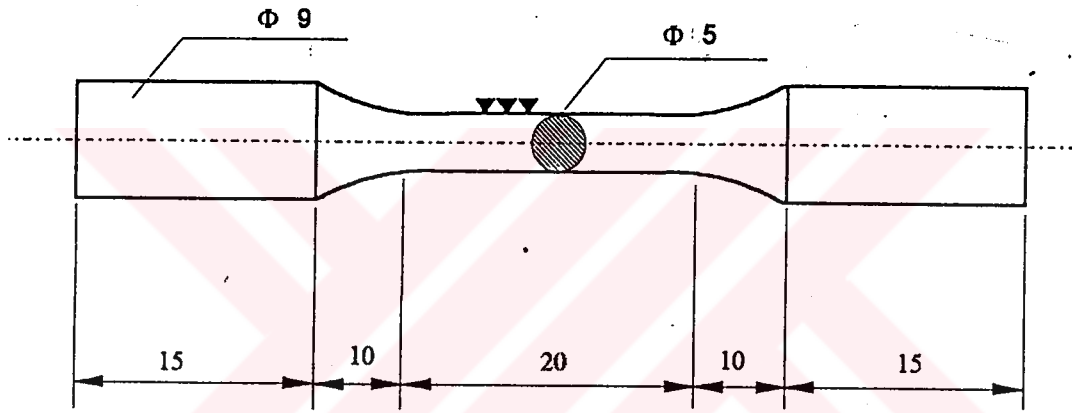
Şekil 4.2. Deneide Kullanılan Isıl İşlem Fırınının Isınma Eğrisi

Sertleştirilmiş deney parçalarının yüksek sertlikleri nedeniyle yorulma makinasının çenelerine zarar vermemesi için, mekanik deneylerin satın alınmış ve sertleştirilerek 600°C ta temperlenmiş koşullarda yapılmasına karar verilmiştir.

4.2. MEKANİK DENEYLER

4.2.1. ÇEKME DENEYLERİ

Deney malzemesinin Bölüm 4.1'de karar verilen koşullarda statik yükleme halindeki mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Şekil 4.3'te gösterilen örnekler hazırlanmış ve $\sigma = K\varepsilon^n$ şeklinde verilen denklemdeki K ve n değerleri 7 numaralı referansa göre belirlenmiştir. Sonuçlar Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Çekme Parçasının Şekli

Tablo 4.2. Isıl İşlem Görmemiş Çekme Numunesinin Deney Sonuçları

i	l_{oi}	l_i	$\epsilon_g = \ln(l_i / l_{oi})$
i=1	1.90	1.97	0.036
i=2	2.02	2.09	0.034
i=3	2.07	2.22	0.069
i=4	1.98	2.07	0.044
i=5	2.04	2.17	0.061
i=6	2.04	2.22	0.085
i=7	1.93	2.05	0.061
i=8	1.98	2.09	0.054
i=9	2.02	2.13	0.053
i=10	2.04	2.16	0.057
			$\epsilon_{ort} = 0.0554$

$$d_o = 4.94 \text{ ve } F_{max} = 14710 \text{ N olduğundan } K = \frac{14710 \cdot 4}{\pi(4.94)^2 (0.0554)^{0.0554}} = 901.36 \text{ N/mm}^2 \text{ olarak bulunur}$$

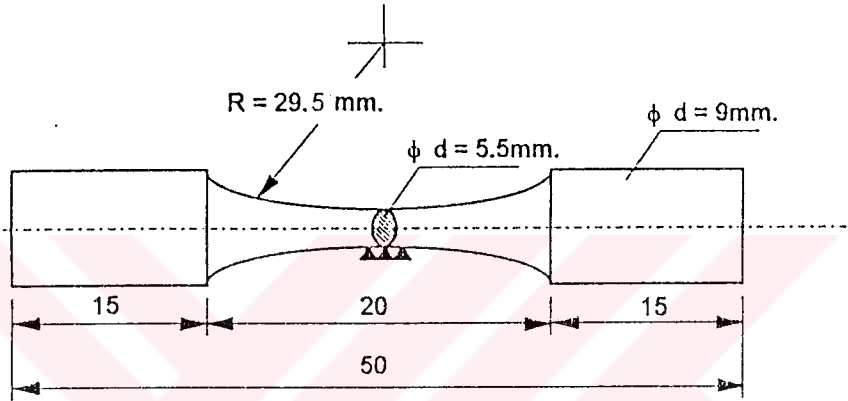
Tablo 4.3. Sertleştirildikten Sonra 600°C'de Temperlenmiş Çekme Numunesinin Deney Sonuçları

i	l_{oi}	l_i	$\epsilon_g = \ln(\Delta l_i / \Delta l_o)$
i=1	1.87	1.92	0.026
i=2	2.07	2.10	0.014
i=3	2.00	2.01	0.005
i=4	1.99	2.00	0.005
i=5	2.01	2.03	0.01
i=6	1.90	1.91	0.005
i=7	2.02	2.03	0.005
			$\epsilon_{ort} = 0.01$

$$d_o = 4.98 \text{ ve } F_{max} = 19720 \text{ N olduğundan } K = \frac{19720 \cdot 4}{\pi(4.98)^2 (0.01)^{0.01}} = 1060.66 \text{ N/mm}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

4.2.2. YORULMA DENEYLERİ

Deney malzemesi ile ilgili olarak Bölüm 4.1.'de kararlaştırılan koşullardaki yorulma dayanımlarının tespit edilmesi amacıyla Şekil 4.4.'te verilen örnekler hazırlanarak INSTRON 8501 deney cihazında yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Tablo 4.4. , Tablo 4.5. ve Tablo 4.6. ile Şekil 4.5., Şekil 4.6., Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'de verilmiştir.

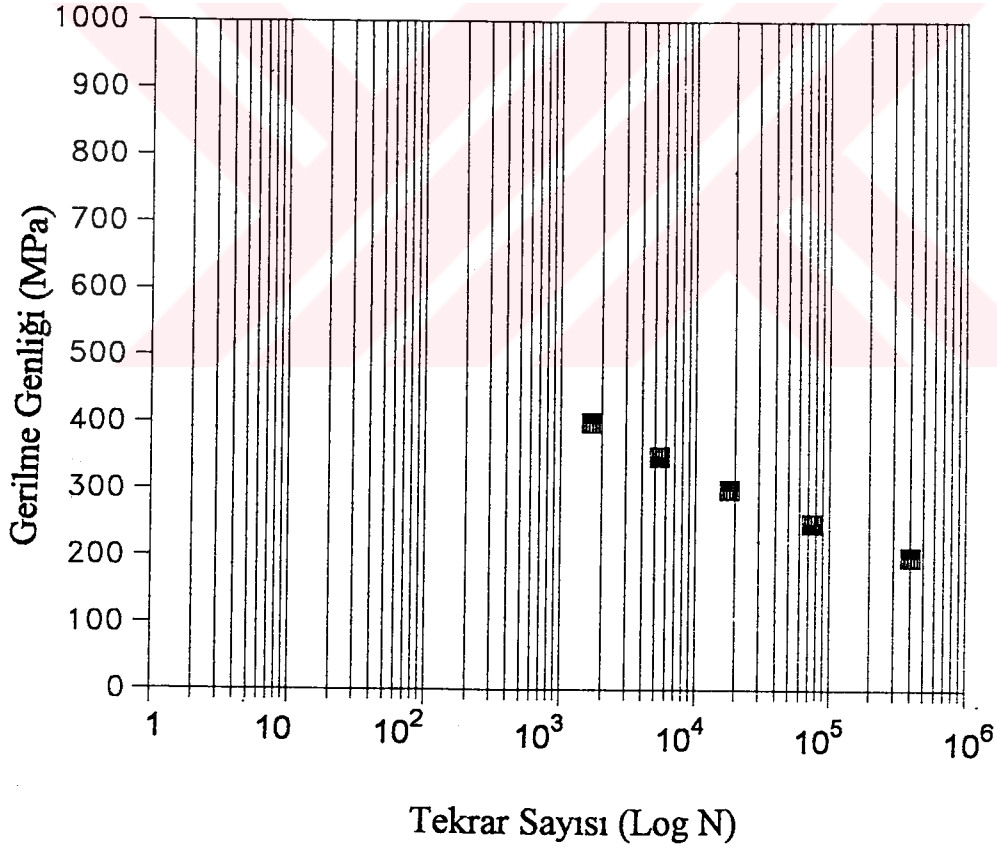


Şekil 4.4. Yorulma Parçasının, Şekli

Tablo 4.4. Gerilme Genliğinin Yorulma Ömrüne Etkisi
(Malzeme:X210 Cr12, Satın Alındığı Gibi, $\sigma_{ort}=300$ MPa)

Çap (mm.)	Alan (mm ²)	Kuvvet Genliği (N)	Gerilme Genliği (MPa)	Frekans Hz.	Kırılma Tekrar Sayısı
5.40	22.89	9156	400	10	1700
5.50	23.746	8311	350	10	5385
5.55	24.18	7254	300	15	18100
5.45	23.328	5832	250	20	74807
5.40	22.89	5722	200	20	400011*

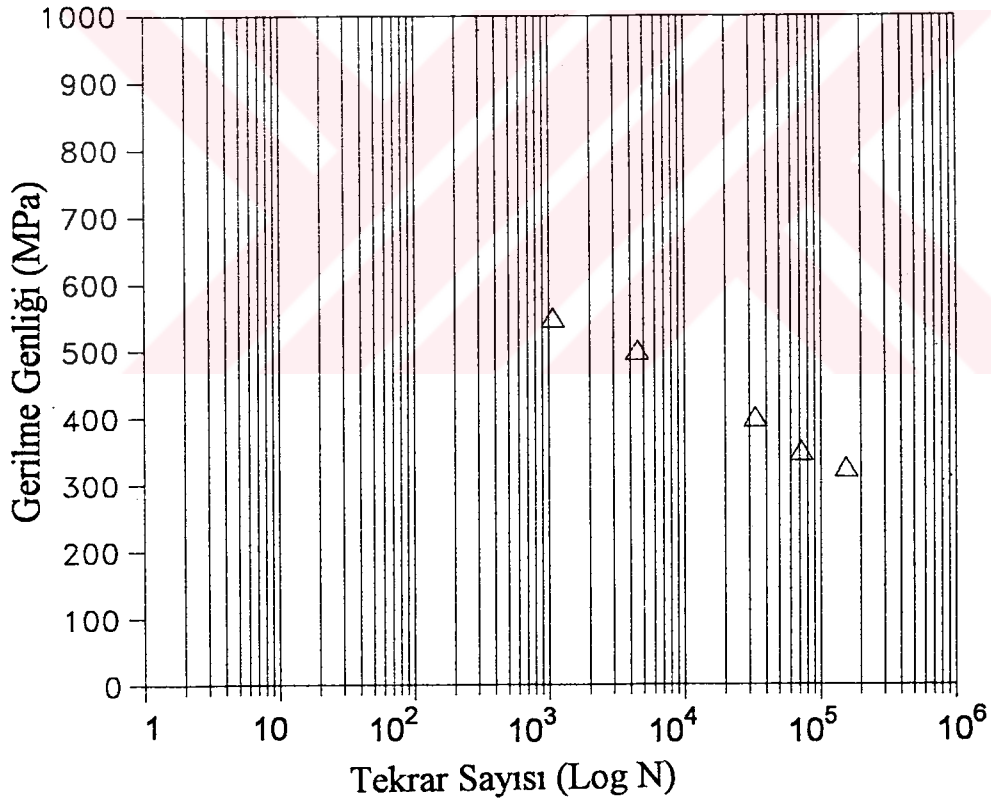
*Kırılma Olmadı



Şekil 4.5. Gerilme Genliğinin Yorulma Ömrüne Etkisi
(Malzeme:X210 Cr12, Satın Alındığı Gibi, $\sigma_{ort}=300$ MPa)

Tablo 4.5. Gerilme Genliğinin Yorulma Ömrüne Etkisi
(Malzeme:X210 Cr12, Sertleştirme+600°C'de Temper , $\sigma_{ort}=300$ MPa)

Çap (mm.)	Alan (mm ²)	Kuvvet Genliği (N)	Gerilme Genliği (MPa)	Frekans Hz.	Kırılma Tekrar Sayısı
5.30	22.06	13236	550	5	1076
4.95	19.244	9602.5	500	10	4493
4.95	19.244	7696	400	20	33287
4.95	19.244	6734	350	20	72000
4.85	18.47	6464.5	325	20	156630

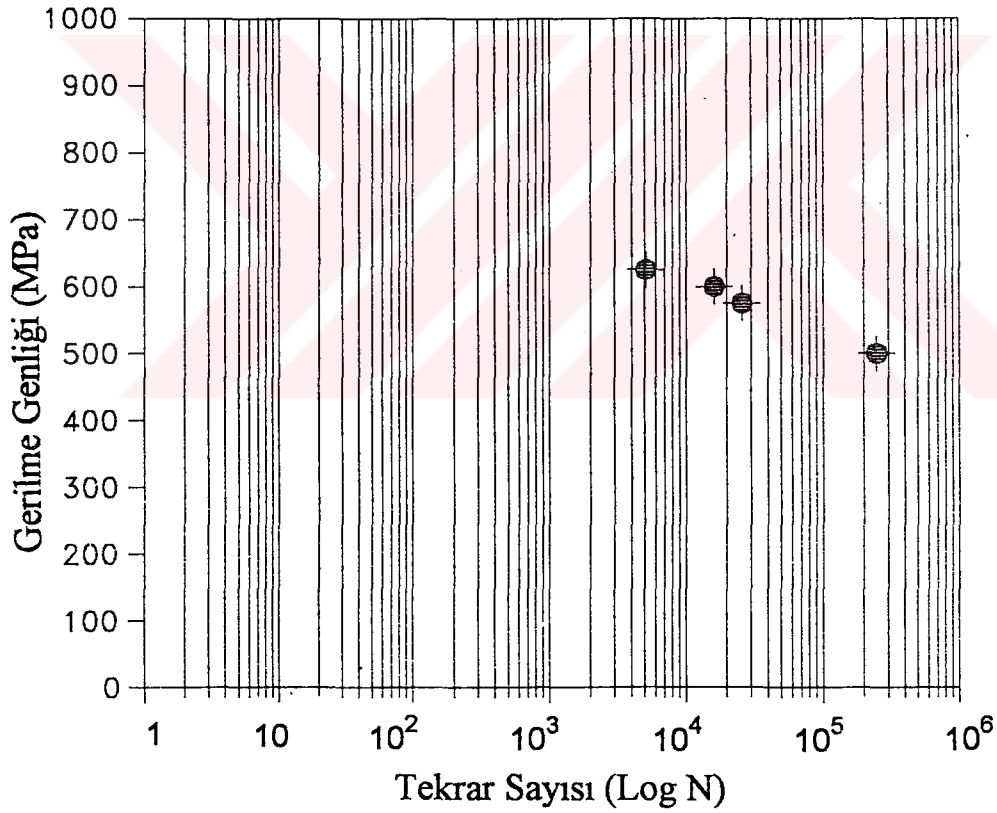


Şekil 4.6. Gerilme Genliğinin Yorulma Ömrüne Etkisi
(Malzeme:X210 Cr12, Sertleştirme+600°C'de Temper , $\sigma_{ort}=300$ MPa)

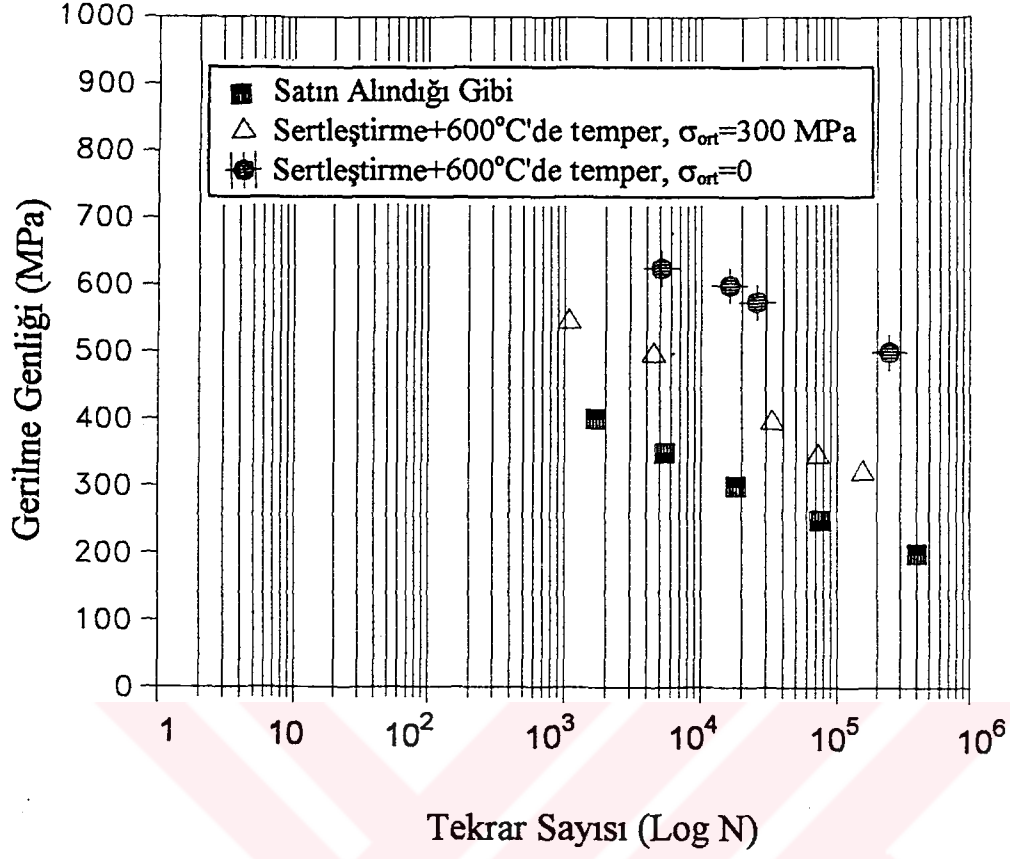
Tablo 4.6. Gerilme Genliğinin Yorulma Ömrüne Etkisi
(Malzeme:X210 Cr12, Sertleştirme+600°C'de Temper , $\sigma_{ort}=0$)

Çap (mm.)	Alan (mm ²)	Kuvvet Genliği (N)	Gerilme Genliği (MPa)	Frekans Hz.	Kırılma Tekrar Sayısı
5.15	20.820	13012.5	625	5	5059
4.90	18.847	11308.2	600	5	16272
4.75	17.71	10183.5	575	5	25701
4.90	18.847	9423.5	500	5	247248*

* Kırılma Olmadı



Şekil 4.7. Gerilme Genliğinin Yorulma Ömrüne Etkisi
(Malzeme:X210 Cr12, Sertleştirme+600°C'de Temper , $\sigma_{ort}=0$)



Şekil 4.8. Isıl İşlem ve Ön Gerilmenin Yorulma Dayanımına Etkisi

4.3. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Deney malzemesi olarak seçilen X210Cr12 Soğuk İş Takım Çeliğinin ısıtılı işlemlerle sertlik ölçümü yapılmış ve RSD-B=90 değeri bulunmuştur. Daha sonra katalog değerlerine bağlı olarak sertleştirme ve çeşitli sıcaklıklarda 2'şer saat temperleme yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda malzemenin sertlik değerlerinin 960°C'lik sertleştirme tava sonrası yapılan 100°C'lik temper için RSD-C=64, 200°C'lik temper için RSD-C=61, 300°C'lik temper için RSD-C=57, 400°C'lik temper için RSD-C=56.5 ve 600°C'lik temper için ise RSD-C=34 olduğu görülmüştür. Bu değerler katalog değerlerine uygundur.

Deneysel çalışmaya bu aşamadan sonra CNC Torna Tezgahı yardımı ile örnekler hazırlayarak devam edilmiştir. Çekme ve yorulma deneyleri için iki farklı boyutta örnekler işlenmiştir. Bu numunelerin bir kısmına 960°C'lik sertleştirme ve 600°C'lik temperleme işlemleri uygulanarak deneyler ısıtılı işlemliler ve ısıtılı işlemlerle olmak üzere iki ayrı kategoride yapılmıştır.

Çekme deneylerinde ısıtılı işlemliler ve ısıtılı işlemlerle numuneler kullanılarak malzemenin K mukavemet katsayısı ve n pekleşme üstelinin belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Sonuçlar literatürde bu tip malzemeler için verilen değerlerle uyumludur.

Yorulma deneyleri için daha önce bölümümüzde yapılan benzer bir yüksek lisans tezi gözönüne alınarak deney prosedürü belirlenmiştir [8]. Deneyler sonucunda beklendiği gibi ısıtılı işlemliler deney numunelerinin ısıtılı işlemlerle nazaran daha iyi bir yorulma dayanımına sahip olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- 1 - AKATA, H., E., Malzeme ve Muayanesi I-II Ders notları, T.Ü.Müh.-Mim. Fak.,1996
- 2 - AVNER, S., H., " Introduction to Physically Metallurgy", Mc-Graw Hill Book Co.,New York, 1984.
- 3 - AKATA, H., E., "Takım Çelikleri ve Isıl İşlem", Cumartesi Konferansları,1988.
- 4 - ERYÜREK, B., "Hasar Analizi", İ.T.Ü. Makina Fakültesi,1993.
- 5 - GÜLEÇ, Ş., ARAN, A., "Yorulma Dayanımı", TÜBİTAK Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, Gebze,1983.
- 6 - Osmanlı Çelik Kataloğu, Osmanlı Çelik San. ve Tic. Ltd.Şti, Karaköy/İST.
- 7 - ÇAPAN, L., J., " Silindirik Kapların Derin Çekilmesinde Anizotropinin Etkisi ", Doçentlik Tezi, İ.T.Ü. 1979.
- 8 - TAŞKIN, V., " Takım Çeliklerinde Çekme, Basma ve Yorulma Özelliklerinin Araştırılması ", Yüksek Lisans Tezi, T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 1996.

ÖZGEÇMİŞ

Cem S. ÇETİNARSLAN 1968 yılında Lüleburgaz'da doğdu. İlk ve ortaöğrenimini Hayrabolu'da tamamladıktan sonra 1986 yılında girdiği Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1991 yılında mezun oldu. Askerlik görevini tamamladıktan sonra 1994 şubatında Yüksek Lisans, 1994 eylülünde Araştırma Görevliliği sınavlarını kazandı. Halen Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı'nda çalışmakta olan Cem S. ÇETİNARSLAN bekar olup İngilizce bilmektedir.