İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAŞLAMA SONRASI KALIN CAMSI METALDE OLUŞAN KALINTI GERİLMENİN DELİK DELME YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yüksel AKDENİZ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAŞLAMA SONRASI KALIN CAMSI METALDE OLUŞAN KALINTI GERİLMENİN DELİK DELME YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yüksel AKDENİZ
(503081320)

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa BAKKAL

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503081320 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Yüksel AKDENİZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"TAŞLAMA SONRASI KALIN CAMSI METALDE OLUŞAN KALINTI GERİLMENİN DELİK DELME YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Mustafa BAKKAL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç.Dr. Turgut GÜLMEZ** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Yrd.Doç.Dr. C. Can AYDINER Boğaziçi Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **2 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **8 Haziran 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleşmesi sırasında bilgi birikimini ve deneyimini benimle paylaşan, çalışmanın her aşamasında yol gösteren değerli danışmanım Doç.Dr. Mustafa Bakkal'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında deneysel çalışmalarda birlikte çalıştığım ve bu yorucu süreçte bana destek veren değerli dostum ve meslektaşım Emre Ünlü'ye teşekkürlerimi borç bilirim.

Taşlama,deneysel çalışmalar ve tutucu imalatında yardımlarından dolayı Ar.Gör Umut Karagüzel, Ar.Gör Ali Taner Kuzu ve İTÜ Makina Fakültesi'nin değerli teknisyenlerine teşekkür ederim.

2210-Yurtiçi Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında yüksek lisansım sırasında beni maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Çalışırken yüksek lisans yapmamı destekleyen Ford Otosan'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak benim bu günlere gelmem de sonsuz emeği olan ve benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2012

YükselAKDENİZ
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
2. CAMSI METALLER **3**
2.1 Camsı Metallerin Tarihçesi ve Gelişimi 3
2.2 Kalın Camsı Metallerin Üretimi 5
2.2.1 Su verme yöntemi 5
2.2.2 Basınçlı döküm yöntemi 7
2.2.3 Bakır kalıba döküm 10
2.2.4 Kapak döküm yöntemi 12
2.2.5 Vakumlu döküm yöntemi 13
2.2.6 Sıkıştırmalı döküm yöntemi 14
2.2.7 Arkla eritme yöntemi 15
2.2.8 Tek yönlü alan ısıtma yöntemi 15
2.2.9 Elektromanyetik titreşim yöntemi 16
2.3 Kalın Camsı Metallerin Mekanik Özellikleri 17
2.3.1 Homojen olmayan deformasyon 18
2.3.2 Homojen deformasyon 19
2.3.3 Dayanım 21
2.3.4 Süneklik 21
2.3.5 Yorulma dayanımı 22
2.4 Kalın Camsı Metallerin Uygulamaları 23
3. TAŞLAMA **27**
3.1 Taşlamanın Tarihçesi 27
3.2 Taşlama Yöntemleri 28
3.3 Taşlama Taşları 30
3.3.1 Taşların yapısal özellikleri 30
3.3.2 Aşındırıcı tane malzemesi 31
3.3.2.1 Geleneksel aşındırıcılar 31
3.3.2.2 Süper aşındırıcılar 32
3.3.2.3 Bağlayıcı malzemeleri 33
3.4 Taşların Bilenmesi 34
3.5 Taşlama Kuvvetleri, Güç ve Spesifik Enerji 34
3.6 Taşlamada Malzeme Kaldırma Mekanizmaları 35
3.6.1 Mikrosabanlama, talaş oluşumu ve kırılma 35
3.6.2 Sünek malzemelerin taşlanması 36

3.6.3 Gevrek malzemelerin taşlanması 37
3.7 Taşlamanın Isıl Etkileri 38
3.7.1 Isının dağılımı 38
3.8 Taşlama ve Kalıntı Gerilmenin İlişkisi 40
3.9 Yüzey Pürüzlülüğü 42
4. KALINTI GERİLME VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ 45
4.1 Kalıntı Gerilme 45
4.1.1 Kalıntı gerilme çeşitleri 45
4.1.2 Kalıntı gerilmelerin dağılım şekilleri 46
4.1.3 Kalıntı gerilmelerin oluşumu 46
4.1.4 Kalıntı gerilmelerin önemi 49
4.1.5 Talaşlı imalat kaynaklı kalıntı gerilmeler 50
4.2 Kalıntı Gerilme Ölçüm Yöntemleri 52
4.2.1 Tahribatlı ve yarı tahribatlı yöntemler 53
4.2.1.1 Delik delme yöntemi 53
4.2.1.2 Halka çekirdeği yöntemi 56
4.2.1.3 Derin delik delme yöntemi 58
4.2.1.4 Kesitlere ayırma yöntemi 59
4.2.1.5 Kontur yöntemi 60
4.2.2 Tahribatsız yöntemler 61
4.2.2.1 X-ışını kırınımı yöntemi 62
4.2.2.2 Nötron ışınımı yöntemi 63
4.2.2.3 Ultrasonik yöntem 64
4.2.2.4 Barkhausen gürültüsü yöntemi 67
5. DENEYSEL ÇALIŞMA 69
5.1 İş Parçasının Malzemesi ve Taşlama 69
5.2 Kalıntı Gerilme Ölçüm Düzeneği 71
5.3 Kalıntı Gerilme Ölçümü İşlem Adımları 76
5.3.1 Gerinim ölçerin yapıştırılması 76
5.3.2 Kablo lehimleme 77
5.3.3 Delik delme ve gerinim ölçümü 80
5.4 Kalıntı Gerilmenin Hesaplanması 84
5.5 Kalıntı Gerilme Hesaplama Sonuçları 90
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 95
KAYNAKLAR 99
ÖZGEÇMİŞ 103

KISALTMALAR

KCM **:** Kalın Camsı Metal
CBN **:** Kübik Bor Nitrür
TM **:** Geçiş Metali

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Su verme yöntemiyle üretilmiş olan kalın camsı metal alaşınları. 6
Çizelge 4.1 : Delik delme yönteminin özellikleri. 55
Çizelge 4.2 : X-ışını kırınımı yönteminin özellikleri..... 63
Çizelge 4.3 : Nötron ışınımı yönteminin özellikleri. 65
Çizelge 4.4 : Ultrasonik yöntemin özellikleri. 66
Çizelge 4.5 : Barkhausen gürültüsü yönteminin özellikleri..... 68
Çizelge 5.1 : Zr-esaslı kalın camsı metal numunenin mekanik ve ısıl özellikleri. 69
Çizelge 5.2 : Taşlamada kullanılan CBN taşın özellikleri..... 71

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : 72 mm çapındaki silindirik $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ alaşımı [23]. 7
Şekil 2.2 : Basınçlı döküm ekipmanı [24]. 8
Şekil 2.3 : $Mg_{65}Cu_{25}Y_{10}$ alaşımından basınçlı döküm yöntemi kullanılarak eldeedilen numuneler [24]. 9
Şekil 2.4 : Bakır kalıba döküm yönteminde kullanılan ekipman [29]. 10
Şekil 2.5 : (a) $Zr_{60}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}Pd_5$ alaşımının açı ve yüksekliğe gore bileşimin değişimi (b) $Zr_{60}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}Pd_5$ alaşımının pota çıkış sıcaklığı ve yüksekliğe gore bileşimin değişimi [29]. 12
Şekil 2.6 : (a) Arkla eritme (b) Eğik Döküm (c) Kapak Döküm [23]. 13
Şekil 2.7 : Bakır kalıba döküm yönteminde kullanılan ekipman [33]. 14
Şekil 2.8 : Alan ısıtma ekipmanı a) ön görünüş b) yan görünüş [39]. 16
Şekil 2.9 : $Zr_{40}Ti_{14}Ni_{10}Cu_{12}Be_{24}$ kalın camsı metal alaşımının 1×10^{-4} s^{-1} şekil değişim hızında gerçekleştirilen basma deneyi [45]. 19
Şekil 2.10 : Kalın camsı metallerin deformasyon haritası [51]. 20
Şekil 2.11 : Farklı kalın camsı metallerin elastiklik modülünün,sertlik ve çekme dayanımı ile ilişkisi [52]. 22
Şekil 2.12 : Camsı metalden üretilen golf, beyzbol sopaları ve tenis raketleri [23]. . 24
Şekil 2.13 : Camsı metalden üretilen (a) mikro dişli ve (b) spiral yay [23]. 24
Şekil 2.14 : Camsı metalden üretilen yaylar a) 1 mm çaplı b) 2 mm çaplı [23]. 25
Şekil 2.15 : Zr esaslı kalın camsı metallden üretilen basınç sensörü diyaframı [23]. 26
Şekil 3.1 : a) Taşlama taşı b) talaş kaldırma mekanizmaları. 28
Şekil 3.2 : Taşlama yöntemleri a) yüzey b) silindrik c) puntasız. 29
Şekil 3.3 : Geleneksel aşındırıcılı taşların işaretleme sistemi [1]. 32
Şekil 3.4 : Süper aşındırıcılı taşların işaretleme sistemi [1]. 33
Şekil 3.5 : Taşlamada kuvvet bileşenleri. 35
Şekil 3.6 : İş parçası yüzeyi ve aşındırıcı taneler arası fiziksel etkileşim [54]. 36
Şekil 3.7 : Sünek malzemelerin işlenmesinde malzeme kaldırma işlemi [54]. 37
Şekil 3.8 : Gevrek malzemelerin işlenmesinde malzeme kaldırma işlemi [54]. 38
Şekil 3.9 : Metal malzemelerin taşlanmasında ısı akışı [54]. 39
Şekil 3.10 : Seramiklerin taşlanmasında ısının akışı [54]. 40
Şekil 3.11 : Taşlama gücüne kalıntı gerilmenin elde edilmesi [54]. 42
Şekil 3.12 : Spesifik taşlama gücünün 16 MnCr5'in yüzey tamlığına etkisi [54]. 43
Şekil 3.13 : Farklı işleme tiplerinin ve taşların yüzey kalıntı gerilmelerine etkisi [54]. 43
Şekil 4.1 : Kalıntı gerilmelerin sınıflandırılması [55]. 46
Şekil 4.2 : Kalıntı gerilmelerin dağılımı [55]. 47
Şekil 4.3 : Farklı işlemler sonrası oluşan makro ve mikro gerilmeler[56]. 48
Şekil 4.4 : Kalıntı gerilmelerin oluşması ve gelişimi [55]. 48
Şekil 4.5 : Kalıntı gerilme ölçüm yöntemleri [56]. 52
Şekil 4.6 : Kalıntı gerilme ölçüm yöntemlerinin kıyaslanması [56]. 53
Şekil 4.7 : Delik delme ile kalıntı gerilme ölçümü [55]. 54

Şekil 4.8 : Halka çekirdeği yöntemi ile kalıntı gerilme ölçümü [57]. 57
Şekil 4.9 : Kalıntı gerilme ölçüm yöntemleri a) delik delme yöntemi b) halka çekirdeği yöntemi. 57
Şekil 4.10 : Derin delik delme ile kalıntı gerilme ölçümü işlem adımları. 58
Şekil 4.11 : Kesitlere ayırma yöntemi [56]. 59
Şekil 4.12 : Kontur yönteminde kesme işlemi [58]. 61
Şekil 4.13 : Kontur yöntemi. 61
Şekil 4.14 : Boyuna, eksenel ve normal doğrultularda alınan ölçümler [56]. 64
Şekil 4.15 : Dalga hızlarının malzemeye göre değişimi; (1-2) çelik, (3) alüminyum [56]. 66
Şekil 4.16 : Ferromanyetik malzeme içerisindeki domenler ve manyetik dipoller. .. 67
Şekil 4.17 : a) Domenler dağınık durumda yönlenmiş b) manyetik alan uygulandıktan sonra domenler uygulanan alan yönünde yönlenmiş..... 67
Şekil 5.1 : Zr- esaslı kalın camsı metal çubuk. 69
Şekil 5.2 : Micracut 150 hassas kesme makinesi. 70
Şekil 5.3 : Taşlamanın yapıldığı spinner dik işleme merkezi. 70
Şekil 5.4 : İş parçasının tezgaha bağlanmasında kullanılan tutucu. 71
Şekil 5.5 : Vishay RS-200 kalıntı gerilme ölçüm cihazı [59]. 72
Şekil 5.6 : Vishay P3 gerinim gösterici [59]. 73
Şekil 5.7 : Vishay EA-XX-031RE-120 gerinim ölçer [59]. 74
Şekil 5.8 : Ölçüm sırasında deney numunesisabitlemek için kullanılan tutucu..... 74
Şekil 5.9 : Nikon SMZ800 optik mikroskopu..... 75
Şekil 5.10 : Kalıntı gerilme ölçüm deney düzeneği. 75
Şekil 5.11 : Gerinim ölçer yapıştırma işlemi [59]. 76
Şekil 5.12 : Kendinden kablolu gerinim ölçerler. 78
Şekil 5.13 : Kalın kablolar kullanılarak yapılankablo lehimleme işlemi. 78
Şekil 5.14 : Multimetre kullanılarak lehimleme kontrolü. 79
Şekil 5.15 : Ersa 16 W sıcaklık kontrollü kalem havya. 79
Şekil 5.16 : Başarıyla gerçekleştirilen lehimleme işlemi. 79
Şekil 5.17 : Çeyrek Wheatstone köprüsü [59]. 80
Şekil 5.18 : Gerinim gösterici üzerinde çeyrek wheatstone köprüsü bağlantısı. 80
Şekil 5.19 : Alt ayakların siyanoakrilat yapıştırıcı ile tutucu yüzeyine yapıştırılması. 81
Şekil 5.20 : Mikroskop kullanılarak delinecek deliğin gerinim ölçer merkezine merkezlenmesi. 81
Şekil 5.21 : Yüksek hızlı hava türbinli matkabın monte edilmesi 82
Şekil 5.22 : Hava basıncı regülatörü. 82
Şekil 5.23 : Yüksek hızlı havalı matkabın ayakpedalı ile kontrol edilmesi. 83
Şekil 5.24 : Yüksek hızlı hava türbinli matkap kullanılarak kademeli delik delme. . 83
Şekil 5.25 : Delici ucun gerinim ölçer yüzeyine göre konumunun sıfırlanması..... 84
Şekil 5.26 : Deliksiz ince plakanın ilk gerilme hali [55]. 84
Şekil 5.27 : Delikli ince plakanın son gerilme hali [55]. 85
Şekil 5.28 : Kalıntı gerilme halinin grafiksel gösterimi [55]. 86
Şekil 5.29 : Kalıntı gerilme hesaplanması için şekil değişimi ölçümü [55]. 86
Şekil 5.30 : Kalıntı gerilme ölçümü için gerinim ölçer [59]. 87
Şekil 5.31 : ASTM E837'ye göre kör delik delme için boyutsuz katsayılar [59]..... 89
Şekil 5.32 : Gerinim ölçer kullanılarak kademeli delik delme işlemi süresince ölçülen şekil değişimleri. 90
Şekil 5.33 : Delik derinliği boyunca minimum ve maksimum asal gerilmelerin değişimi. 91

Şekil 5.34 : Delik derinliği boyunca X ve Y gerilmeleri. 92
Şekil 5.35 : Optik mikroskop kullanılarak delik delme sonrası numunenin incelenmesi. 93

TAŞLAMA SONRASI KALIN CAMSI METALDE OLUŞAN KALINTI GERİLMENİN DELİK DELME YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

ÖZET

Kalın camsı metaller sıvı haldeki camsı metal alaşımının çok hızlı soğutularak kristal yapı oluşumunun engellendiği ve atomların rastgele bir düzen oluşturduğu malzemelerdir. Ancak elde edilen yapı yarı kararlıdır ve ısıl aktivasyon ile daha kararlı olduğu kristal yapıyı oluşturma eğilimindedir. Kalın camsı metaller kristalleşme davranışı, fiziksel, kimyasal, manyetik özellikleri ve farklı malzeme özelliği kombinasyonlarından dolayı çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Camsı metaller yüksek dayanım, yüksek elastik uzama limiti, yüksek sertlik, çok iyi korozyon dayanımı ve iyi manyetik özellikleri bir arada sunmaktadır.

Kalın camsı metallerin yaygın üretim şekli çeşitli döküm yöntemleridir. Bu yöntemler yüksek soğutma hızlarını mümkün kılarak amorf yapının elde edilmesini sağlar. Ancak kalın camsı metallerin son şekline getirilmeleri için talaşlı imalat yöntemleri kullanılabilmektedir. Kalın camsı metallerin sahip olduğu yüksek sertlik nedeniyle yaygın olarak tercih edilen talaşlı imalat yöntemi taşlamadır.Taşlamada talaş kaldırma miktarı geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla oldukça düşük olmasına rağmen talaş kaldırılan hacim başına harcanan enerji tornalama ve frezelemeye kıyasla çok yüksektir. Bu durum taşlama bölgesinde yüksek sıcaklıkların oluşmasına sebep olmaktadır. Taşlama sıcaklıkları ile kalıntı gerilmeler arasında sağlam bir ilişki vardır. Taşlama sonrası oluşan kalıntı gerilmeler genellikle gerçekleşen plastik şekil değişimi ve taşlama ile oluşan sıcaklıkla ilgilidir. Yüksek sıcaklıklar çekme kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olurken, plastik şekil değişimleri ise basma kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olur.

Kalıntı gerilmelerin varlığı kalıntı gerilmelerin malzeme içindeki dağılımı ve büyüklüğüne göre avantaj veya dezavantaj olabilir. Basma kalıntı gerilmeleri çekme gerilmesine maruz kalan malzemede çatlak oluşumunu zorlaştırdığı malzemenin yorulma dayanımını arttırır.

Bu çalışmada $Zr_{52,5}Ti_5Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}$ bileşimine sahip 10 mm çapında çubuk şeklindeki Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin 2000 dev/dak anamil hızı, 1000 mm/dak ilerleme hızı, 0.01 mm paso ve CBN taş kullanılarak taşlanmasından sonra taşlanan yüzeyde delik delme yöntemiyle kalıntı gerilmeler incelenmiştir.

Delik derinliği boyunca yapılan kalıntı gerilme hesaplamaları 0.22 mm delik derinliğine kadar kalıntı gerilmelerin basma 0.22 mm'den sonra çekme şeklinde olduğunu göstermiştir. Kalıntı gerilmenin basma olarak başlayıp sonradan çekmeye dönmesinin sebebi, işleme sırasındaki taşın parça yüzeyinde meydana getirdiği plastik şekil değişimi kaynaklıdır. Parça yüzeyindeki plastik şekil değişimi yüzeyden 0.22 mm derinliğe kadar etkisini azaltarak devam etmiştir. Bu derinlikten sonra sıcaklık plastik şekil değişimine göre daha baskın hale gelerek kalıntı gerilmenin çekme şeklinde olmasını sağlamıştır. Diğer bir deyişle plastik şekil değişimi kaynaklı

mekanik gerilmeler 0.22 mm derinliğe kadar sıcaklık artışı kaynaklı ısıl gerilmelerden daha büyük olduğu için kalıntı gerilme basma karakterli oluşmuş, 0.22 mm üzeri derinlikte ise ısıl gerilmeler plastik şekil değişimi kaynaklı mekanik gerilmelerden daha büyük olduğundan kalıntı gerilme çekme karakterli oluşmuştur. Bu durum parçanın kalınlığı boyunca sahip olduğu sıcaklık gradyanıyla açıklanabilir.

Sonuç olarak delik delme yöntemi 10 mm çapındaki Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin 2000 dev/dak anamil hızı, 1000 mm/dak ilerleme hızı ve 0.01 mm paso kalınlığında işlendikten sonra kalıntı gerilme ölçülmesi için uygun bir yöntemdir. Numune genişliğinin gerinim ölçerin nominal çapının üç katından, numune kalındığı 1.2 katından büyük olduğu durumlarda ve delinen delik etrafındaki gerilme yığılması faktöründen dolayı kalıntı gerilmelerin malzemenin akma dayanımını %60'ından küçük olduğu durumlarda kullanılabilir. Ölçülen kalıntı gerilmelerin kalıntı metalin akma dayanımının % 60'ına yakın olması durumunda ölçüm 4. bölümde bahsedilen halka çekirdeği ile yapılabilir ancak bu yöntem daha büyük numune boyutlarını gerekli kılar ve ASTM tarafından standartlaştırılmış bir yöntem değildir.

Ölçüm sonrasında optik mikroskop altında delinen deliğin çapı ve eşmerkezliliği kontrol edilmiştir. Bu açıdan kullanılan Vishay RS-200 yüksek hızda delik delme yönteminin gerinim ölçer ile eş merkezli delik delinmesini başarıyla sağladığı söylenebilir.

Bu çalışmadan çıkarılan bir diğer sonuçta 2000 dev/dak anamil hızı, 1000 mm/dak ilerleme hızı, 0.01 mm paso ve CBN taş kullanılarak yapılan kuru taşlama işleminin parçanın yüzeyinde basma kalıntı gerilmeler oluşturması bu parametrelerin parçanın yüzey tamlığı açısından uygun parametreler olduğunu göstermektedir.

STUDY OF GRINDING INDUCED RESIDUAL STRESSES WITH HOLE DRILLING METHOD

SUMMARY

Bulk metallic glasses have random atomic arrangement which is achieved by rapid cooling of liquid alloy to prevent crystallisation. This material structure is half stable and it has tendency to be transformed to the crystalline structure. Bulk metallic glasses are used in variety of application due to its crystallisation behaviour, physical, chemical, magnetic properties and different material property combinations. Bulk metallic glasses provides high strength, high elastic elongation limit, high hardness, excellent corrosion resistance and magnetic properties at the same time.

Common manufacturing method of bulk metallic glasses are different casting methods. These methods enables glassy structure with high cooling rates. However, machining is generally required to achieve net shape of bulk metallic glasses. Due to their high hardness generally preferred machining for bulk metallic glasses is grinding. Although depth of cut in grinding much lower that other machining methods, specific energy per chip volume is much higher than milling and turning. This causes high temperatures at grinding surface. There is a strong relationship between grinding temperatures and residual stresses. Residual stresses resulted from grinding is because of plastic deformation and grinding temperatures. High grinding temperatures cause tensile residual stresses and plastic deformations cause compressive residual stresses.

Presence of residual streses will be advantage and disadvantage according to its distribution, magnitude and direction. Compressive residual stresses increases fatigue strength due to it obstructs crack initiation in material which is exposed to tensile stresses.

Residual stresses has crucial effects on material propoperties like fatigue, fracture, corrosion and friction. Estimation of residual stresses distribution and magnitude within the material is very complex phenomenon. Measuring residual stresses accurately is very important in mechanically loaded parts. The importance of residual stresses depends on application, material, residual stress distribution and magnitude. The accaptable residual stress range can not be defined without these properties. The performance of material under thermal, mechanical and other loading depends on manufacturing methods and manufacturing induced residual stresses.

In many cases residual stresses within material including service stresses increases the sensitivity of brittle fracture and increases stress corrosion crack initiation rate.

Application of residual stress relief annealing enables reducing external stresses within the material. Also at high temperatures internal tensile residual stresses will exceed materials yield strength and this will cause plastic deformations. Cold forming and vibration methods are used to reduce residual stresses. Significant

amount of tensile residual stresses are reduced after cold rolling. There are also vibration methods which are used to reduce residual stresses.

Generally during initial concept design of mechanical parts, high safety factors are used to eliminate effects of residual stresses with unknown magnitude. This approach results design and manufacturing of heavy and expensive parts. High safety factors can not be used in some applications due to weight and cost constraints. This brings the requirement of measuring residual stresses within material in an accurate and precise manner. Knowing the residual stresses within material enables light, cheap and high reliability products. Currently residual stresses are measured in industries like aerospace and automotive due to engineering specifications but residual stress measurement will move to other industries as well due to increasing competitive product demands. Demand for high quality and high strength products will make residual stress measurements standard.

In the last decade several residual stress measurement methods are developed to measure residual stresses on different part and materials. The residual stress measurement methods can be classified into three as destructive, semi-destructive and non destructive methods. Destructive and semi-destructive methods can be also referred as mechanical methods which requires partial material removal on the material where residual stresses will be measured. Hole drilling, deep hole drilling, ring core, layer removal and sectioning methods are examples from mechanical methods. X-ray diffraction, neutron diffraction, ultrasonic and magnetic barkhausen noise methods are also examples for non-destructive residual stress measurement methods. This methods measures a residual stress related parameter and then residual stress will be measured according to this parameter.

The main difference between different residual stress methods are penetration, spatial resolution, material types, portability and cost. Non- destructive residual stress measurement methods are measuring interplanar distance of x-ray penetration and only suitable for crystalline materials. Destructive and semi-destructive methods measures relieved strains with material removal and applicable to both cyrstalline and non-crystalline materials. Type of residual stresses to be measured, material, required penetration, spatial resolution, accuracy, mobility of measurement and cost determines the suitable residual stress measurement method.

In this study 10 mm diameter bar shape $Zr_{52,5}Ti_5Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}$ bulk metallic glass is machined using parameters 2000 rpm cutting speed, 1000 mm/min feed and 0.01 mm depth of cut with CBN grinding wheel and after grinding residual stress is measured on the grinded surface.

Hole drilling residual stress measurement method is choosen with taking into account material, required penetration, spatial resolution, accuracy, mobility of measurement and cost. Due to bulk metallic glasses have non-crystalline structure, non-destructive methods can not be used it this study.

Hole drilling method uses specialized strain gage rosettes to measure relieved strains produced due to the hole drilled according to the ASTM E837. Hole drilling is done with high speed air turbine powered drill in order not to induce additional residual stresses during drilling. In this methodology residual stress present in the material are assumed to be uniform at the same radial distance from the hole center. The calculation of the residual stresses present in the material by the measurement of released strain at three different locations around the drilled hole based on the super position principle. Measuring the released strains due to the hole drilling inside the

material with specialized strain gauge rosettes is used for calculating the residual stresses, but the strain is highly influenced by the position of the strain gauge location around the hole.

Several researchers investigated that the accuracy of the hole drilling method for field applications will be directly related to the operator's ability to position the milling cutter precisely in the center of the strain gauge rosette. Studies showed that 0.025 mm off-center drilling will have error in calculated stress not more than 3%. In practice 0.025 mm alignment tolerance is achieved with using Vishay RS-200 milling guide which is used in this study.

Residual stress measurements through hole depth showed that residual stresses are compressive until 0.22 mm hole depth and after 0.22 mm residual stresses became tensile. The reason of having compressive residual stress on surface till 0.22 mm hole depth is due to plastic deformation caused by grinding wheel on workpiece surface.

After 0.22 mm hole depth effect of plastic deformation on workpiece surface has been diminished and grinding temperature became more dominant which caused tensile residual stresses.In other words till 0.22 mm hole depth mechanical stresses resulted from plastic deformation is greater than thermal stresses resulted from grinding temperature which caused compressive residual stresses. After 0.22 mm thermal stresses became bigger than mechanical stresses which caused tensile residual stresses. This is explained with temperature gradient through the thickness of workpiece.

As a result hole drilling residual stress measurement method is suitable for 10 mm diameter Zr-based bulk metallic glass after machined with grinding parameters of 2000 rpm cutting speed, 1000 mm/min feed and 0.01 mm depth of cut. This method can be used with specimens which has at least 3 times bigger width and 1.2 times bigger thickness that strain gage mean diameter. Also due to stress concentration factor around the drilled hole residual stress with in the material should be lower than 60% of material yield strength. If this limit is not achieved residual stress measurement can be done with ring core method which is explained in 4^{th} section but ring core method requires bigger specimen dimensions and it is not standardized method by ASTM.

After residual stress measurement concentricity of drilled hole with hole of strain gage is observed with using optic microscope. Observation showed that Vishay RS-200 high speed drilling is successful at drilling concentric hole.

Another conclusion of this study is grinding Zr-based bulk metallic glasses using 2000 rpm cutting speed, 1000 mm/min feed and 0.01 mm depth of cut with CBN grinding wheel has suitable parameters in terms of surface integrity due to it caused compressive residual stresses at workpiece surface.

1. GİRİŞ

Kalın camsı metaller sıvı haldeki camsı metal alaşımının çok hızlı soğutularak kristal yapı oluşumunun engellendiği ve atomların rastgele bir düzen oluşturduğu malzemelerdir. Ancak elde edilen yapı yarı kararlıdır ve ısıl aktivasyon ile daha kararlı olduğu kristal yapıyı oluşturma eğilimindedir [1]. Kalın camsı metaller kristalleşme davranışı, fiziksel, kimyasal, manyetik özellikleri ve farklı malzeme özelliği kombinasyonlarından dolayı çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Camsı metaller yüksek dayanım, yüksek elastik uzama limiti, yüksek sertlik, çok iyi korozyon dayanımı ve iyi manyetik özellikleri bir arada sunmaktadır.

Kalın camsı metallerin yaygın üretim şekli çeşitli döküm yöntemleridir. Bu yöntemler yüksek soğutma hızlarını mümkün kılarak amorf yapının elde edilmesini sağlar. Ancak kalın camsı metallerin son şekline getirilmeleri için talaşlı imalat yöntemleri kullanılabilmektedir. Kalın camsı metallerin sahip olduğu yüksek sertlik nedeniyle yaygın olarak tercih edilen talaşlı imalat yöntemi taşlamadır.Taşlamada talaş kaldırma miktarı geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla oldukça düşük olmasına rağmen talaş kaldırılan hacim başına harcanan enerji tornalama ve frezelemeye kıyasla çok yüksektir. Bu durum taşlama bölgesinde yüksek sıcaklıkların oluşmasına sebep olmaktadır. Yüksek sıcaklıklar çeşitli ısıl hasarlara sebep olabilmektedirler, bu hasarlariş parçasının fiziksel ve kimyasal özelliklerinde bozulmalara sebep olmaktadır.Ayrıca taşlama sıcaklıkları ile kalıntı gerilmeler arasında sağlam bir ilişki vardır. Taşlama sonrası oluşan kalıntı gerilmeler genellikle gerçekleşen plastik şekil değişimi ve taşlama ile oluşan sıcaklıkla ilgilidir. Yüksek sıcaklıklar çekme kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olurken, plastik şekil değişimleri ise basma kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olur.

Kalıntı gerilmeler malzeme içinde denge içindedir, bileşke kuvvet ve momentlerin toplamı sıfırdır. Bir parçada kalıntı gerilmenin olması her zaman bunun zararlı olduğu anlamına gelmez. Bunun değerlendirilebilmesi için kalıntı gerilmenin büyüklüğünün çekme mi yoksa basma karakterli mi olup olmadığının belirlenmesi gerekmektedir. Çekmeye maruz kalan bir parçada basma şeklindeki kalıntı gerilme

tercih edilebilmektedir. Yüksek yorulma dayanımı beklenen uygulamalarda parçada basma kalıntı gerilmesi bırakacak çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Geçtiğimiz on yılda farklı parça ve malzemelerde kalıntı gerilme ölçümünü mümkün kılan kalıntı gerilme ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir. Kırınım yöntemleri dışındaki sadece Tip I denilen makro gerilmelerin ölçümü mümkün kılan yöntemler tahribatsız, yarı tahribatlı ve tahribatlı olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Tahribatlı ve yarı tahribatlıyöntemlerde parçanın üzerinden malzeme kaldırılması sonucu ortaya çıkan şekil değişimleri ölçülerek kalıntı gerilmeler ölçülür. Tahribatsız yöntemler ise kristal yapıya sahip malzemelerde kafes düzlemleri arasındaki mesafenin değişimi ölçülerek kalıntı gerilme hesaplanır.

Bu çalışmanın amacı $Zr_{52,5}Ti_5Cu_{17,9}Ni_{14,6}Al_{10}$ bileşimine sahip 10 mm çapında çubuk şeklindeki Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin 2000 dev/dak anamil hızı, 1000 mm/dak ilerleme hızı, 0.01 mm paso ve CBN taş kullanılarak taşlanmasından sonra taşlanan yüzeyin delik delme yöntemiyle kalıntı gerilme açısından incelemektir.

2. CAMSI METALLER

2.1 Camsı Metallerin Tarihçesi ve Gelişimi

Metallerin çoğu katılaşma sırasında atomların düzenli ve tekrar eden bir yapı oluşturacak şekilde düzenlenmeleri ile kristalleşmektedir. Eğer hızlı soğuma ile kristalleşme engellenirse, atomlar rastgele bir düzen oluşturur ve oluşan yapıya camsı metal denilmektedir. Camsı metaller, eğer kalınlıkları 1 mm'den daha büyük olursa kalın camsı metal (KCM) olarak adlandırılmaktadırlar [1].

İlk camsı metal $Au_{75}Si_{25}$ 1960'da Duwez ve arkadaşları tarafından 105- 106 K/s mertebelerinde soğutma hızlarının elde edilmesi sonucu geliştirilmiştir. Bu çalışma hızlı soğutma hızlarıyla çekirdeklenme ve kristalleşme fazlarının engellenerek, donmuş bir sıvı yani camsı metal elde edilebileceğini göstermiştir[2]. Duwez ve arkadaşlarının çalışmasının önemini o dönemdeki diğer yöntemlere kıyasla daha fazla miktarlarda camsı metal üretimini mümkün kılması oluşturmaktadır. Bu dönemde camsı metalin sahip olduğu özellikler,temel bilimsel önem ve mühendislik alanlarına uygulanabilme potansiyelinden dolayı ilgi çekmiştir.Eriyik haldeyken su verme tekniklerindeki yoğun gelişmeler, farklı camsı metallerin üretimini mümkün kılmıştır.

Sürekli döküm yöntemlerinin camsı metal üretiminin ticari olarak gerçekleştirilebilmesi için geliştirilmesi 1970 ve 1980 yıllarında camsı metal araştırmalarına hız kazandırmıştır [3]. Akademik ve endüstriyel araştırmalar bu dönemde ciddi artış göstermiştir ancak yüksek soğutma hızlarının amorf alaşımların geometrilerini ince plakalarla sınırlandırması, camsı metalin geniş uygulama alanı bulmasını engellemiştir.

Akademik olarak Turnbull ve arkadaşlarının çalışması camsı metal çalışmalarına çok önemli bir katkı sağlamıştır.Onlar camsı metallerle metal olmayan silikat, seramik, cam ve polimerler arasındaki benzerlikleri göstermiştir. Çalışmaları camsı geçişin geleneksel camlarda olduğu gibi hızlı soğutulan camsı metallerde de gözlemlendiğini belirtmiştir. Bu çalışmalar sırasında camsı geçişin ısıtma hızı değişmediği taktirde

belirli tanımlanmış bir sıcaklıkta olduğu gözlemlenmiştir. Turnbull camsı yapıya sahip olabilme kriteri olarak kullanılabilecek bir oran belirlemiştir. Bu orana $T_{rg}=T_g/T_m$ olarak tanımlanmıştır. T_g alaşımın camsı geçiş sıcaklığı T_m ise erime sıcaklığıdır. Turnbull'un kriterine göre T_g /T_m = 2/3 olan sıvılar kristallenme sırasında viskoz hale geldiği için sadece çok dar bir sıcaklık aralığında kristallenebilmektedir. Bu tür sıvılar kolaylıkla camsı hale düşük soğutma hızları ile soğutulabilir [4]. Uzun yıllar Turnbull kriteri sıvıların camsı yapıya sahip olabilme derecesini tahmin etmede kullanılmıştır.Bu oran çeşitli camsı metaller ve KCM'lerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır.

İlk KCM Pd-Cu-Si alaşımı 1974'te Chen tarafından hazırlanmıştır [5]. Chen basit döküm yöntemleri kullanarak 1 mm çapında Pd-Cu-Si camsı metal çubukları önemli derecede düşük olan 103 K/s soğutma hızlarıyla elde etmiştir [5]. Eğer milimetre ölçeği kalın olarak tanımlanırsa, bu kalın camsı metalin ilk örneği olarak düşünülebilir. 1982'de Turnbull ve arkadaşları iyi bilinen ilk Pd-Ni-P kalın camsı metalini, eriyiği saflaştırıp heterojen çekirdeklenmeyi önlemek için boron oksit flaks (flux) kullanarak elde etmişlerdir [6].Boron oksit flaks kullanarak yapılan deneyler heterojen çekirdeklenme engellendiğinde alaşımın T_{rg} değerinin 2/3'e eriştiğini ve santimetre boyutunda kalın camsı metal parçaların 10 K/s soğutma hızıyla elde edilebileceğini göstermiştir. Pd tabanlı kalın camsı metallerin elde edilmesi heyecan verici bir gelişme olmasına rağmen, Pd metalinin pahalı olması bu yöndeki akademik çalışmaların sadece birkaç yıl sürmesine sebep olmuştur [6].

1980'li yıllarda hızlı su verme yöntemlerinden tamamen farklı mekanizmalara sahip olan birçok katı faz amorfizasyon teknikleri teknikleri geliştirilmiştir. İnce film formundaki birçok camsı metal yayınışma ile camsı geçiş sıcaklığının altında elde edilmiştir. 1980'lerin sonunda Japonya Tohoku Üniversitesinden Inoue ve arkadaşları düşük kritik soğutma hızlarına sahip genel olarak ortak metaller içeren yeni alaşım sistemlerini bulmayı başarmıştır [7]. Bu alaşımlara örnek olarak La-Al-Ni ve La-Al-Cu örnek olarak verilebilir. Inoue ve arkadaşları eriyik alaşımı su soğutmalı bakır kalıplara dökerek birkaç milimetre kalınlığında kalın camsı metal çubuklar elde etmişlerdir [7]. Bu çalışması sonrasında araştırmacılar benzer dörtlü ve beşli amorf alaşımlar geliştirmişler (La-Al-Cu-Ni ve La-Al-Cu-Ni-Co) ve 100K/s soğutma hızında birkaç santimetre döküm kalınlıklarına ulaşmışlardır [8].

2.2 Kalın Camsı Metallerin Üretimi

Kalın camsı metaller ilk olarak eriyik metallerin 106 K/s gibi hızlı soğuma hızlarında soğutulmasıyla üretilmişlerdir. Kristal yapıya sahip metallerin amorf yapıda üretilebilmelerinin yarattığı bu heyecan kalın camsı metallerin üretimini mümkün kılan birçok yöntemin gelişmesini sağlamıştır [9-12]. Ticari olarak farklı uygulamalarda kullanılmak üzere büyük ölçülerdeki plakaların gereksinimi düzlemsel akış döküm yönteminin gelişmesini sağlamıştır. Bu yöntem ile en az 30 cm genişliğinde hızlı soğutulan plakalar üretilebilmiştir.

2.2.1 Su verme yöntemi

Bu yöntem asırlardır çeliği sertleştirmek için kullanılan en basit yöntemdir. Çeliğin sertleştirilmesi çelik numunenin östenit bölgesine ısıtılıp, bu bölgede bir süre bekledikten sonra çeliğin hızlıca soğutulmasıyla gerçekleştirilir. Su ile soğutma sıcak çelik numuneden ısıyı hızlıca alarak östenitten martenzite faz dönüşümünü difüzyona izin vermeden gerçekleştirir. Su verme yöntemiyle elde edilebilecek soğutma hızları su verme ortamının ısı geçişi verimlilliğine, çelik numunenin boyutuna ve ısıl özelliklerine bağlıdır. Genellikle bu yöntem kullanılarak 10-100 K/s soğutma hızları elde edilebilir.

Bazı kalın camsı metaller çok düşük soğutma hızları gerektirmediğinden basit su verme yöntemiyle üretilebilirler. Su verme ile ilk 1-3 mm çapında çubuklar üretilmiştir [5]. Sonrasında $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ kalın camsı metal alaşımları Turnbull ve arkadaşları tarafından 5 ve 10 mm kalınlıklarında su verme ile üretilmiştir [6,13].

Inoue ve arkadaşları 1.2 mm çapındaki $La_{55}Al_{25}Ni_{20}$ kalın camsı metal çubukları su verme yöntemi ile üretmişlerdir [14]. Daha sonra bu üretim yöntemi diğer araştırmacılar tarafından farklı alaşımlardaki kalın camsı metallerin üretilmesi için kullanılmıştır. Su verme yöntemiyle üretilmiş olan kalın camsı metal alaşımları Çizelge 2.1'de görülebilir.

Su verme yöntemi oldukça basit bir yöntemdir. Alaşımlar geleneksel ark ocağı ve indüksiyonla eritme yöntemleri ile hazırlanır. Daha sonra bu alaşımlar kuvars bir tüpe yerleştirilerek likidus sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılarak tamamen erimeleri sağlanır.Alaşımlar eritildikten sonra alaşımların içinde bulunduğu kuvars tüp akan veya karıştırılan su içine sokulur.

Çizelge 2.1 : Su vermeyöntemiyleüretilmişolankalıncamsı metal alaşınları.

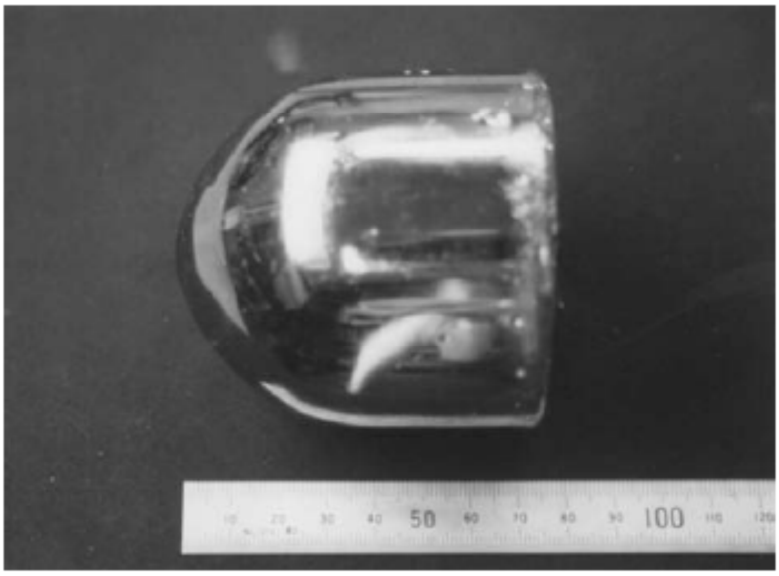
Alaşım Sistemi	Çubuk Çapı (mm)	Kritik Soğutma Hızı (K/s)	Yıl	Kaynak
$(Pd_{1-x}M_x)_{0.835}Si_{0.165}$	1-3	$<10^3$	1974	[5]
$(Pd_{1-x}T_x)_{1-Xp}P_{xP}$	1-3	$<10^3$	1974	[5]
$(Pt_{1-x}Ni_x)_{1-Xp}P_{xP}$	1-3	$<10^3$	1974	[5]
$Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$	5-6	~1	1982	[13]
$Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ (flakslı)	10		1984	[6]
$Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{17.5}$	<16	1.5	1993	[15]
$Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$	14	<10	1993	[16]
$Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$	40	1.57	1996	[17]
$Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ (flakslı)	50-72	0.1	1997	[18]
$Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$	7	100	1999	[19]
$Pd_{40}Ni_{32.5}Fe_{7.5}P_{20}$	7	100	1999	[19]
$Pd_{40}Ni_{20}Fe_{20}P_{20}$	7	100	1999	[19]
$Mg_{65}Y_{10}Cu_{15}Ag_5Pd_5$	12		2001	[20]
$Y_{56}Al_{24}Co_{20}$	1.5		2003	[21]
$Y_{36}Sc_{20}Al_{24}Co_{20}$	25		2003	[21]
$Pt_{60}Cu_{20}P_{20}$	<4		2004	[22]
$Pt_{60}Cu_{16}Co_2P_{22}$ (flakslı)	16		2004	[22]
$Pt_{57.5}Cu_{14.7}Ni_{5.3}P_{22.5}$	16		2004	[22]
$Pt_{42.5}Cu_{27}Ni_{9.5}P_{21}$ (flakslı)	20		2004	[22]

Kuvars tüplerin çapları elde edilmek istenen kalın camsı metal çapına göre farklılık gösteririr. Kuvars tüplerin et kalınlığı genellikle 1 mm'dir, boru boyları ise 1 cm ile 15 cm arasında değişmektedir. Bu yöntemle elde edilebilecek soğutma hızı genellikle yaklaşık 10^2 K/s'dir, bu nedenle bu yöntemle sadece camsı hale geçiş kabiliyeti yüksek alaşımlarda çubuk formunda kalın camsı metallerin üretimi mümkün kılmaktadır.

Kuvars tüplerin kullanımı yaygın olmasına rağmen alaşımları eritmek için farklı malzemedeki tüpler kullanılmaktadır. Amiya ve Inoue Mg alaşımını kuvars tüp kullanarak erittiklerinde 4 mm çapında kalın camsı metal çubuklar üretemezken, demir tüp kullandıklarında 12 mm çapında kalın camsı metal çubuk üretmeyi mümkün kılmıştır [20]. Analiz sonrasında Mg alaşımını eritmek için kuvars tüp

kullanıldığında, çözünen Si, Mg eriyiği içinde impürite olarak davranarak heterojen çekirdeklenmelerin başlamasına sebep olmuştur. Bu da alaşımın camsı hale geçiş kabiliyetini azaltmıştır.

Şekil 2.1'de su verme yöntemiyle elde edilen 72 mm çapındaki silindirik $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ alaşımı görülebilir. Kalın camsı metal özelliği taşıyan bu silindir, parlak ve pürüzsüz bir yüzeye sahiptir. Su verme yönteminin en önemli avantajı düşük katılaşma hızlarına sahip olduğu için, elde edilen numuneler diğer yöntemlere göre daha az kalıntı gerilme içermektedir [23].



Şekil 2.1 : 72 mm çapındaki silindirik $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ alaşımı [23].

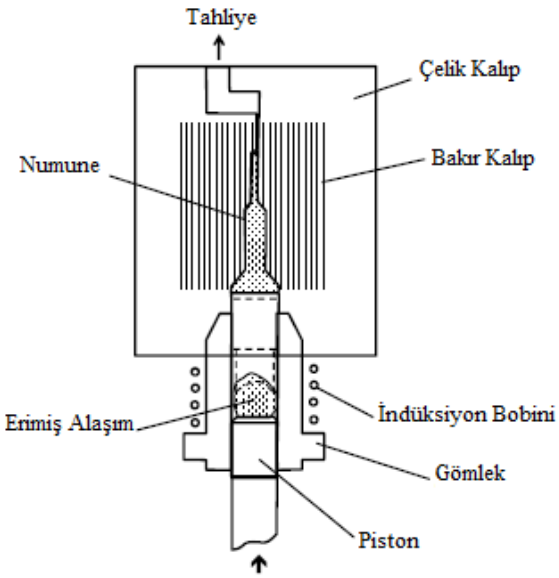
2.2.2 Basınçlı döküm yöntemi

Basınçlı döküm endüstride farklı özelliklerdeki dökümleri üretmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Geleneksel kum dökümle kıyaslandığında basınçlı döküm ısınının metal kalıptan uzaklaştırılması daha hızlı olduğu için daha yüksek katılaşma hızlarına sahiptir ayrıca kompleks geometrilerin üretilmesini mümkün kılar. Bu nedenle basınçlı döküm yöntemi bir çok araştırmacı tarafından değişik alaşım sistemlerindeki kalın camsı metallerin üretiminde kullanılmıştır [23].

Şekil 2.2'de Inoue ve arkadaşlarının Mg temelli kalın camsı metalin üretiminde kullandıkları basınçlı döküm ekipmanı görülmektedir [24]. Ekipmanın ana parçaları ; alaşımı eritmek için gömlek, erimiş alaşımı hidrolik basınç ile bakır kalıba itmek için piston, alaşımı katılaştırmak için bakır kalıptır. Sistemde erimiş alaşım içinde gazların hapsolup dökümde poroziteye sebep olmamak için tahliye deliği

mevcuttur.Gömlek ve piston, ısıya dayanıklı takım çeliğinden yapılmıştır. Metalik alaşım gömleğin içinde argon gazının bulunduğu bir atmosferde yüksek frekanslı indiksiyon bobini ile ısıtılır. Alaşım eritildikten sonra, piston tarafından bakır kalıba itilir ve bakır kalıba dolan alaşım yüksek iletkenliğe sahip bakır ile temas edince katılaşmaya başlar. Genellikle yağlayıcı gerekmemektedir ancak bakır kalıptan döküm parçayı çıkarmak zorlaşırsa katı yüzeyler yağlanabilir.

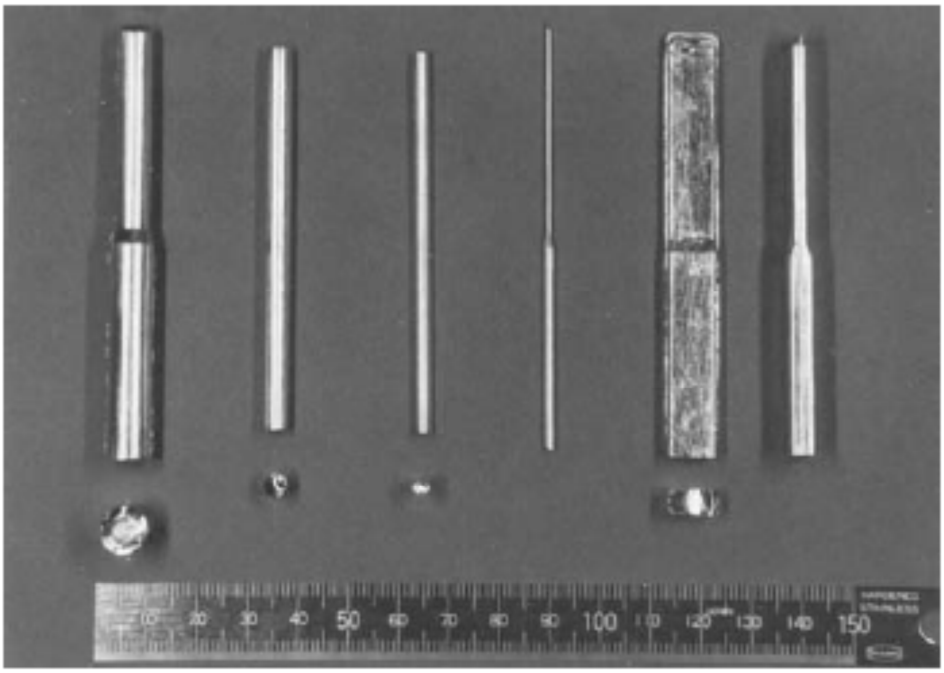
Bu sistem bir çok gereksinimi karşılamaktadır. İlk olarak dökülen parça bir kaç milisaniye içinde katılaşmaktadır, yüksek katılaşma hızlarına sahiptir ve sistemin üretkenliği yüksektir. İkincisiyse, yüksek basınç erimiş alaşım ve bakır kalıp arasında iyi bir temas oluşmasını sağlayarak, alaşımdan bakır kalıba olan ısı transferinin artmasını sağlayarak, yüksek soğutma hızlarının elde edilmesini mümkün kılar. Bu avantajlara ilave olarak dökümde metalin soğuması kaynaklı döküm çekintilerinin oluşumu azaltılmıştır. Ayrıca kalıbın şekli değiştirilerek farklı geometrilerdeki parçaların üretilmesi mümkündür.



Şekil 2.2 : Basınçlı döküm ekipmanı [24].

Inoue ve arkadaşları bu yöntemi Mg-Cu-Y [24] ve La-Al-TM [25] alaşım sistemlerindeki kalın camsı metallerin üretimi için kullanmıştır. Döküm basıncı olarak 63 MPa, piston hızı olarak 1.7 m/s ve kalıp ütüleme süresi olarakta 5 s olan proses değerlerini kullanmışlardır. Bu yöntemle boyları 40-80 mm arası ve çapları 1-9 mm arası olan çubuklar ile genişliği 80 mm olan ve kalınlığı 0.5-0.9 mm arası değişen levhalar da üretilebilmektedir.

Şekil 2.3'te Mg-Cu-Y alaşımından bu yöntem kullanılarak elde edilen çubuklar ve levhalar görülebilir [24]. Elde edilen çubuk ve levhalar parlak ve hatasız yüzeylere sahip olabilmektedir. Döküm numunelerinin kesitleri incelendiğinde porozite oluşumuna rastlanmamıştır. Eğer porozite oluşuma rastlanırsa proses parametrelerin değiştirilerek, porozite oluşumunun engellenmesi gerekmektedir çünkü kalın camsı metallerin mekanik özellikleri porozite miktarıyla önemli ölçüde değişmektedir.



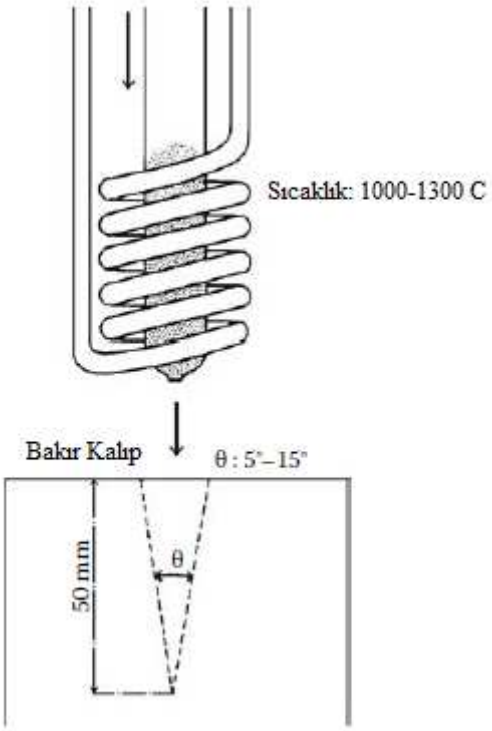
Şekil 2.3 : $Mg_{65}Cu_{25}Y_{10}$ alaşımından basınçlı döküm yöntemi kullanılarak elde edilen numuneler [24].

Basınçlı döküm yöntemiyle genellikle 10^3 K/s soğutma hızları elde edilebilmektedir. Inoue ve arkadaşları Al tabanlı Al-Si-Cu-Zn alaşımında dendrit kol uzunlukları ölçümlerine dayanarak 3.5 mm çaplı silindirin dış yüzünde soğuma hızını 2×10^4 K/s ve merkezde ise 2.5×10^3 K/s olarak tahmin etmişlerdir [26]. Bu soğutma hızları oldukça yüksek olduğu için bu yöntem camsı hale geçişi için yüksek soğuma hızları gerektiren alaşım sistemlerinden kalın camsı metal numuneler üretmek için kullanılabilir. Bu yöntemle kalın camsı metal üretilebilen alaşım sistemlerine örnek olarak Mg-Ni-Ln, Mg-Cu-Ln, La-Al-TM ve Zr-Al-Tm (Ln= lantanit metal ve TM= geçiş metali). Ayrıca nispeten daha düşük soğutma hızları gerektiren alaşımlardan da bu yöntemle kalın camsı metal üretilebilir.

2.2.3 Bakır kalıba döküm

Bu yöntem farklı alaşım sistemlerinden kalın camsı metal üretilmesi için kullanılan en yaygın yöntemdir. Inoue ve arkadaşları [27] ve Kim ve arkadaşları [28] tarafıdan yaygın olarak kullanılmıştır.

Şekil 2.4'de kalın camsı metallerin bakır kalıba döküm yöntemiyle üretiminde kullanılan ekipman görülebilir. Basitçe bu yöntemde alaşım eritilerek, bakır kalıba dökülür ve burada alaşım katılaşarak hızlı bir şekilde soğur.



Şekil 2.4 : Bakır kalıba döküm yönteminde kullanılan ekipman [29].

Genellikle bu yöntemde alaşımlar indüksiyonla eritme yöntemiyle eritilmektedir ancak bazen ark eritme yöntemide kullanılmaktadır. Alaşımlar birçok kez tekrar eritilerek bileşimsel homojenlik sağlanmaktadır. Yüksek buhar basıncına sahip alaşımlar eritilirken örneğin magnezyum, eritme süresince buharlaşan magnezyumu karşılamak için ağırlıkça ilave % 5 malzeme eklenmektedir.

Eritme işlemi tamamlandıktan sonra alaşım bakır kalıba dökülmektedir. Genellikle potadan kalıba metal doldurulurken 50 kPa gibi düşük bir basınç uygulanmaktadır. Ergimiş alaşımın sıcaklığı kalıp doldurulurken eriyiğin katılaşmasını engelleyecek bir sıcaklıkta tutulmaktadır. Döküm işlemi normal havanın olduğu ortamda,

vakumda, eğer oksidasyonun engellenmesi gerekiyorsa soy gazların bulunduğu bir ortamda yapılabilir.

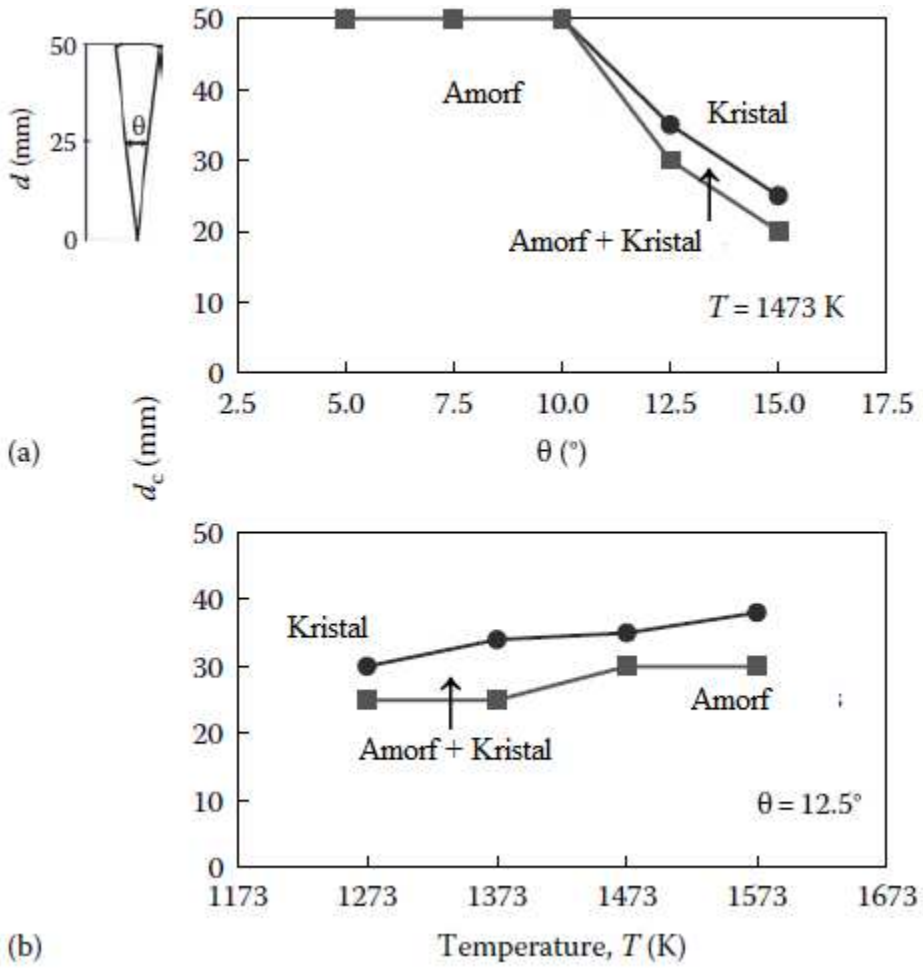
Kalıbın şekli farklı geometrik formlarda olabilir. En yaygın ve basit kalıp şekli silindirik çubuk şeklinde belirlenen uzunluklarda kalıp boşluğuna sahip olan kalıplardır. Farklı iç çaplara sahip kalıplardan kaçınmak için kama ve koni şeklindeki kalıplar kullanılabilir. Kama şeklinde kalıp kullanmanın amacı tekbir deneyde farklı çaplara sahip numunelerin üretimini mümkün kılmasıdır. Inoue ve arkadaşları tarafından kullanılan kama şeklindeki kalıp 50 mm derinliğe ve 5˚-15˚ arasındaki açıya sahiptir [29].

Inoue ve arkadaşları kama şekilli kalıbın uzunluğu boyunca platinyum-rodyum (Pt-Rh) ısıl çiftleri yerleştirerek soğuma hızlarını ölçmüşler ve sürekli soğuma dönüşüm eğrilerini oluşturmuşlardır [29]. Kalıp içerisinden farklı bölgelerden alınan numuneler X-ışını kırınım, optik mikroskop ve geçirimli elektron mikroskobu ile incelenerek malzemenin amorf veya kristal olup olmadığı incelenmiştir.

Şekil 2.5 (a)'da $Zr_{60}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}Pd_5$ alaşımının 1473K pota çıkış sıcaklığındaki faz davranışının açı ve yüksekliğe göre davranışı görülebilir [29]. Bu şekilden de görüleceği gibi 20 mm kama yüksekliğine kadar olan tüm açı değerlerinde iç yapı hep amorf olarak gözlemlenmiştir. Aynı şekilde tüm kama yüksekliklerinde 10˚ ye kadar olan kama açılarında iç yapı amorf olarak gözlemlenebilir.

Kalın camsı metallerin elde edilmesi için amorf yapı esas olduğu için amorf yapıyı mümkün kılan farklı kama uzunlukları için kritik açı değerleri belirlenebilir. Bu kritik kama açısı değeri 50 mm kama uzunluğunda 10˚ iken sırasıyla 30 ve 20 mm kama uzunlukları için 12.5˚ ve 15˚ olmaktadır. Bu faz diyagramı sadece bir alaşım için tek bir pota döküm sıcaklığında geçerlidir. Faz diyagramı bu paramaterelerin farklı kombinasyonları için değişecektir.

Şekil 2.5 (b)'de $Zr_{60}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}Pd_5$ alaşımının faz durumunun kritik çap ve döküm sıcaklığı ile değişimi görülebilir. Bu grafikte kama açısı 12.5˚ olarak sabittir. Bu şekilde de amorf fazın döküm sıcaklığına bağlı olarak 25-30 mm kama yüksekliklerinde elde edilebileceği görülmektedir. Ayrıca yüksek döküm sıcaklıkları için daha yüksek kama uzunluklarında amorf yapı elde etmek mümkün görünmektedir.



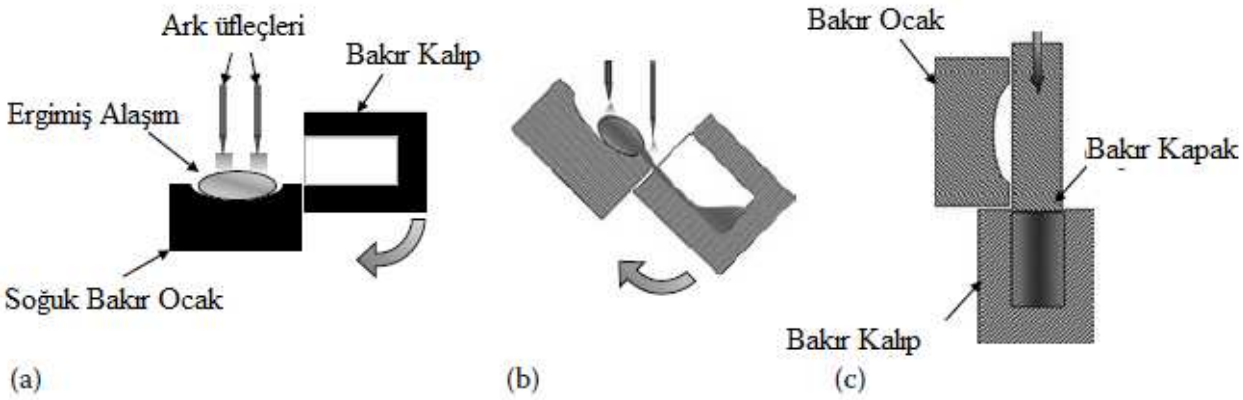
Şekil 2.5 : (a) $Zr_{60}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}Pd_5$ alaşımının açı ve yüksekliğe gore bileşimin değişimi (b) $Zr_{60}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}Pd_5$ alaşımının pota çıkış sıcaklığı ve yüksekliğe gore bileşimin değişimi [29].

2.2.4 Kapak döküm yöntemi

$Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ kalın camsı metal alaşımı yüksek dayanım, yüksek kırılma tokluğu ve yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu için mikrodişli motorlar, basınç sensörleri, golf sopaları ve optik parçalarda kullanılması uygundur. Ancak geleneksel metal kalıba döküm yöntemiyle üretilebilecek kalın camsı metal çubuğun çapı 16 mm ile sınırlıdır. Bu nedenle üretilebilecek kalın camsı metal çubuğun çapını büyütmek için Yokoyama ve arkadaşları kapak döküm yöntemini geliştirmişlerdir [30].

Şekil 2.6'da arkla eritme, eğik döküm ve kapak döküm yöntemleri kıyaslanmıştır. Kapak döküm yönteminde eriyen alaşım bakır kalıba döküldükten sonra hızlıca katılaşması için üzerine kapak şeklinde bir metal kapak ile temas ettirilir. Ayrıca kapağa 1 kN kuvvet uygulanır. Bu yöntemin en büyük avantajı yüksek soğuma hızlarının sadece kalıba temas eden yan ve alt yüzeylerde değil ayrıca kapağın temas

ettiği üst kısmında da elde edilmesidir. Yokoyama ve arkadaşları bu yöntemi kullanarak 30 mm çapında tam amorf $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ alaşımı elde etmişlerdir [30]. Ayrıca yüksek geçirimli elektron mikroskobunda yapılan incelemelerde alaşımda kristal yapının varlığına rastlanmamıştır.



Şekil 2.6 : (a) Arkla eritme (b) Eğik Döküm (c) Kapak Döküm [23].

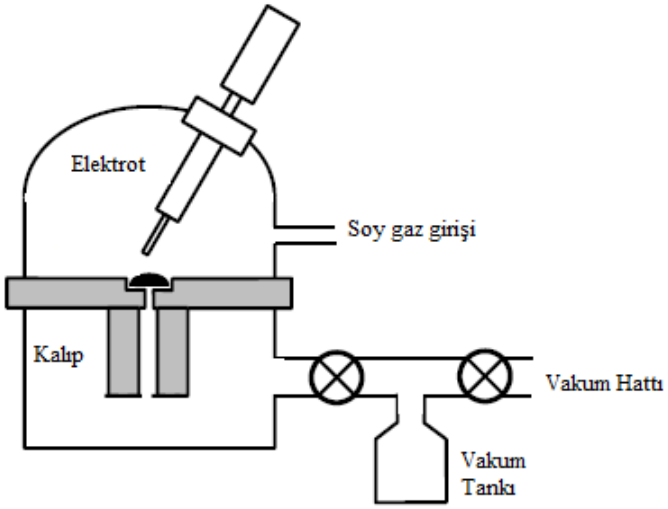
2.2.5 Vakumlu döküm yöntemi

Bu yöntemde kalın camsı metallerin üretilmesinde kullanılan bir diğer yaygın yöntemdir. Bu yöntemdeki temel prensip ergimiş alaşımın eritme bölgesi ve döküm bölgesi arasındaki basınç farkından faydalanarak döküm işleminin gerçekleştirilmesidir. Inoue ve Zhang [31], Figueroa ve arkadaşları [32], Gu ve arkadaşları [33] ve Wall ve arkadaşları [34] bu yöntemi kullanarak çalışmalar yapmıştır.

Bu yöntemde eğer ergimiş metal kalıba basınç farklı ile dolmuyorsa buna düşürme döküm yöntemi denilmektedir. Düşürme döküm yöntemi genellikleçapı 6 mm üzerindeki parçalar için kullanılmaktadır, 6 mm altı içinse vakumla döküm yöntemikullanılmaktadır. Vakumlu döküm yönteminde kullanılan vakum erimiş alaşımı küçük çaptaki kalıba doldurmak için gerekenli zorluğu azaltmaktadır. Düşürme döküm yöntemi Shen ve arkadaşları tarafından çapı 16 mm'ye kadar olan $Fe_{41}Co_7Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2$alaşımının üretilmesi için kullanılmıştır [35].

Vakumlu döküm iki hazneden oluşmaktadır, üst hazne alaşımın eritildiği, alt hazne ise dökümün bakır kalıpta yapıldığı haznedir. İki hazne birbirine bir orifis ile bağlıdır. Bu orifisin çapı yaklaşık 2 mm [33], bazı durumlarda ise 16 mm [31] kadar büyük olabilmektedir. Alt hazne vakum kaynağına bağlıdır, vanalar açıldığında erimiş alaşımı bakır kalıbı doldurmaya zorlar ve kalıba dolan erimiş alaşım bakır

kalıpta katılaşır. Şekil 2.7'de vakum döküm yönteminin şematik gösterimi görülebilir.



Şekil 2.7 : Bakır kalıba döküm yönteminde kullanılan ekipman [33].

2.2.6 Sıkıştırmalı döküm yöntemi

Bazı durumlarda kalın camsı metallerin içinde üretim yöntemi kaynaklı poroziteler olur. Ayrıca döküm sonrası parçanın ilave işlemeler ile son haline getirilmesi istenmez. Sıkıştırmalı döküm parçanın döküm sonrası ilave işlemeler ile son hale getirilmesini engelleyen bir üretim yöntemidir. Sıkıştırmalı döküm yönteminde eriyik haldeki alaşım kalıp içinde yüksek basınç altında kalıp içinde katılaşır [36].

Zhang ve Inoue [37] 1998 yılında bu tekniği Zr-Ti-Al-Ni-Cu kalın camsı metal 2.5 mm kalınlığında 35 mm genişliğinde ve 80 mm uzunluğunda plakalar üretmek için kullanmıştır. Elde edilen plakalar parlak ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olmuştur. Parçanın yüzeyinde kristal faza rastlanmamış ve parçada döküm kusurları olmadan üretilebilmiştir. Farklı plaka kesitlerinden alınan numunelerin mekanik özellikleri kıyaslandığında uniform mekanik özellikler elde edilmiştir. Özellikle numunedeki kusurlara hassas olan kırılma tokluğu değerlerinde farklılık görülmemiştir. Bu yöntem yüksek güvenirlikli malzeme özellikleri ile üretimi mümkün kıldığı için Inoue ve arkadaşları bu yöntemi kullanarak 4-5 mm kalınlığında golf sopalarında kullanılabilecek plakalar üretmişlerdir.

Sıkıştırılmalı döküm yönteminde katılaşma süresince yüksek basınç uygulanması kalıp ve eriyik alaşım arasında yakın bir temasın olmasına izin verir. Bu durum eriyik alaşımın hızlıca soğumasına ve katılaşma hızının artmasına sebep olur. Ayrıca

alaşımın basınç altında erime sıcaklığı arttığı için soğuma sırasındaki sıcaklık farkı artmış olur. Bu yöntemin avantajları özetlenecek olursa eriyik metal ve kalıp yüzeyi arasında artan ısı transfer katsayısı, soğuma sırasında artan sıcaklık farkı,çekinti, porozite gibi döküm kusurlarının oluşmaması ve döküm sonrası ilave bir işleme operasyonuna ihtiyaç duyulmaması söylenebilir.

2.2.7 Arkla eritme yöntemi

Bu yöntemle camsı fazlar oluşturmak için düşük kritik soğutma sıcaklıklarına ihtiyaç duyan alaşım sistemlerinden kalın camsı metal elde edilmesi için kullanılabilir. Alaşım öncelikle bakır ocakta eritilir sonrasında bakır ocak soğutma plakası olarak davranarak eriyikten ısı çekerek katılaşmasını sağlar. Bu yöntemin bir şeması Şekil 2.6 (a)'da gösterilmiştir.

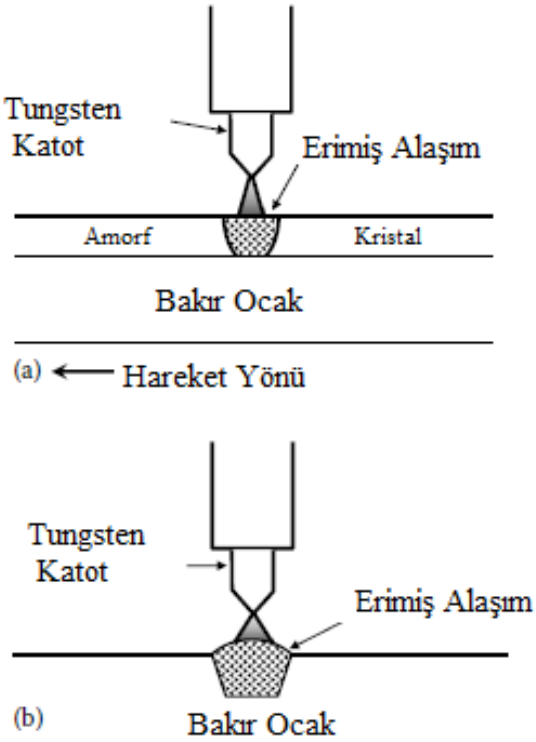
Arkla eritme yöntemi geleneksel alaşımların metal kalıpta dökülmesiyle benzerlikler içermektedir. Geleneksel bir döküm alaşımının katılaşan mikroyapısı üç türe ayrılabilir. Bunlardan ilki kalıp duvarıyla doğrudan temas halinde olan ve bu nedenle çok yüksek soğumaya maruz kalan kısımdır. Bu bölgede soğuma hızı ve katılaşma çok hızlı olduğu için ince taneli bir yapıya sahip olunur. İkinci tür ise katı ve sıvı arayüze sahip olma durumudur. Son tür ise eş eksenli yapının oluştuğu türdür.

Arkla eritme yönteminde bu üç mikroyapıya rastlamak mümkündür. İlk iki tür arkla eritme yönteminde benzerdir ancak üçüncü eş eksenli yapının yerini arkla eritme yönteminde camsı bir faz almıştır. Bu yöntemle üretilen kalın camsı metallerde döküm merkezindeki soğutma hızı yüzeye göre çok düşeceği için bu yöntem dökümün merkezindeki soğuma hızında camsı yapı oluşturabilecek alaşımlardan kalın camsı metal üretilmesi için uygundur.

2.2.8 Tek yönlü alan ısıtma yöntemi

Tek yönlü alan ısıtma yöntemi elektronik uygulamarında kullanılacak yüksek saflıktaki tek kristallerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde saf olmayan metal bir çubuğun küçük bir bölümü eritilir ve eritilmiş bu bölge çubuğun uzunluğu boyunca yavaşça hareket ettirilir. Bu işlem sonrası metal çubukta bulunan impuriteler sıvı faza ayrışır ve arkasında daha saf katı faz bırakır. Bu işlem birkaç kez tekrarlandığında tüm impüritelerin çubuğun bir ucunda toplandığı saf bir metal çubuk elde edilmiş olur. Bu yöntem asıl olarak silisyum ve germanyum kristallerinin

transistoruygulamalarında kullanılması için saflaştırılmasındakullanılmaktadır.Inoue ve arkadaşları bu yöntemi Zr esaslı kalın camsı metal numunelerin üretimine başarıyla uyarlamıştır [38]. Şekil 2.8'de Inoue ve arkadaşlarının kullandığın alan ısıtma ekipmanı görülmektedir.



Şekil 2.8 : Alan ısıtma ekipmanı a) ön görünüş b)yan görünüş [39].

2.2.9 Elektromanyetik titreşim yöntemi

Eriyik haldeki metal alaşımlarının amorf halde katılaşabilmesi ve amorf faz oluşturması için gerekli kritik soğutma hızından daha yüksek soğutma hızlarında soğutulması gerekmektedir. Camsı metallerin oluşumda elektrik ve manyetik alanın da etkisi vardır. Tamura ve arkadaşları alternatif elektrik akımı kaynaklı elektromanyetik alanların kristal fazların oluşumunda etkisi olduğunu yaptıkları çalışmayla görmüşlerdir [40]. Bu etkilerin alaşımların camsı faz oluşturma yeteneğini arttırdıklarını saptanmıştır. $Mg_{65}Cu_{25}Y_{10}$ alaşımı bu çalışmalarda kullanılmıştır. 2 mm çapında ve 12 mm uzunluğundaki numune alaşım alumina tüp içindeki iki molibden elektrot arasına yerleştirilmiştir. Numune eritildikten sonra 2 dakika aynı sıcaklıkta tutulmuş ve sonrasında alumina tüpün dışına su püskürtülerek eriyiğin soğuması sağlanmıştır. Farklı sürelerde farklı manyetik akı yoğunlukları uygulanarak optimum proses parametreleri belirlenmiştir. Çalışma sonrasında

alaşıma manyetik akı uygulanmadığında (0 T) alaşımın sadece kristal yapılardan oluştuğu, 10 T büyüklüğünde manyetik akı uygulandığında ise tamamen amorf yapının oluştuğu görülmüştür. Aynı şekilde manyetik akının 10 saniye süresince uygulandığında tamamen amorf bir yapı elde edilirken, 10 saniyeden daha kısa süreler kısmi kristal kısmi amorf ve tamamen kristal yapıların oluşmasına neden olmuştur. Metal alaşımın eritildikten sonra soğutulmadan önce bekleme süresinde azaltığında amorf yapının oluşumunun arttığı gözlemlenmiştir.

2.3 Kalın Camsı Metallerin Mekanik Özellikleri

Kalın camsı metaller çok yüksek çekme dayanımına sahiptir ancak kalın camsı metallerin zayıf tarafı oda sıcaklığında düşük sünekliğe sahip olmalarıdır. Kalın camsı metaller akma sonrası plastik deformasyona uğramadan koparlar. Ancak yüksek sıcaklıklardaki deformasyon davranışı tamamen farklıdır.

Kalın camsı metallerin deformasyon davranışı düşük sıcaklık, yüksek gerilme ve şekil değiştirme hızlarında homojen olmayan, yüksek sıcaklık ve yüksek şekil değiştirme hızlarında ise homojen olarak tanımlanabilir. 0.5 T_g sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda deformasyonun çoğu yükleme eksenine 45° eğimdeki maksimum kayma gerilmesinin oluştuğu düzlemde çok ince kayma bantları şekildedir. Bu bölgesel deformasyon homojen olmayan deformasyon olarak adlandırılır. Homojen olmayan deformasyon yüksek gerilmelerde kararsızdır ve parçanın aniden kopmasıyla sonuçlanır.

Öte yandan $0.5T_g$ sıcaklığının üzerindeki yüksek sıcaklıklarda kalın camsı metaller viskoz akış gösterirler ancak plastik şekil değişimi malzemenin değişik hacimdeki elementleri için eşit değildir. Herbir değişik hacimdeki element şekil değişimine katkıda bulunur. Bu tür deformasyon homojen deformasyon olarak adlandırılır.

Kalın camsı metal numunesiyle çekme testi yapıldığında numune elastik olarak en fazla %2 şekil değiştirir ve sonrasında aniden kopar. Bu sadece elastik şekil değişimi görülen gerilme-şekil değiştirme eğrisidir. Öte yandan kalın camsı metal numunesiyle basma testi yapıldığında gerilme-şekil değiştirme eğrisi elastik şekil değişimini izleyen %1 e kadar plastik şekil değişimine uğrar.

2.3.1 Homojen olmayan deformasyon

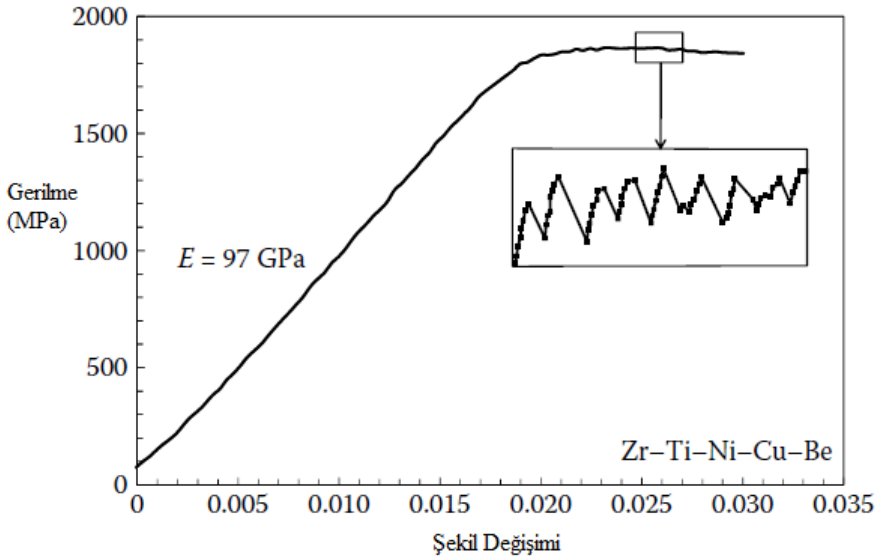
Bu tip deformasyon kayma bantlarının oluşumu, kayma bantlarının ani olarak büyümesi ve numunenin ani olarak kopmasıyla sonlanır. Camsı metaller şekil değişim yumuşaması adı verilen bir olaya sebep olur. Bu olay şekil değiştirme arttıkça malzemenin yumuşaması ve düşük gerilmelerde ve yüksek hızlarda şekil değiştirmesini mümkün kılar. Bu durum kristal yapıya sahip malzemelerde tam tersidir, şekil değişimi arttıkça malzeme pekleşir ve malzemeye şekil değiştirmek zorlaşır. Şekil değiştirme yumuşaması kayma bandı oluşumu ve lokalleşmesinin doğrudan bir sonucu olarak görülmektedir.

Şekil değiştirme yumuşaması ve kayma bantlarının oluşumu camsı metallerde amorf yapının viskozitesinin bölgesel olarak düşmesine sebep olur. Bu olayın sebebi olarak bir çok neden öne sürülmüştür. Bunlardan bazıları ; şekil değişimi sebepli serbest hacim oluşması, kayma dönüşüm bölgelerinin oluşması, kayma dönüşüm bölgelerinin oluşması nedeniyle iç gerilmelerin yeniden dağılımı ve bölgesel ısınmadır.

Kayma bantlarının oluşumuyla homojen olmayan deformasyonun sebepleri iki hipotez altında toplanmıştır. Bunlardan ilki serbest hacimin oluşması sebebiyle kayma bantlarındaki viskozitenin düşmesini önermektedir. Bu durum amorf yapının yoğunluğunu düşürerek deformasyona olan direncini azaltmaktadır. Bu hipotezle ilgili olarak Spaepen[41], Argon [42] ve Steif ve arkadaşları [43] çalışmalar yapmışlardır.

İkinci hipotez ise kayma bantlarındaki bölgesel adyabatik ısınmanın camsı metalin viskozitesini azalttığını önermektedir [44]. Bu adyabatik ısınma alaşımın sıcaklığının camsı geçiş sıcaklığının üzerine hatta erime sıcaklığının üzerine çıkardığı belirtilmektedir. Her iki durum içinde deneysel kanıt serbest hacim artışı ve deformasyon sırasında kayma bantlarındaki sıcaklık artışıdır.

Kayma bantları oluşup büyüdüğünde, gerilme-şekil değiştirme eğrisinde ani bir düşüş görülür. Bu işlem tekrarlandığında tırtıllı (serrated) akış görülür. Deformasyon sırasında kayma bandındaki serbest hacmin artması yoğunluğu ve deformasyona karşı direnci azaltmıştır. Benzer davranış Şekil 2.9'daki $Zr_{40}Ti_{14}Ni_{10}Cu_{12}Be_{24}$ kalın camsı metal alaşımının 1×10^{-4} s^{-1} şekil değişim hızında gerçekleştirilen basma deneyi sonrası çizilen gerilme – şekil değiştirme eğrisinde görülmektedir.



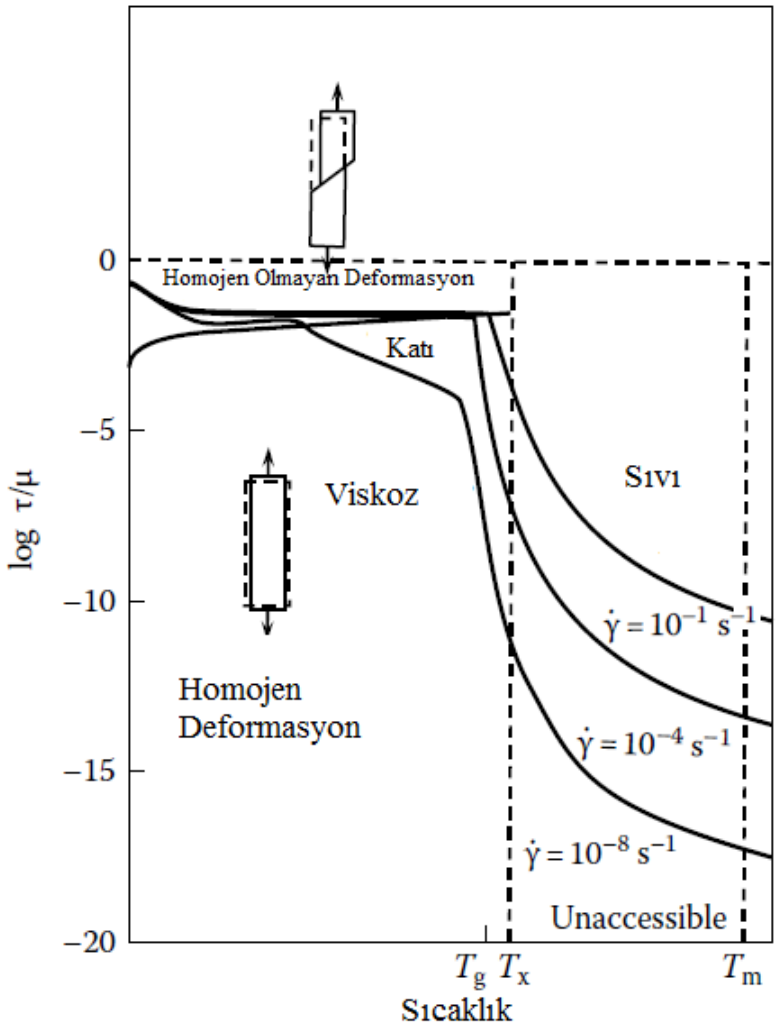
Şekil 2.9 : $Zr_{40}Ti_{14}Ni_{10}Cu_{12}Be_{24}$ kalın camsı metal alaşımının 1×10^{-4} s^{-1}şekil değişim hızında gerçekleştirilen basma deneyi [45].

2.3.2 Homojen deformasyon

Kalın camsı metallerde homojen deformasyon yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir, örneğin $0.7T_g$ sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklar. Bu deformasyon aşırı soğutulmuş sıvının viskoz akışı olarak değerlendirilebilir. Bu sıcaklık rejiminde çalışılarak camsı metallere son şeklini vermek mümkündür [46-49]. Homojen ve homojen olmayan deformasyon arasındaki geçiş sıcaklıklığı gevrek – sünek geçiş sıcaklığı olarak düşünülebilir ve önemli ölçüde uygulanan şekil değişimi hızına bağlıdır.

Pek çok farklı gerilme, şekil değiştirme hızları, farklı alaşım sistemleri ve camsı geçiş sıcaklığına yakın farklı sıcaklıklarda yapılan deneyler, yüksek sıcaklık ve düşük gerilmelerde akışın Newtonian ve şekil değiştirme hızının gerilme ile orantılı olduğunu göstermiştir. Ancak uygulanan gerilmenin arttırılması, deformasyonun gerilmeye hassaslığını azaltarak akışı Newtonian olmayan hale getirmektedir. Camsı metallerin homojen deformasyonu Argonun önerdiği STZ konseptiyle anlanabilir [50]. STZ yakın komşu atomların oluşturduğu serbest hacimsel kümelerin oluşturduğu bir basit kayma birimidir. Atomik boyuttaki bu STZ'ler uygulanan gerilme altında birlikte şekil değiştirerek makroskopik bir kayma deformasyonu oluştururlar. Ancak STZ'ler kristal malzemelerdeki dislokasyonlar gibi camsı metallerdeki bir yapısal kusur değildir. Aksine STZ camsı metale dahil olmayan bir serbest hacim olarak tanımlanır.Homojen ve homojen olmayan deformasyon konseptlerine göre Spaepen kalın camsı metaller için emprik deformasyon haritasını

çıkarmıştır. Ayrıca homojen ve homojen olmayan akışların sınırlarını hesaplamıştır [51]. Şekil 2.10'da kalın camsı metallerin farklı deformasyon tiplerini içeren deformasyon haritası görülmektedir.



Şekil 2.10 : Kalın camsı metallerin deformasyon haritası [51].

Kayma gerilmesi Y-ekseninde logaritmik olarak, sıcaklık ise X-ekseninde çizdirilmiştir. T_x sıcaklığı kristallenmenin başladığı , T_m ise kalın camsı metalin eridiği sıcaklığı göstermektedir. T_x ve T_m arası sıcaklık bölgesi T_x sıcaklığında kalın camsı metal kristalleştiği için mekanik ölçümler için erişilemez bir bölgedir. Ancak şekil değiştirme hızı çizgileri mantıklı ekstrapolasyonlar ile bu bölgeye uzatılmıştır. Deneysel gözlemlere dayanarak elde edilen deformasyon haritası, homojen deformasyonun düşük gerilme ve yüksek sıcaklıklarda olduğunu ve gerilmenin şekil değişimine çok bağlı olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan homojen olmayan

şekil değişimi yüksek gerilme seviyelerinde ve düşük sıcaklıklarda oluştuğu ve gerilmenin şekil değişimine bağlı olmadığı görülmektedir.

2.3.3 Dayanım

Kalın camsı metallerin en önemli özelliklerinden bir sahip oldukları yüksek dayanımdır, çoğu zaman dayanımları 1GPa üzerindedir. Kalın camsı metaller 5Gpa'a varan çok yüksek akma dayanımlarına sahiptir ancak genellikle akma noktasındaki şekil değişimi yaklaşık % 2 dir. Plastik şekil değişimi gerçekte sıfır olduğu için kalın camsı metallerin zayıf noktası sünek olmamalarıdır. Ancak bir takım takviye malzemeler ve farklı alaşım metalleri ile sünekliği arttırmak mümkündür.

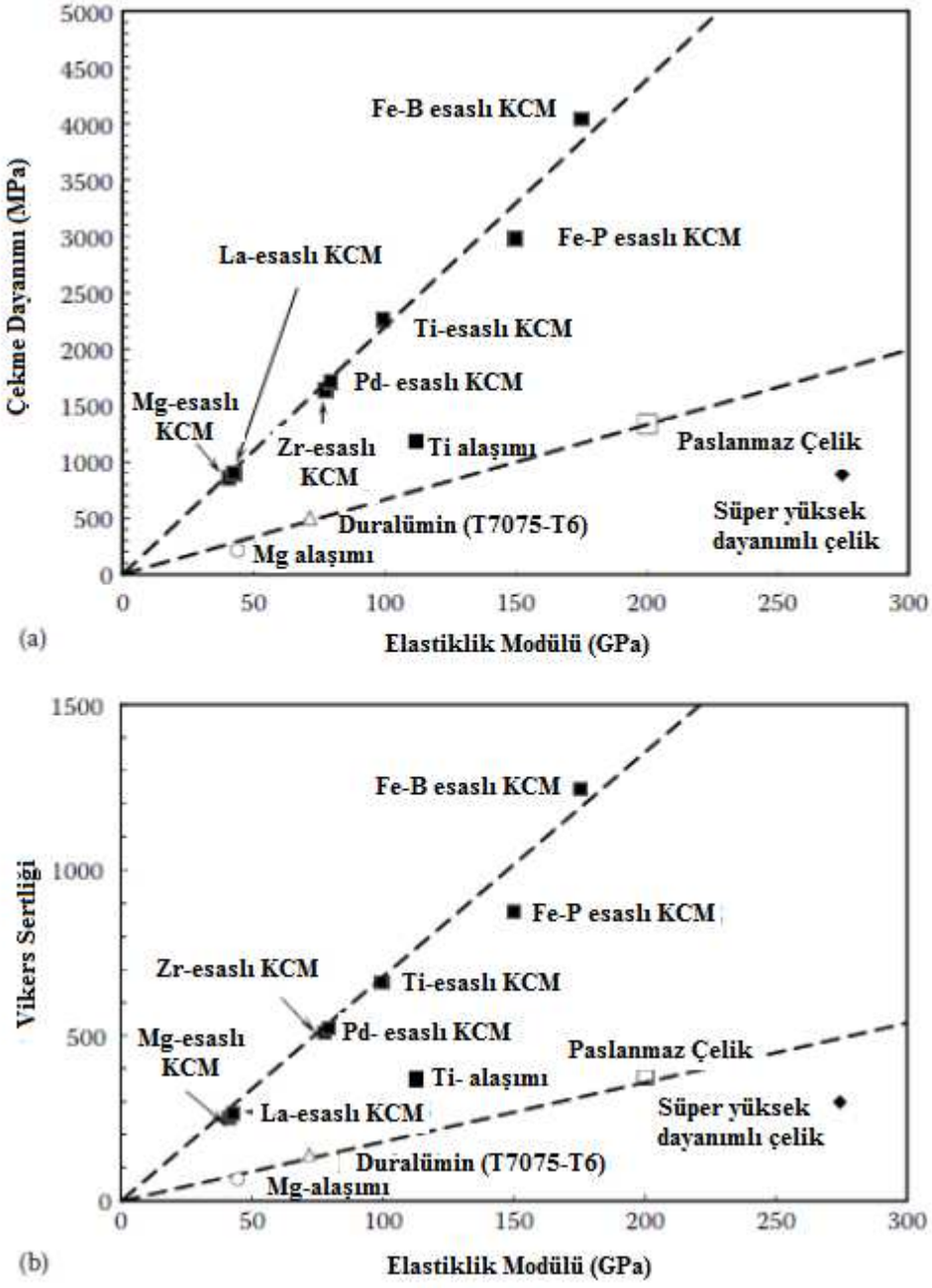
2.3.4 Süneklik

Kalın camsı metallerin sahip olduğu yüksek dayanım beraberinde gevrek olmaları sonucunu doğurmuştur. Bazı kalın camsı metaller düşük miktarda plastik deformasyon göstermesine rağmen, büyük bir kısmı akma sonrası hasara uğramaktadır. Bunun başlıca nedeni kalın camsı metallerin genellikle pekleşme özelliğine sahip olmamasıdır. Süneklik biraz belirsiz bir kavramdır ancak süneklik malzemenin kopana kadar gösterdiği plastik şekil değişimi olarak tanımlanırsa ve bu şekil değişiminin nerede olduğunun bir önemi yoksa kalın camsı metaller sünek olarak tanımlanabilir çünkü deformasyonun çoğu kayma bantlarında plastik şekil değişimi şeklindedir. Ancak kalın camsı metaller makroskopik olarak sünek bir davranış göstermezler.

Kalın camsı metallerin kayma bantlarında gösterdiği plastik şekil değişimi camsı metallerin sünek olarak tanımlanması için yeterli değildir. Kalın camsı metaller çekmede çok gevrektir ve kopana kadar neredeyse hiç plastik şekil değişimi göstermezler. Ancak kalın camsı metallere basma testi yapıldığında parça hasara uğrayana kadar bir miktar plastik şekil değişimi gösterirler. Bu farklılık kayma bantlarının sayısının artmasıyla açıklanır. Çekme testinde ilk kayma bandının oluşmasından sonra çatlak başlangıcı oluşur ve sonuç olarak kalın camsı metal plastik şekil değişimine uğramadan hasara uğrar. Ancak basmaya zorlanan numunelerde ise bir çok kayma bandının oluşmasıyla parça hasara uğramadan plastik şekil değiştirir.

Kalın camsı metallerde bu süneklik probleminin önüne geçmenin yolu kalın camsı metal matrisine kompozit malzeme oluşturmak için kristal bir faz eklenmesidir.

Şekil 2.11'de farklı kalın camsı metallerin elastik modülünün sertlik ve çekme dayanımı ile ilişkisi görülebilir.



Şekil 2.11 : Farklı kalın camsı metallerin elastiklik modülünün, sertlik ve çekme dayanımı ile ilişkisi [52].

2.3.5 Yorulma dayanımı

Yorulma dinamik ve değişken gerilmelere maruz kalan yapılarda meydana gelen hasardır. Yorulma hasarları tekrarlı gerilmelere maruz kalan farklı metal ve polimer

malzemelerde görülmektedir. Yorulma hasarı beklenmeden aniden gerçekleşir. Yorulma hasarına bağlı çok küçük bir plastik şekil değişimi gerçekleşir bu nedenle hasar gevrek olarak tanımlanabilir.

Yorulma hasarı çatlakların oluşumu ile başlar, çatlak büyümesi ile ilerler ve hızlı bir hasar ile sonlanır [53]. Literatürde kalın camsı metallerin yorulma davranışı ile ilgili çalışmalar genellikle Zr esaslı alaşımlara yoğunlaşmıştır. Kalın camsı metallerin yapısal malzemeler olarak kullanılabilmesi için yorulma davranışının incelenmesi ve değişken yükler altında nasıl davrandığının belirlenmesi önemlidir. Kalın camsı metal malzemeler sahip oldukları yüksek dayanımdan dolayı, kristal malzemelerdeki gibi yüksek dayanıma sahip olanların yorulma dayanımı daha yüksektir genellemesine uygun değildir. Yapılan çalışmalar yorulma çatlaklarının büyümesinin kristal malzemeler ile benzer olduğunu göstermiştir. Kalın camsı metaller kristal yapıya sahip olmadığından tane sınırlarına ve kayma düzlemlerine sahip değildir. Bu nedenle yorulma çatlak başlangıçlarının gözlemlenmesi oldukça zordur.

2.4 Kalın Camsı Metallerin Uygulamaları

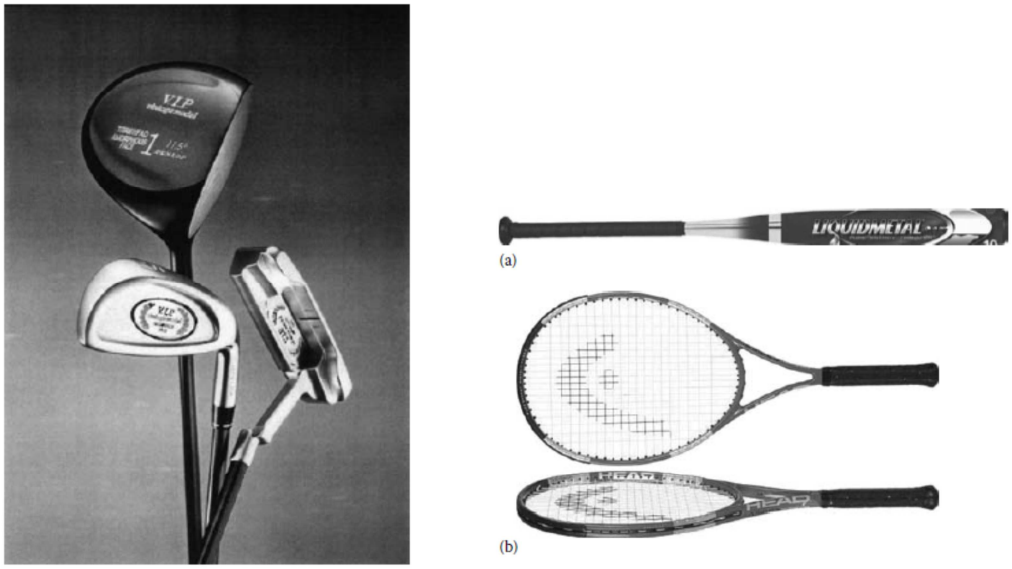
Kalın camsı metaller kristalleşme davranışı, fiziksel, kimyasal, manyetik özellikleri ve farklı malzeme özelliği kombinasyonlarından dolayı çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Camsı metaller yüksek dayanım, yüksek elastik uzama limiti, yüksek sertlik, çok iyi korozyon dayanımı ve iyi manyetik özellikleri bir arada sunmaktadır.

Kalın camsı metaller sahip oldukları yüksek akma dayanımı ve kristal metallerin iki katına yakın %2'ye yakın elastik uzama limitinden dolayı golf sopaları, beyzbol sopaları ve tenis raketlerinde kullanılmaktadır (Şekil 2.12).

Camsı metallerin mükemmel kalıp doldurma özelliklerinden dolayı oldukça küçük parçaların kalın camsı metal alaşımları kullanılarak üretilmesi mümkündür. Şekil 2.13'te kalın camsı metalden üretilmil mikro dişli ve spiral yay görülebilir.

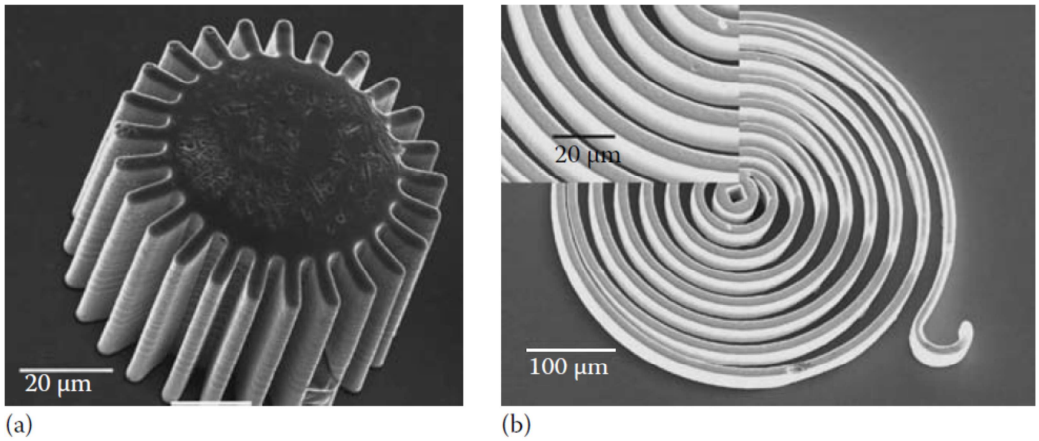
Kalın camsı metallerin mekanik özellikleri yay malzemeleri için çok uygundur. Yüksek akma dayanımına ve yüksek elastik şekil değiştirme limitine sahip olmaları rezilyanslarının yüksek olmasını sağlamaktadır.

Kalın camsı metallerin mekanik özellikleri yay malzemeleri için çok uygundur. Yüksek akma dayanımına ve yüksek elastik şekil değiştirme limitine sahip olmaları rezilyanslarının yüksek olmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.12 : Camsı metalden üretilen golf,beyzbol sopaları ve tenis raketleri [23].

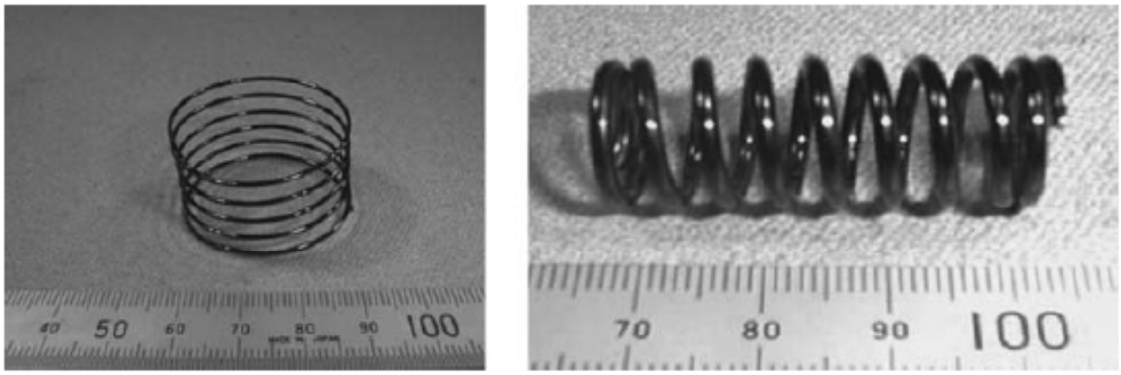
Kalın camsı metallerin mekanik özellikleri yay malzemeleri için çok uygundur. Yüksek akma dayanımına ve yüksek elastik şekil değiştirme limitine sahip olmaları rezilyanslarının yüksek olmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.13 : Camsı metalden üretilen (a) mikro dişli ve (b) spiral yay [23].

Kalın camsı metallerin mekanik özellikleri yay malzemeleri için çok uygundur. Yüksek akma dayanımına ve yüksek elastik şekil değiştirme limitine sahip olmaları rezilyanslarının yüksek olmasını sağlamaktadır. Yüksek dayanım ve düşük elastiklik modülünün bir arada olması yaylarının boyunun kısa olmasını ve tel çaplarının küçük

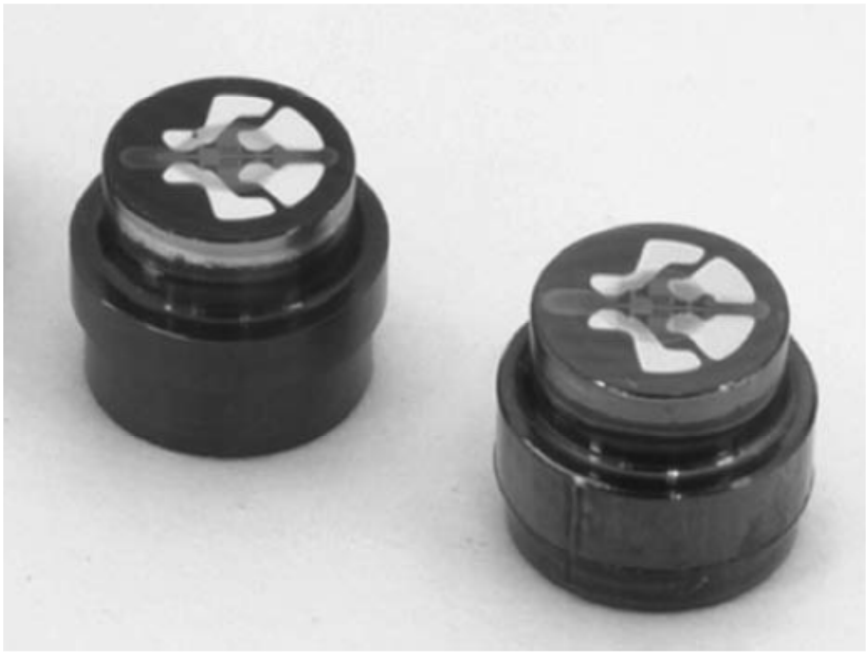
olmasını sağlamaktadır. Böylelikle silindir kafası uzunluğu kısaltılarak araç ağırlığı azaltmak mümkün olabilmektedir. Si-Cr çeliği standart yay çelikleri Zr veya Ti bazlı kalın camsı metallerle değiştirildiğinde 4kg'lık bir ağırlık azaltılması mümkün olabilmektedir. Şekil 2.14'te $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$ kalın camsı metal alaşımından üretilmiş helisel yaylar görülebilir [23].



(a) (b)

Şekil 2.14 : Camsı metalden üretilen yaylar a) 1 mm çaplı b) 2 mm çaplı [23].

Gerinim ölçerli metal – diyafram tipindeki basınç sensörleri endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Basınç sensörleri transdüser olarak davranarak diyaframdaki şekil değişimi strain gage ile ölçülerek basınca dönüştürülmektedir. Şekil değişimimdeki hassasiyet ölçüm hassasiyetini doğrudan etkilediği için düşük elastiklik modülüne sahip malzemelerin diyaframlarda kullanılması daha hassas sensörşlerin üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bu nedenle daha hassas sensörlerin üretilebilmesi için düşük elastiklik modülüne ve yüksek dayanıma sahip malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Zr ve Ni tabanlı kalın camsı metaller bu tür uygulamalar için oldukça uygundur. Paslanmaz çeliğin (SUS 630) akma dayanımı ve elastiklik modlülü sırasıyla 1200 MPa ve 200GPa iken Zr ve Ni esaslı kalın camsı metallerin 2000MPa ve 100 GPa ve 2700MPa ve 135 GPa'dır. Zr esaslı kalın camsı metalin yüksek hassas diyafram, Ni esaslı kalın camsı metalin ise yüksek basınca dayanıklı diyaframlar için kullanılması uygundur. Diğer bir deyişle Zr- esaslı kalın camsı metalin elastiklik modülü paslanmaz çeliğin yarısı kadar olduğu için, basitçe sensörün hassasiyetinin iki katına çıkacağı söylenebilir. Şekil 2.15'de Zr esaslı kalın camsı metalden üretilmiş basınç sensörü diyaframları görülebilir.



Şekil 2.15 : Zr esaslı kalın camsı metallden üretilen basınç sensörü diyaframı [23].

3. TAŞLAMA

3.1 TaşlamanınTarihçesi

Taşlama imalat yöntemi olarak 100 yılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır. İlk kullanıldığı dönemler neolitik döneme denk gelmektedir. Taşlama yüksek hızda dönen taş ile iş parçasının ilerlemesi sonucu gerçekleştirilen bir talaşlı imalat yöntemidir. Taşlama genellikle tornalama, frezeleme, planyalama veya vargelleme işleminden sonra imalat ve yüzey kalitelerini arttırmak için uygulanan nihai bir işlemdir. Ancak bazı hallerde tek başına işlem olarak da kullanılmaktadır.

Zaman içerisinde daha yüksek taş hızlarının mümkün olması talaş kaldırma hızlarını arttırmıştır. Taş hızları geçen yüzyılda 2 ile 10 kat hızlanmıştır. Bu hızlanmanın temelinde yeni aşındırıcıların geliştirilmesi yatmaktadır. Yeni geliştirilen bu taşlara kübik boron nitrür (CBN) ve elmas aşındırıcılar örnek olarak verilebilir.

Taşlama hızlarının artmasının bir diğer sebebi olarak taşlama sıvıları verilebilir. Yeni taşlama sıvılarının, püskürtme sistemlerinin ve yeni katkıların geliştirilmesi taşlama hızlarıyla birlikte parçanın yüzey bütünlüğünün iyileştirilmesini sağlamıştır.

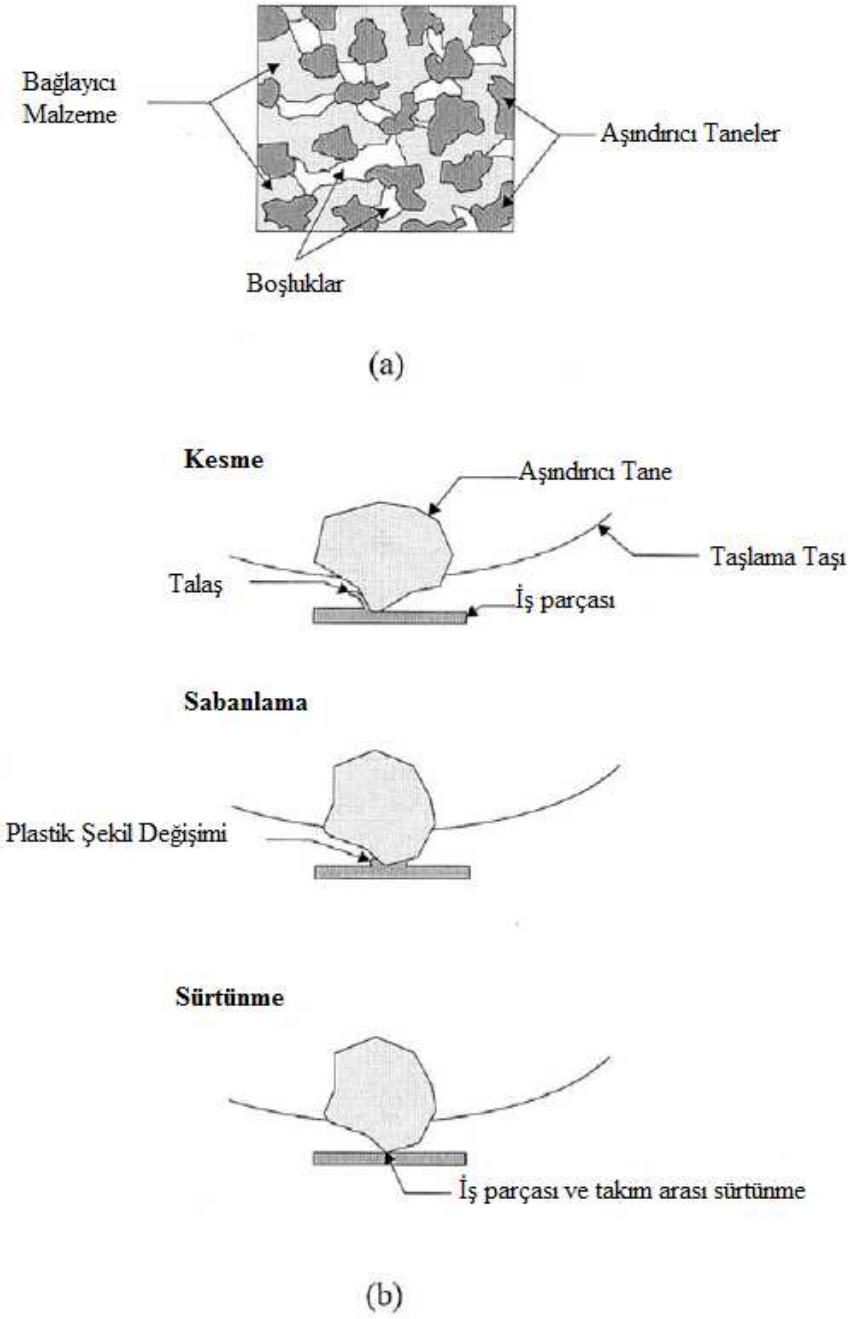
Taşlama tamamen sorunsuz bir talaşlı imalat yöntemi değildir. Taşlama kaynaklı problemler ısıl hasar, pürüzlü yüzeyler, titreşimler, hızlı taş aşınmaları ve kalıntı gerilmeler olarak söylenebilir. Bu tür problemlerin önüne geçebilmek için taşlamayı etkileyen işlem parametrelerinin iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

Taşlama işlermi başlıca 3 amaçla kullanılmaktadır:

- Yüksek doğruluğun gerekli olduğu parçaların imalatında
- Yüksek talaş kaldırma hızlarının gerekli olduğu durumlarda
- Çok sert malzemelerin işlenmesinde

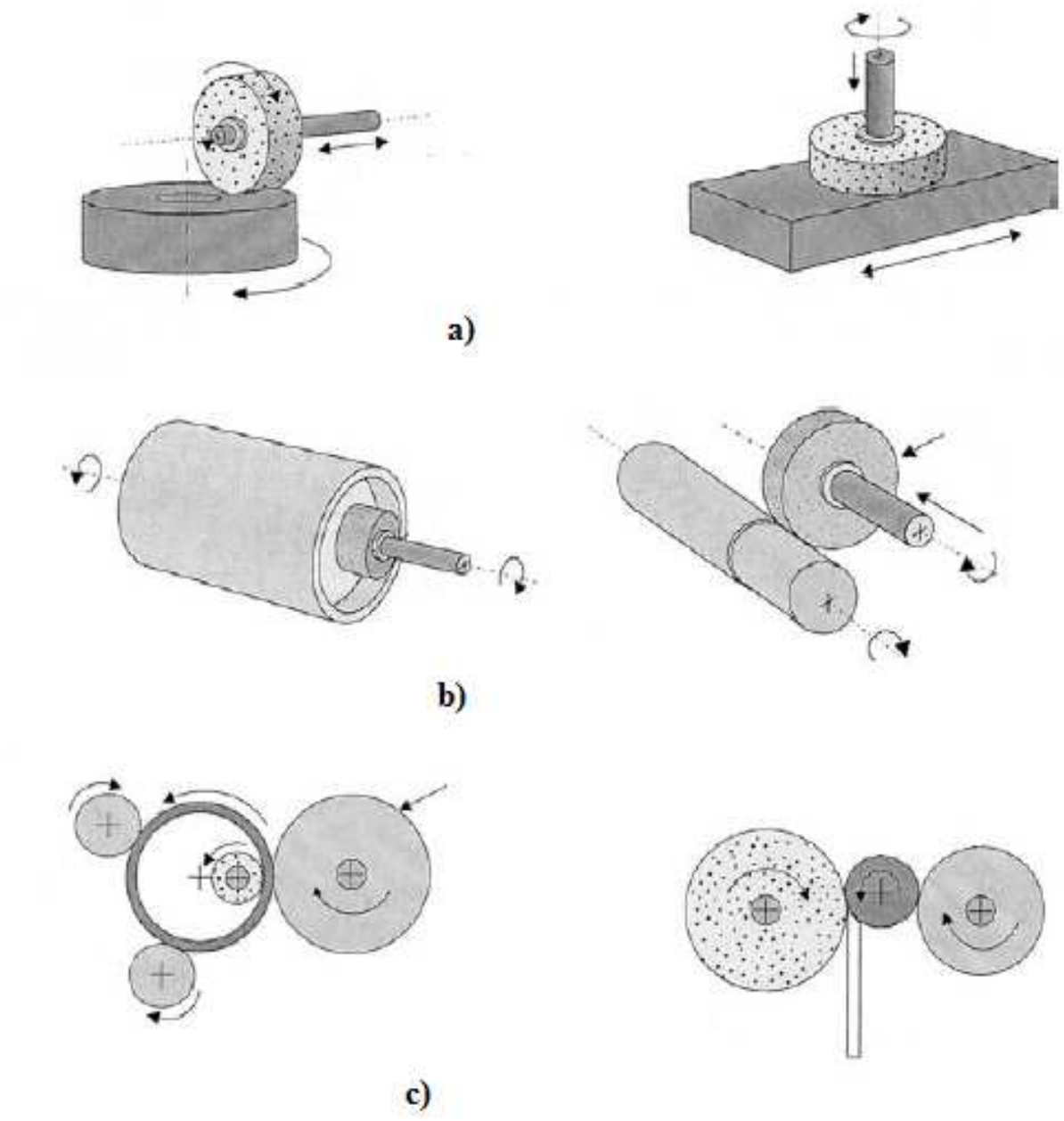
3.2 Taşlama Yöntemleri

Taşlama taşı bağlayıcı ile birbirine bağlanmış aşındırıcı tanelerinden meydana gelir. Bu aşındırıcı taneler düzensiz şekillerde ve matris içinde rastgele dağıldığı için aşındırıcı taneler ve iş parçası arasında üç farklı etkileşim meydana gelir. Bunlar kesme, sabanlama ve sürtünmedir.Bu üç etkileşimden sadece kesme talaş kaldırırken sabanlama sadece yüzeyde plastik deformasyona sebep olur. Bu üç etkileşim Şekil 3.1'de görülebilir.



Şekil 3.1 : a) Taşlama taşı b) talaş kaldırma mekanizmaları.

Üç ana taşlama yöntemi vardır bunlar Şekil 3.2'de görüldüğü gibi yüzey, silindirik ve puntasız taşlamadır. Yüzey taşlama yöntemi düz yüzeylerin taşlanmasında kullanılır. İşlem parametreleri ilerleme hızı, kesme hızı ve pasodur. İş parçasının bağlı olduğu tablo lineer veya dairesel hareket edebilir. Silindirik taşlama ise silindirik silindirik parçaların iç veya dış yüzeylerinin taşlanmasında kullanılır. Puntasız taşlama ise yine silindirik parçaların iç ve dış yüzeylerinin işlenmesinde kullanılır ancak tek farkı iş parçasının bağlanma gereksiniminin olmamasıdır.



Şekil 3.2 : Taşlama yöntemleri a) yüzey b) silindrik c) puntasız.

3.3 Taşlama Taşları

Taşlama taşları bağlayıcılı aşındırıcı takımlar arasında yer alır. Bu takımlar kesme işlemini yapan aşındırıcı tanecikleri bir arada tutan yumuşak bir bağlayıcı matris içerir. Bağlayıcı türü aşındırıcı taneciklerin arasındaki boşlukların gözenekli, bağlayıcıyla kısmen dolu ve bağlayıcıyla tamamen dolu şekilde olabilir. Bu takımların özellikleri ve performansı aşındırıcının malzemesine, tane büyüklüğüne, bağlayıcının malzemesine ve boşluk miktarına bağlıdır.

Çeşitli bağlayıcı malzemesi ve bileşiminden dolayı çok geniş bir boyut aralığında ve farklı tipte taneden oluşan taşlama taşları üretilebilmektedir. Yaygın kullanılan taşlar silisyum karbür veya aluminyum oksit aşındırıcıların vitrifiye yada reçine bağlayıcılardan oluşur. Kübik bor nitrürlü (CBN) yada elmas taşlar ise reçine, vitrifiye ve metal bağlayıcılardan oluşmaktadırlar. Geleneksel aşındırıcılı taşlarda oluşan kompozit yapı taşın tamamını oluşturmakta iken, CBN gibi süper aşındırıcılı taşlarda ise maliyeti azaltmak için aşındırıcı yapının miktarı metal veya plastik bir göbek kullanılarak azaltılmaktadır.

3.3.1 Taşların yapısal özellikleri

Aşındırıcı malzeme, bağlayıcı ve boşluk miktarı taşların sertliğini ve yapısını değiştirmektedir. Taşın sertliği ile aşındırıcı sertliği aynı anlama gelmemektedir. Taşın sertliği taşlama süresince aşındırıcı taneciklerin taş bünyesinde tutulabilme derecesini ifade etmektedir. Bağlayıcı miktarı arttırılarak boşluğun azaltılması sertliği arttırmaktadır. Taşlama işlemi için taş sertliği taneciklerin aşından kopmasını engelleyecek kadar sert, körelen tanecikleri tutmayacak kadar yumuşak seçilmesi gerekmektedir. Taş sertliği işlenen parçanın yüzey kalitesini etkileyen önemli bir parametredir. Taşların sertliği harf ile gösterilir ve Z'ye doğru gittikçe taşın sertliği giderek artmaktadır.

Süper aşındırıcılarda da taş sertliği bağlayıcının dayanımını ve sertliğini bağıl olarak belirler. Ancak süper aşındırıcılı taşlar reçine ve metal bağlayıcılı olduğu için gerçekte boşluksuz olarak üretilirler ve taşın sertliği bağlayıcı malzemesi değiştirilerek sağlanmaktadır.

Taşların işaretlenmesi için kullanılan yapı numarası aşındırıcı tanelerin hacimsel olarak taş içindeki miktarını göstermektedir. Yükselen numaralar taş içindeki aşındırıcı miktarının az olduğunu göstermektedir.

Süper aşındırıcılılı taşlarda geleneksel taşlardan farklı olarak "konsantrasyon" terimi kullanılmaktadır. 4.4 karat/cm^3 aşındıcı içeren bir taşın konsantrasyonu 100 olarak kabul edilerek, farklı taşlar için konsantrasyon hesaplanır. Elmas aşındırıcılar için geliştirilen bu ölçeğin konsantrasyon numarası dörde bölündüğünde hacimsel olarak taşın içindeki elmas miktarı hesaplanır. Reçine ve metal bağlayıcı içeren süper aşındırıcıların konsantrasyon değerleri 50 ile 150 arasında değişir bu konsantrasyon değerleride elmas için hacimsel olarak sırasıyla %12.5 ile %37.5' e karşılık gelmektedir.

3.3.2 Aşındırıcı tane malzemesi

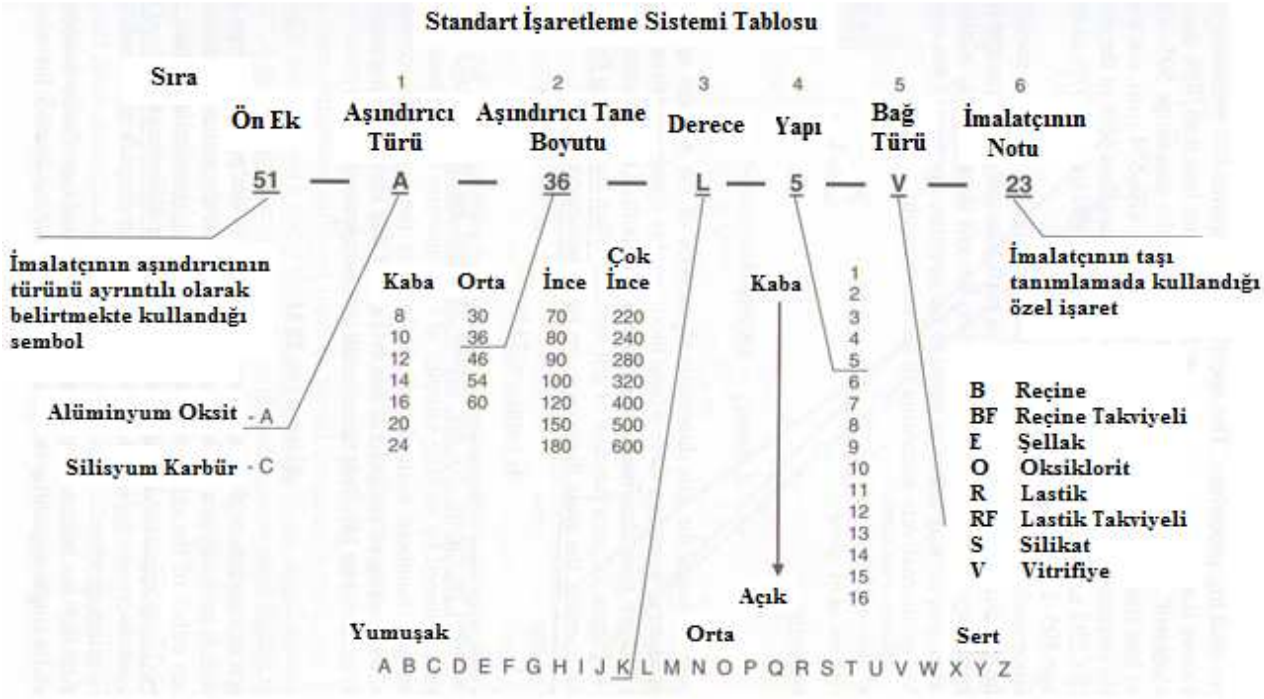
Aşındırıcı tane malzemeleri geleneksel aşındırıcılar ve süper aşındırıcılar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

3.3.2.1 Geleneksel aşındırıcılar

Geleneksel aşındırıcılar alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum karbür (SiC) olmak üzere ikiye ayrılır. Geleneksel aşındırıcılardan Al_2O_3 granüler özelliklerini ve taşlama davranışlarını etkileyen farklı tiplerde üretilebilirken, SiC iki farklı tipte üretilebilmektedir. Farklı taşlama işlemleri için bu farklı özellikteki aşındırıcılar kullanılabilmektedir. Taşlama da tanecik seçimi yapılırken genel özellikler tokluk, sertlik ve kırılganlıktır. Tokluk darbeli taşlama için uygundur. Yüksek kırılganlıktaki taneler ise sürekli kırılıp yeni keskin köşelerin oluşmasına sebep oldukları için sadece hassas taşlama işlemlerinde kullanılmaktadır. Sert tanelerde diğer tanelere göre daha kırılgandır.

Sertlik, kırılganlık ve tokluk dışında aşındırıcı seçilirken taş ve aşındırıcı arasındaki kimyasal etkileşimde seçim kriterlerinden biridir. Örneğin SiC dökme demirler hariç çelikler, Ni ve Ti içeren C ilgisi yüksek malzemelerin taşlanmasında kullanılmamaktadır. Ayrıca paslanmaz çeliklerin taşlanmasında paslanmaz çeliklerin yüzeyinde meydana gelen krom oksitlerin aluminyum oksit ile etkileşmesinden dolayı paslanmaz çeliklerin taşlanmasında Al_2O_3 kullanılmamaktadır [54].

Geleneksel aşındırıcılı taşların standart işaretleme sisteminin tablosu Şekil 3.3'te görülebilir. Buradaki A veya C sembolü aşındırıcı malzemesinin alüminyum oksit (A) veya silisyum karbür (C) olduğunu göstermektedir. Aşındırı tane boyutu ise kaba, orta, ince ve çok ince olmak üzere dört sınıfa ayrılmıştır. Her bir sınıf belirli rakamlar ile ifade edilmektedir. Derece ise taşların sertliğini göstermektedir ve A dan Z'ye doğru gidildikçe taşların sertliği artar.Taşların işaretlenmesi için kullanılan yapı numarası aşındırıcı tanelerin hacimsel olarak taş içindeki miktarını göstermektedir. Yükselen numaralar taş içindeki aşındırıcı miktarının az olduğunu göstermektedir. Bağlayıcı malzemesi de bir harf ile ifade edilmektedir. Bağlayıcı ile ilgili ilave bir açıklama verilmek istenirse, ilave bir notasyonda kullanılabilmektedir.



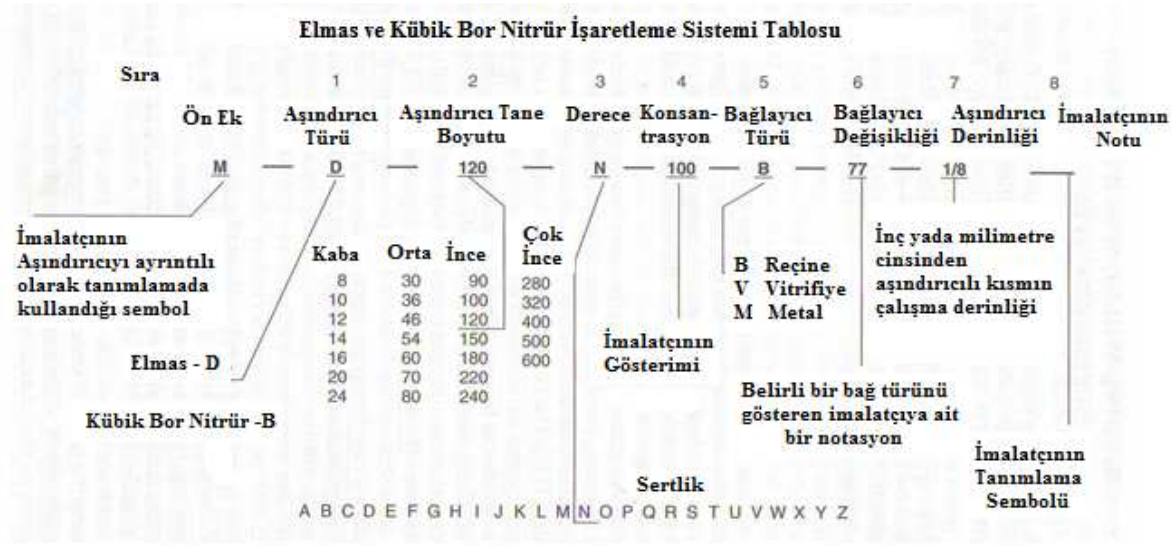
Şekil 3.3 : Geleneksel aşındırıcılı taşların işaretleme sistemi [1].

3.3.2.2 Süper aşındırıcılar

Süper aşındırıcılar elmas ve kübik boron nitrür (CBN)'den oluşmaktadır. Elmas hem doğal hemde yapay olarak elde edilebilir ancak taşlamada yapay elmas kullanılmaktadır. CBN ise yapay olarak elde edilmektedir.Elmas aşındırıcı taneler atmosferden korunmak ve bağlayıcı içinde tutunmayı arttırmak için nikel ile kaplanırlar.

Elmas çok yüksek sertliğe sahip olmasına rağmen karbona olan ilgisi ve yüksek sıcaklıklardaki kararsızlığından dolayı demir esaslı malzemelerin taşlanmasında kullanılmaz. CBN malzemenin yüksek sıcaklık kararlılığı ise elmastan çok daha iyidir [54].

Şekil 3.4'te görülebileceği gibi süper aşındırıcılar için farklı bir işaretleme sistemi vardır. Aşındırıcı tipinde D elması, B ise kübik boron nitrürü ifade etmektedir. Aşındırıcı tane boyutu kaba, orta, ince ve çok ince olmasını ifade eden rakamlar ile ifade edilmektedir. Süper aşındırıcılılı taşlarda geleneksel taşlardan farklı olarak "konsantrasyon" terimi kullanılmaktadır. 4.4 karat/cm3 aşındıcı içeren bir taşın konsantrasyonu 100 olarak kabul edilerek, farklı taşlar için konsantrasyon hesaplanır.



Şekil 3.4 : Süper aşındırıcılı taşların işaretleme sistemi [1].

Elmas aşındırıcılar için geliştirilen bu ölçeğin konsantrasyon numarası dörde bölündüğünde hacimsel olarak taşın içindeki elmas miktarı hesaplanır. Reçine ve metal bağlayıcı içeren süper aşındırıcıların konsantrasyon değerleri 50 ile 150 arasında değişir bu konsantrasyon değerleride elmas için hacimsel olarak sırasıyla %12.5 ile %37.5' e karşılık gelmektedir.

3.3.2.3 Bağlayıcı malzemeleri

Geleneksel aşındırıcılı taşlarda reçine, seramik, kauçuk, şellak, oksiklorid, silikat olmak üzere altı tip bağlayıcı malzemesi vardır. Geleneksel aşındırıcılı taşların çoğu seramik bağlayıcı kullanır. Çapak alma ve ağır çalışma şartlarında yüksek dayanımı

ve tokluğu nedeniyle bağlayıcı olarak reçine kullanılmaktadır. Kauçuk bağlayıcılar ise ince kesme taşlarında ve puntasız taşlamada ayar çarkı olarak kullanılmaktadır.

Süper aşındırıcılı taşlar ise metal, seramik ve reçine bağlayıcılar kullanmaktadır. Süper aşındırıcılarda en yaygın kullanılan bağlayıcı malzemesi reçinedir. Seramik bağlayıcılar ise genellikle CBN taşlarda kullanılmaktadır ve giderek yaygınlaşmaktadır. Metal bağlayıcılar ise sinterlenmiş bronzdan toz metalurjisi ile üretilmektedir.

3.4 Taşların Bilenmesi

Taşlama taşının yüzeyindeki aşındırıcı taneler parça ile etkileşim halinde olan mikro kesici takımlardır. Taş üzerindeki aşındırıcı tanelerin yapıları ve dağılımı taş topoğrafını meydana getirmektedir. Taş topoğrafı taşlama öncesinde ve sırasında periyodik olarak taşın hazırlanmasıyla oluşturulur. Taş hazırlama taşın düzeltilmesi ve bilenmesi işlemlerinden oluşur. Düzeltme işlemi taşın taşlama yüzeyinden malzeme kaldırılarak düşük salgı ile dönmesinin sağlanmasıdır. Bileme ise taşlama taşının istenen işleme performansını sağlayabilmesi için taşın yüzeyinin şekillendirilmesi işlemidir. Geleneksel aşındırıcılı taşlarda düzeltme ve bileme işlemleri tek bir işlemde gerçekleştirilirken, süper aşındırıcılı taşlarda bileme ve düzeltme işlemleri ayrı ayrı gerçekleştirilir [54].

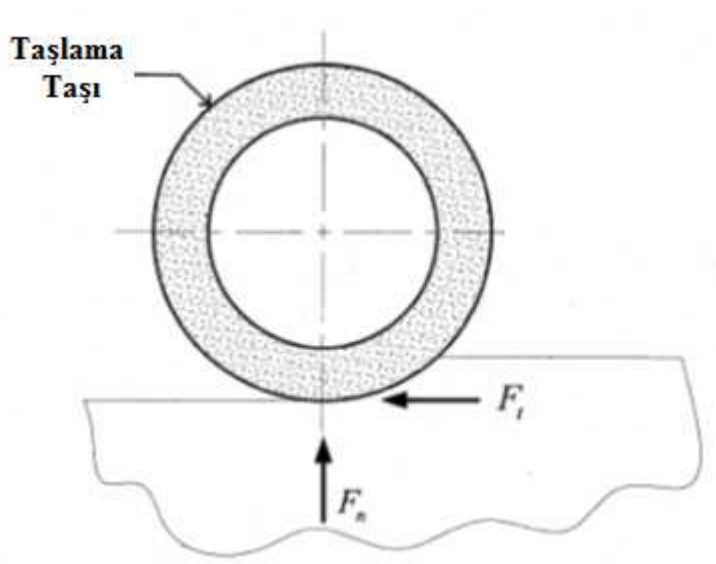
3.5 Taşlama Kuvvetleri, Güç ve Spesifik Enerji

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi taşlama taşı ve iş parçası arasında etkiyen iki kuvvet vardır bunlar F_t teğetsel kuvvet ve F_n normal kuvvettir.Teğetsel kuvvettaşlama taşının yüzeyine teğetsel, normal kuvvet ise dik olarak etkir. Taşlama gücü ise teğetsel kuvvet ile taş hızı ile çarpılarak şu şekilde yazılabilir:

$$P = F_t \times v_s \qquad \textbf{(3.1)}$$

Teğetsel ve normal kuvvetin oranına kuvvet oranı denir ve şu şekilde yazılabilir.

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \qquad \textbf{(3.2)}$$



Şekil 3.5 : Taşlamada kuvvet bileşenleri.

Taşlama işlemi çok yüksek enerji gerektirir ve bu enerjinin büyük bir kısmı taşlama bölgesine aktarılır. Taşlamada enerji genellikle kaldırılan birim talaş hacmi başına düşen enerji olarak tanımlanır ve buna spesifik enerji P_c adı verilir ve şu şekilde ifade edilir:

$$P_c = \frac{P}{Qw} \qquad \textbf{(3.3)}$$

Bu denklemde P taşlama gücünü, Q_w ise kaldırılan talaş hacmini ifade eder. Spesifik enerjinin birimi J/mm^3 tür. Spesifik enerji ile işlemenin verimi ters orantılıdır. Düşük spesifik enerji işleme verimini arttırır. Spesifik taşlama enerjisinin düşürülmesi için bazı faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Soğutma sıvısı kullanılmadan yapılan taşlama, sert iş parçalarının işlenmesi, yumuşak bağlayıcıya sahip taşlama taşlarının kullanılması spesifik enerjiyi arttırırken, soğutma sıvısı kullanılması, yumuşak iş parçalarının işlenmesi ve sert bağlayıcıya sahip taşların kullanılması spesifik enerjiyi azaltır.

3.6 Taşlamada Malzeme Kaldırma Mekanizmaları

3.6.1 Mikrosabanlama, talaş oluşumu ve kırılma

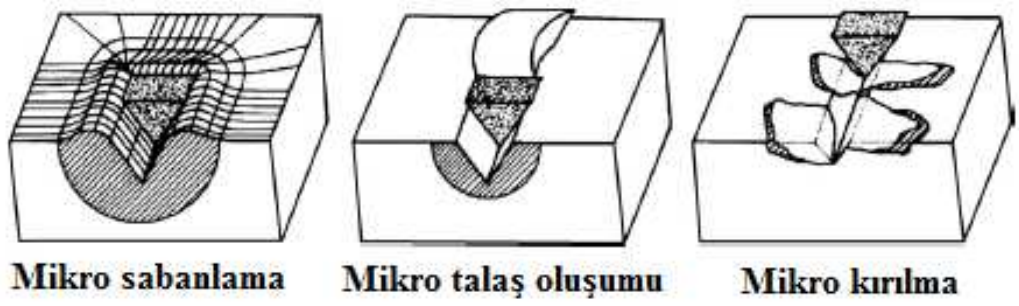
Taşlama taşının iş parçasına temas ettiği sıradaki malzeme kaldırma işlemi taş ile iş parçasının fiziksel özelliklerine bağlıdır. Malzeme kaldırma işlemindeki en temel

ayrım farklı mekanizmalara sahip; mikro sabanlama, mikro talaş kaldırma ve mikro kırılma olarak yapılabilir. Bu mekanizmalar Şekil 3.6'te görülebilir.

Mikro sabanlamada malzeme deformasyonuna sebep olan sürekli plastik veya elastoplastik şekil değişimi gerçekleşir. Gerçek uygulamalarda çok sayıdaki aşındırıcı parçacığın eş zamanlı olarak etkimesi malzeme hasarına sebep olur. İdeal mikro talaş oluşumuna sebep olur. Talaş hacmi izlerin hacmine eşittir. Mikro sabanlama ve mikro talaş oluşumu genellikle sünek malzemelerin işlenmesinde meydana gelir. Mikro sabanlama ve mikro kesme arasındaki ilişki taşlama parametrelerine ve kesme takımı geometrisine bağlıdır.

Mikro kırılma çatlak oluşumu ve yayılması ile oluşur. Kaldırılan talaşın hacmi izin hacminin birkaç katı büyüklüğünde olabilir. Mikro kırılma genellikle cam, seramik ve silikon gibi gevrek ve sert malzemelerin işlenmesinde görülür.

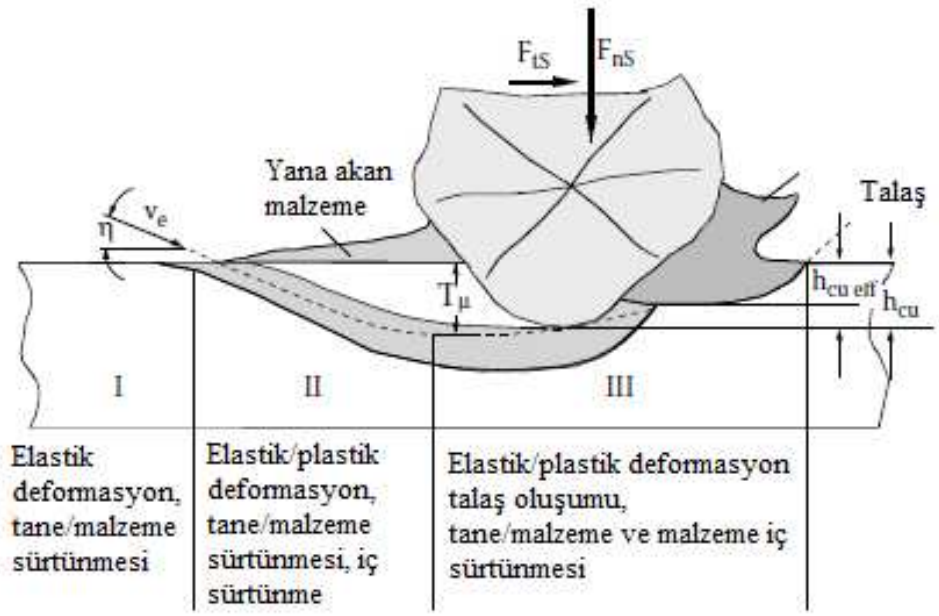
Yüzey oluşma mekanizmaları bu üç temel işlemden oluşsada mekanizmalar iş parçasının malzemesine bağlıdır.



Şekil 3.6 : İş parçası yüzeyi ve aşındırıcı taneler arası fiziksel etkileşim [54].

3.6.2 Sünek malzemelerin taşlanması

Taşlama sırasında tanelerin kesici uçları iş parçasının yüzeyinde düz bir yol üzerinde temas ettiği için çok kısa elastik şekil değişimi sonrası iş parçası plastik şekil değiştirir. Taşın kesme kenarı ve iş parçası arasındaki açı kesme ucu yuvarlatmasından dolayı çok küçük olduğu için ilk temasta talaş oluşmaz. İş parçası malzemesi yana itilir, birikinti oluşturur ve kesme kenarının serbest yüzeyine doğru akar. Sünek malzemelerin taşlanması sırasındaki talaş oluşumu Şekil 3.7'de görülebilir.



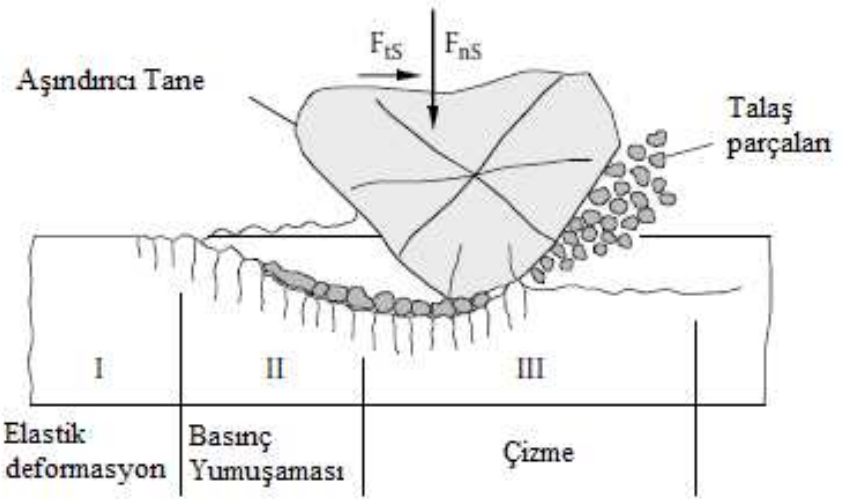
Şekil 3.7 : Sünek malzemelerin işlenmesinde malzeme kaldırma işlemi [54].

Kaldırılmamış talaş kalınlığı kritik kesme derinliğine eşit olduğunda gerçek talaş oluşumu başlar. İşlemin devamında talaş oluşumu ve yer değiştirme işlemleri aynı anda gerçekletiğinden dolayı kaldırılmamış talaş kalınlığının ne kadarının talaş olarak kaldırıldığı ve etkin talaş kalınlığının miktarı taşlama verimliliği açısından önemlidir.

3.6.3 Gevrek malzemelerin taşlanması

Düşük sünekliklerine rağmen gevrek malzemelerin taşlanması sırasında gevrek kırılmalar gerçekleşirken elastoplastik şekil değişimleri meydana gelir. Gevrek kırılma ile meydana gelen malzeme kaldırılması mikro kırıkların oluşmasına bağlıdır.Sert-gevrek malzemelerin taşlama sırasındaki sünek davranışı kritik gerilme tarafından belirlenen limit talaş kalınlığının altında, dönüşen enerji malzemeyi plastik şekil değiştirmeye ve çatlak oluşturmaya yeterli olmaması ile açıklanabilir. Gevrek malzemelerin taşlanması sırasındaki talaş oluşumu Şekil 3.8'de görülebilir.

Plastik şekil değişimlerinin oluşumundan sadece kaldırılmamış talaş kalınlığı tarafından tanımlanan gerilme miktarı sorumlu değildir, ayrıca kesici ucun altında oluşan hidrostatik basma gerilmeside plastik şekil değişimlerinin oluşmasını sağlar. Büyük kesme ucu yuvarlatmaları plastik şekil değişimini arttırır. Bunun sonucu olarak kesme ucu altında oluşan Hertz temas gerilmeleri çatlak oluşumuna neden olur.



Şekil 3.8 : Gevrek malzemelerin işlenmesinde malzeme kaldırma işlemi [54].

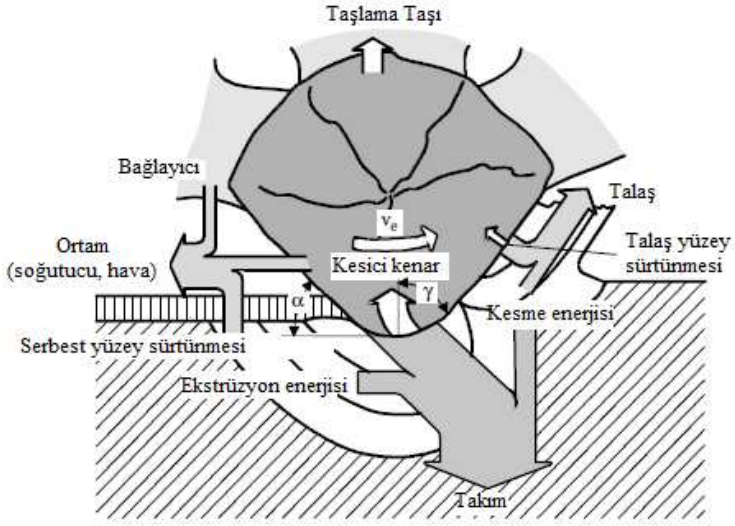
3.7 Taşlamanın Isıl Etkileri

Taşlamada talaş kaldırma miktarı geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla oldukça düşük olmasına rağmen talaş kaldırılan hacim başına harcanan enerji tornalama ve frezelemeye kıyasla çok yüksektir. Bu durum taşlama bölgesinde yüksek sıcaklıkların oluşmasına sebep olmaktadır. Yüksek sıcaklıklar çeşitli ısıl hasarlara sebep olabilmektedirler bu hasarlar iş parçasının fiziksel ve kimyasal özelliklerinde bozulmalara sebep olmaktadır. Yanma taşlamanın sebep olabileceği tipik ısıl hasarlardan biridir ve yüksek taşlama sıcaklıkları sonucunda oluşmaktadır. Ayrıca taşlama sıcaklıkları ile kalıntı gerilmeler arasında sağlam bir ilişki vardır. Isıl hasarların engellenmesi ve ortadan kaldırılması için taşlama sıcaklıklarının ve ısıl gerilmelerin düşürülmesi gerekmektedir. Taşlama sıcaklıklarının ve ısıl gerilmelerin düşürülebilmesi için ısının taşlamada ne şekilde oluştuğunun ve dağıldığının anlaşılması gerekmektedir.

3.7.1 Isının dağılımı

Taşlamada mekanik enerji taşlama takımı ve iş parçasının birbirine göre olan bağıl hareketi ile oluşur. Bu enerji genellikle enerji dönüşümü ile ısı enerjisine dönüşür ve iş parçası taşlama takımının temas ettiği yerde sıcaklıkların yükselmesine sebep olur. Mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüşümü sürtünme ve deformasyon işlemleri sonrasında olur. Taşlama sırasında oluşan ısının bir kısmından dış sürtünmeler sorumludur. Bunlar iş parçası ve aşındırıcı taneciler arası sürtünme ile talaş ile

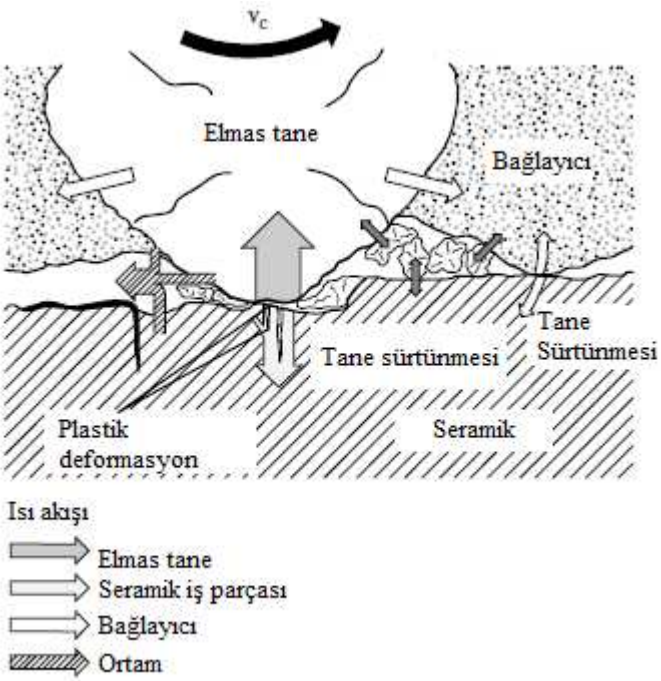
aşındırıcı tanecikler arasındaki sürtünmedir. Isı ayrıca iç sürtünmeler sonucuda oluşur bunlar plastik şekil değişimleri sonucu ısının oluşmasıdır. Isının oluşması ve geçisi gevrek ve sünek malzemelerin taşlanmasında farklılık göstermektedir. Birçok çalışmada seramiklerin taşlanmasındaki ısı oluşumu ve ısının geçişi incelenmiştir. Seramikler taş malzemesi olan elmasa göre oldukça düşük ısı iletkenliğine sahiptir. Bu nedenle seramiklerin taşlanmasında ısının büyük yüzdesi taşlama taşına düşük miktarı ise iş parçasına geçmektedir. Metal malzemelerin taşlanmasındaki ısı akışı Şekil 3.9'da seramik malzemelerin taşlanmasındaki ısı akışı ise Şekil 3.10'da görülebilir.Seramiklerin taşlanmasında alttaki ısı dönüşümleri meydana gelmektedir.



Şekil 3.9 : Metal malzemelerin taşlanmasında ısı akışı [54].

- Aşındırıcı parçacıkların aşınması sonucu dislokasyonlardan kalan enerji
- İş parçasınını yüzeyinde plastik şekil değişimleri sonucunda oluşan deformasyon enerjisi
- Taşlama taşında aşındırıcı taneciklerin yenilenmesi için oluşan elastik enerji
- Elmas taşlama taşı ile iş parçası yüzeyi arasındaki sürtünme kaynaklı enerji
- Seramik talaşları ve elmas taşlama taşı arasındaki sürtünme kaynaklı enerji
- Taşlama taşının bağlayıcısı ve iş parçası arasındaki sürtünme kaynaklı enerji

Soğutucu sıvı kullanılması ısının oluşumunu ve ısının yayılmasını etkilemektedir. Yağlayıcılar sürtünmeyi azaltarak sürtünme kaynaklı daha az ısı oluşmasını sağlamaktadır. Soğutma ise yağlayıcının su miktarına bağlıdır, soğutma etkisiyle taşınım ile iletilen ısı miktarı artar.



Şekil 3.10 : Seramiklerin taşlanmasında ısının akışı [54].

3.8 Taşlama ve Kalıntı Gerilmenin İlişkisi

Taşlamada kesme aşındırıcı tanelerin iş parçası yüzeyinden yüksek hızlarda az miktarda talaş kaldırması ile gerçekleşir. Aşındırıcı taneler sıcaklığa dayanıklı ve rastgele geometrilere sahiptirler. Taşlama işleminin özelliğinden dolayı taşlama sıcaklığı, yüzey tamlığı, taş ömrü ve taşlama sıvıları taşlama performansını ve iş parçasının ömrünü etkileyen önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin ayrıca taşlama ile oluşan kalıntı gerilmelere de önemli etkileri vardır.

Taşlama makine elemanlarının son işlemelerinde yaygın kullanıldığı için bu işlem sonrası oluşan kalıntı gerilmelerin kontrol edilmesi çok önemlidir. Taşlama sonrası oluşan kalıntı gerilmeler genellikle gerçekleşen plastik şekil değişimi ve taşlama ile oluşan sıcaklıkla ilgilidir. Yüksek sıcaklıklar çekme kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olurken, plastik şekil değişimleri ise basma kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olur. Her iki kalıntı gerilme tipinin oluşumuna sebep olan parametreler ise taşlama parametreleri, taşlama taşının topoğrafyası, taşlama taşının özellikleri ve soğutma koşullarıdır. Her bir koşuldaki parametrelerin kalıntı gerilmeye etkisinin belirlenmesi gereklidir.

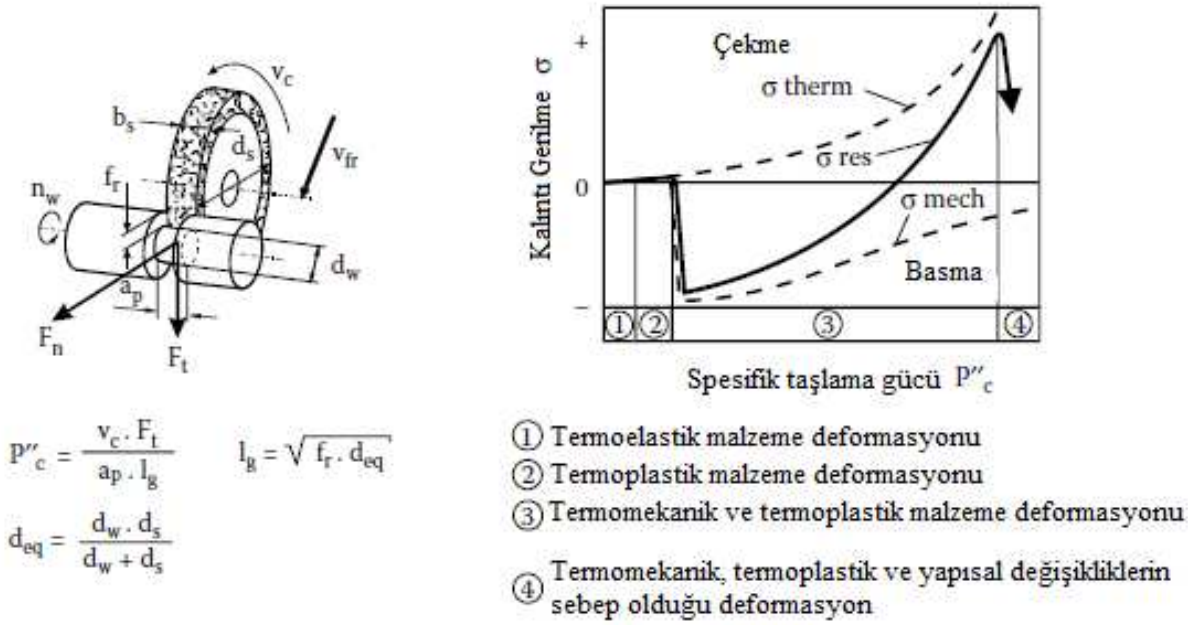
Paso ve ilerleme kalıntı gerilmelerin oluşumu açısından birbirine zıt etkiler göstermektedir. Pasodaki ve kesme hızındaki artış çekme kalıntı gerilmelerini

arttırırken ilerlemedeki azalma çekme kalıntı gerilmelerine sebep olmuştur. Taşlama taşının topoğrafyası bileme hızından etkilenmektedir. Düşük bileme hızlarıyla bilenen taşlar daha yüksek kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Taşlama sırasında aşınan aşındırıcı tanecikler genellikle kalıntı gerilmenin çekme şeklinde olmasına sebep olmuştur. Ayrıca aşındırıcı taneciklerin özelliklerininde oluşacak kalıntı gerilmenin tipi hakkında önemli etkileri vardır. Sert aşındırıcı tanecikler daha yüksek basma kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Taşlama sırasında kullanılan soğutucu sıvı kalıntı gerilme dağılımını etkilemektedir. Örnek olarak soğutucu olarak yağ kullanılması suya kıyasla çekme kalıntı gerilmelerinin büyük ölçüde azalmasını sağlamaktadır. Diğer talaşlı işleme yöntemlerinde olduğu gibi iş parçası malzeme özellikleri kalıntı gerilme dağılımını önemli ölçüde etkilemektedir. Literatürde yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına dayanarak, taşlama kaynaklı kalıntı gerilmeler işleme, takım ve iş parçası arasındaki karmaşık etkileşim sonucunda oluşmaktadır ve analitik olarak kalıntı gerilmenin elde edilmesi bu aşamada pek mümkün değildir.

Arzu edilen taşlama parametrelerinin basma kalıntı gerilmeleri oluşturması ya da en azından maksimum çekme kalıntı gerilmelerini sınırlandıracak şekilde olmasıdır. Daha hızlı üretim için kullanılan yüksek kesme hızları daha yüksek çekme kalıntı gerilmelerinin oluşumuna sebep olmaktadır. Kalıntı basma gerilmeleri düşük kesme hızlarıyla mümkün olmaktadır. Ancak alüminyum oksit taş yerine CBN taş kullanılması çekme yerine basma kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olmuştur. Bu durum CBN taşın daha düşük özgül enerjilerden dolayı daha düşük sıcaklıklara yol açmasına ve yüksek ısı iletkenliğine sahip olmasına bağlanmaktadır.

Gelişen makine teknolojisi ile iş parçasının yüzey tamlığı hakkında bilgi almak için kuvvet ölçümleri yapılabilmektedir [54]. Taşlamada teğetsel kuvvet daha önemlidir çünkü teğetsel kuvvet ve kesme hızının çarpımı taşlama kesme kuvvetini vermektedir. Spesifik taşlama kuvveti ise taşlama kuvvetinin işlenen hacime bölünmesi ile elde edilir. Taşlama kuvveti taşlama sırasında oluşan ısının tahmini için kullanılabilir. Şekil 3.11'te sağdaki grafikte sertleştirilmiş çelik iş parçasında artan spesifik taşlama gücüyle kalıntı gerilmenin değişimi görülebilir. Isıl ve mekanik yüklerin etkileri birbirini etkilemektedir. Başlangıçta sadece düşük kalıntı gerilmeler sadece sürtünme kaynaklı ısıl etkiler sonucu oluşur. Plastik şekil değişimlerinin başlamasıyla basma kalıntı gerilmeleri oluşmaya başlar. Artan

spesifik taşlama gücüyle temas bölgesinde artan sıcaklıklar ile mekanik etkiler azalarak ısıl yükler dominant hale gelmeye başlar ve kalıntı gerilmenin karakteri çekme olmaya başlar. Çok yüksek spesifik taşlama kuvveti seviyelerinde ise mekanik yükler tekrar dominant hale gelerek çekme kalıntı gerilmelerin artışını engeller ve çekme kalıntı gerilmelerde ani düşüş meydana gelir.



Şekil 3.11 : Taşlama gücüne kalıntı gerilmenin elde edilmesi [54].

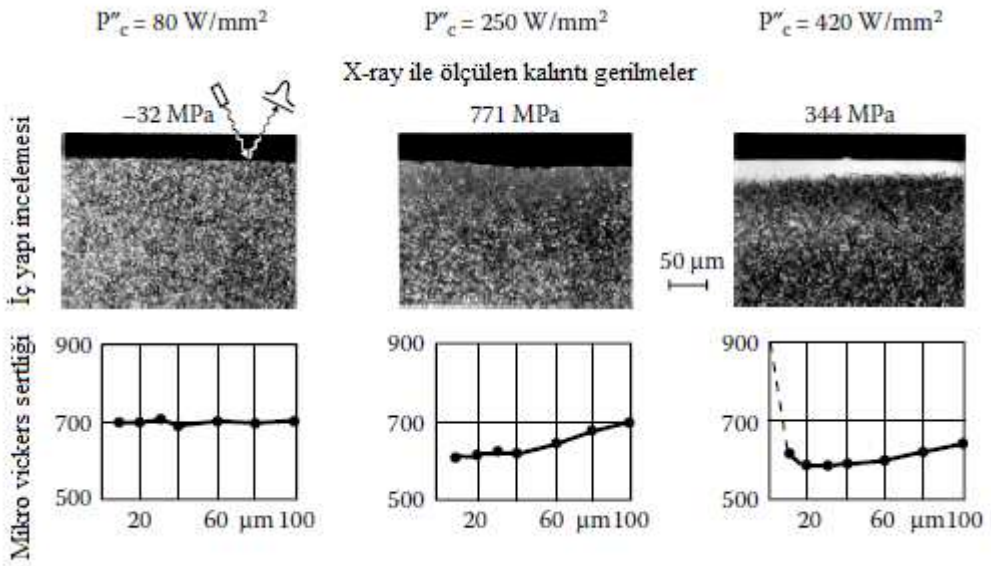
Şekil 3.12'da yüzeyi sertleştirilmiş çelik iş parçasından alınan sertlik ve kalıntı gerilme ölçümleri görülebilir. Yapılan bu çalışmada taşlama işlemlerinde spesifik taşlama kuvveti yeteri kadar küçük seçildiği taktirde basma kalıntı gerilmelerinin oluşabileceği görülmüştür [54]. Yüksek spesifik taşlama kuvvetleri için eğilimin çekme kalıntı gerilmeleri oluşturma yönünde olduğu görülmüştür.

Şekil 3.13 CBN taşların geleneksel aşındırıcılara karşı üstünlüğünü açıkça göstermektedir. CBN taşın sahip olduğu yüksek ısı iletkenliği, temas bölgesinden daha fazla ısının çekilerek, olaşan kalıntı gerilmelerin basma kaynaklı olmasını sağlamaktadır [54].

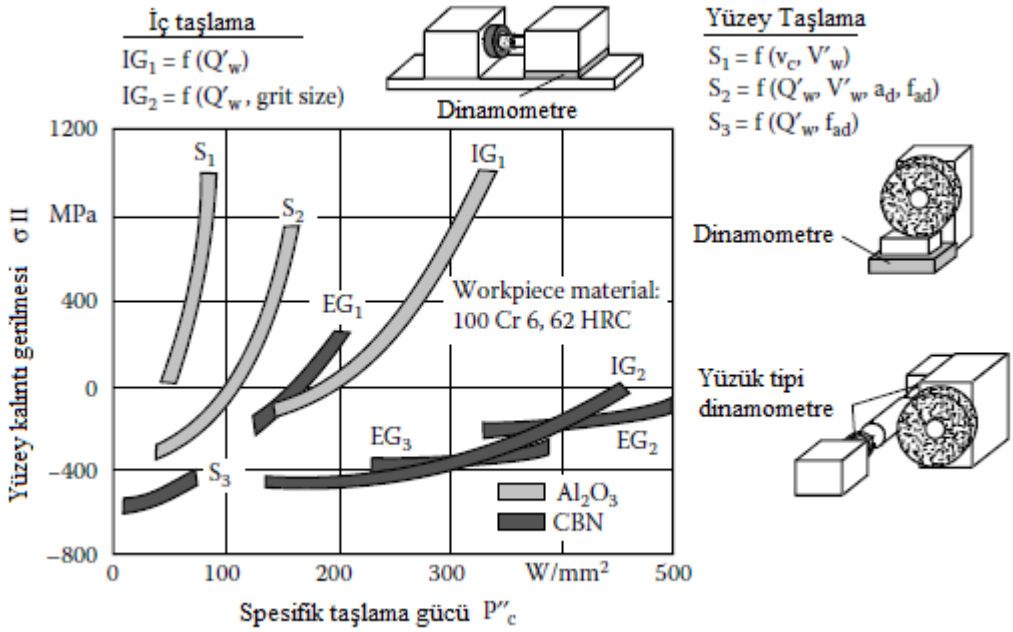
3.9 Yüzey Pürüzlülüğü

Boyutsal hassasiyet ve yüzey pürüzlülüğü yüzeylerin kalitesini tanımlamada kullanılan yaygın iki özelliktir. Yüzey pürüzlülüğün yorulma dayanımı üzerinde

önemli etkisi vardır. Yüzey pürüzlüğüğünün azalması yorulma dayanımını arttırmaktadır.



Şekil 3.12 : Spesifik taşlama gücünün 16 MnCr5'in yüzey tamlığına etkisi [54].



Şekil 3.13 : Farklı işleme tiplerinin ve taşların yüzey kalıntı gerilmelerine etkisi [54].

Taşlama işlemi sonrasında tipik aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri 0.15 µm ile 1.5 µm arasındadır. Mekanik parçaların güvenirliği yüzey kalitesine bağlıdır. Yüzey kaliteside yüzey bütünlüğü ve yüzey topoğrafyasından oluşmaktadır. Yüzey bütünlüğü taşlama sonrası yüzeyin mekanik ve metalurjik değişimiyle alakalıdır.

Taşlama sonrası yüzey bütünlüğüyle ilgili en önemli olaylar aşırı taşlama sıcaklıkları ile oluşan ısıl hasar ve kalıntı gerilmelerdir. Yüzey topoğrafyası ise işlenen yüzeyin geometrisi olarak tanımlanır ve yüzey pürüzlülüğü ile ifade edilir.

4. KALINTI GERİLME VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

4.1 Kalıntı Gerilme

Kalıntı gerilmeler çeşitli imalat yöntemleri sonrası parçada kalan elastik gerilmelerdir. Kaynaklı imalat, talaşlı imalat, döküm ve ısıl işlemler sonucunda malzeme içinde homojen olarak dağılmadan kalan plastik şekil değişimleri ve sıcaklık değişimleri kalıntı gerilmelerin oluşmasındaki ana nedenlerdendir.

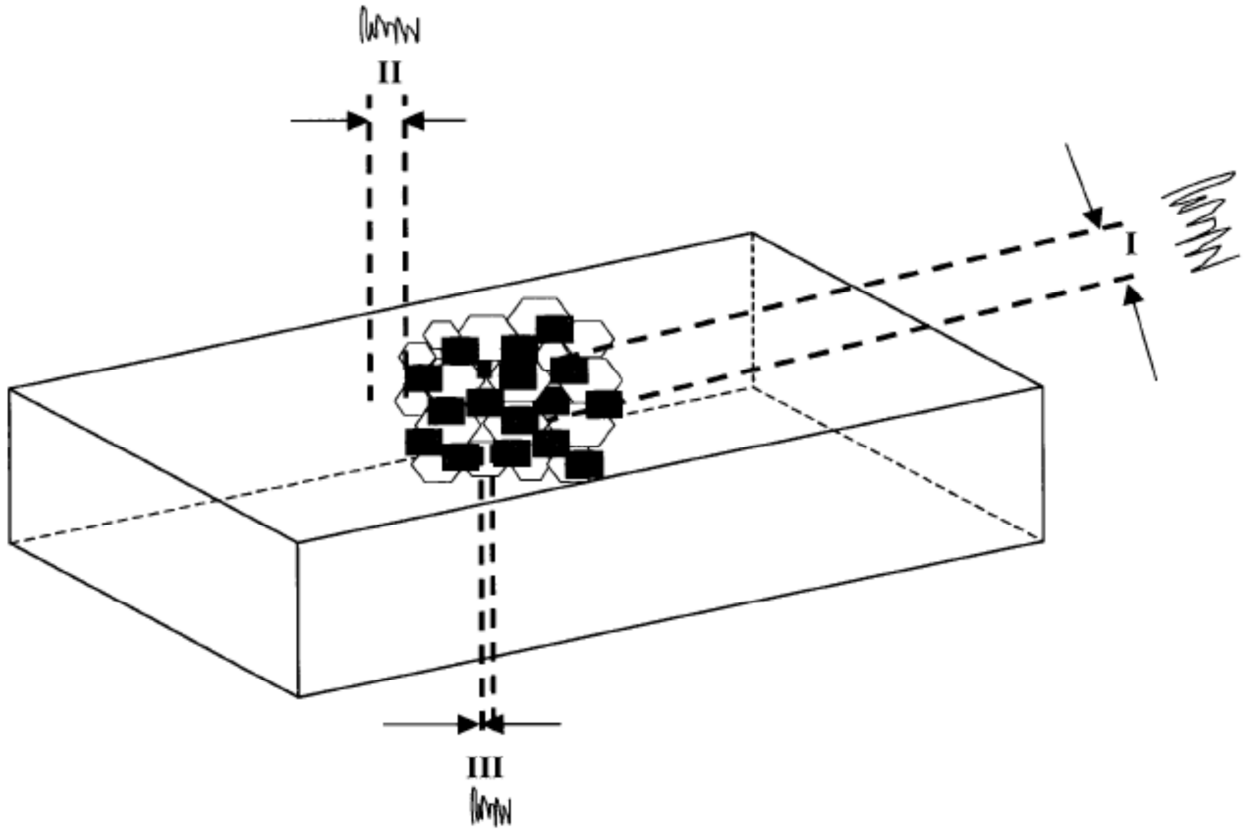
Kalıntı gerilmeler malzeme içinde denge içindedir, bileşke kuvvet ve momentlerin toplamı sıfırdır. Bir parçada kalıntı gerilmenin olması her zaman bunun zararlı olduğu anlamına gelmez. Bunun değerlendirilebilmesi için kalıntı gerilmenin büyüklüğünün ve çekme mi yoksa basma karakterli olup olmadığının belirlenmesi gerekmektedir. Gerilme dağılımı ve büyüklüğüne göre kalıntı gerilmeler üç sınıfa ayrılırlar.

4.1.1 Kalıntı gerilme çeşitleri

Üç tip kalıntı gerilme vardır, bunlar Tip I, Tip II ve Tip III olarak sınıflandırılırlar. Tip I kalıntı gerilmeleri genellikle uzun aralıklı ve malzeme yapısındaki taneler arasındaki kalıntı gerilmelerdir. Bu gerilmelere makroskopik kalıntı gerilmeler de denilmektedir. Bu tipteki kalıntı gerilmeler mevcut kalıntı gerilme ölçüm yöntemlerinin neredeyse tamamı tarafından ölçülebilmektedir.

Tip II kalıntı gerilmelere ise yapısal mikro gerilmeler denilmektedir ve en fazla tane büyüklüğü kadar olan bir alana yayılabilmektedirler. Bu tip kalıntı gerilmeler farklı fazların, farklı fiziksel özelliklerin veya yabancı maddeler ve matris arasında oluşmaktadır.

Tip III kalıntı gerilmeleri çok küçüktür ve genellikle tane içindeki birkaç atomik uzaklıktaki gerilmelerdir. Birçok uygulamada kalıntı gerilme ölçümlerinde bu kalıntı gerilmelerin varlığı ihmal edilir. Bu üç farklı kalıntı gerilmelerden yeni bir parça tasarımı yapılırken Tip I kalıntı gerilmelerinin hesaba katılması gerekmektedir. Bu tez kapsamında da makroskopik kalıntı gerilmelerin ölçümüyle ilgilenilecektir. Şekil 4.1’de farklı üç kalıntı gerilme tipleri görülebilir.



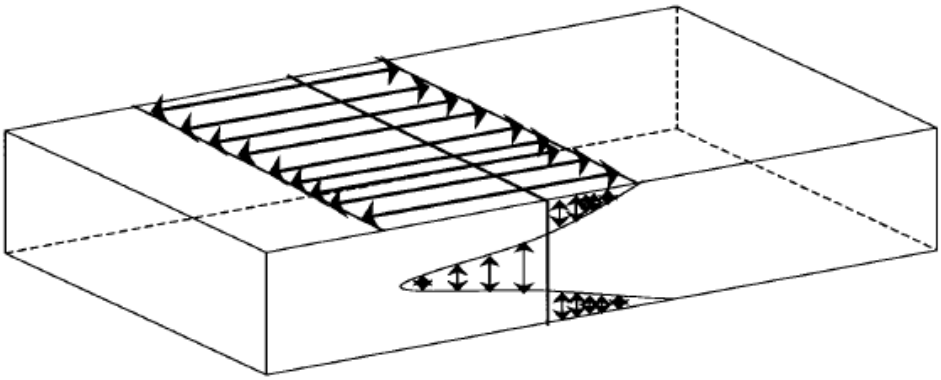
Şekil 4.1 : Kalıntı gerilmelerin sınıflandırılması [55].

4.1.2 Kalıntı gerilmelerin dağılım şekilleri

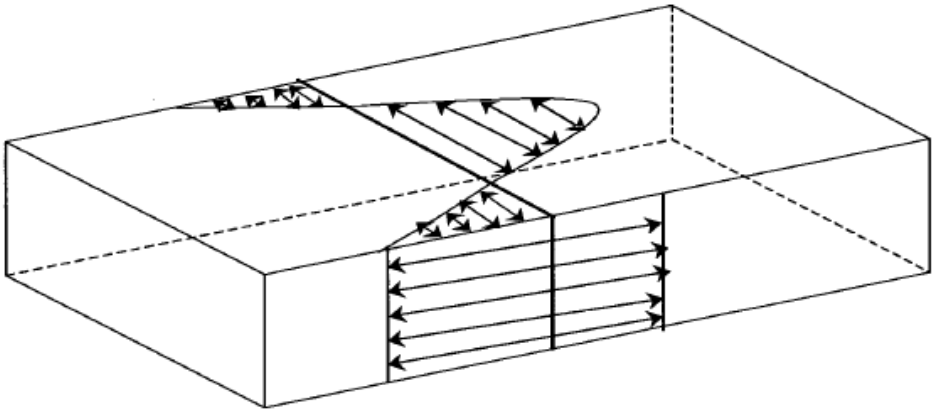
Kalıntı gerilmeler dağılım şekillerine göre üç ana sınıfa ayrılmaktadır. Şekil 4.2'de bu ayrım görülebilir. Geleneksel kalıntı gerilme ölçüm yöntemlerinin tamamı Şekil 4.2(a)'da görülen kalıntı gerilme dağılımlarını ölçebilmektedir. Ancak gerçek uygulamalarda Şekil 4.2(a), 4.2(b) ve 4.2(c)'de gösterilen kalıntı gerilme dağılım şekilleriyle karşılaşabilinmektedir. Bu durumlarda kalıntı gerilmelerin tahmin edilmesinde mevcut yöntemlerle deneysel hatalar oluşmaktadır.

4.1.3 Kalıntı gerilmelerin oluşumu

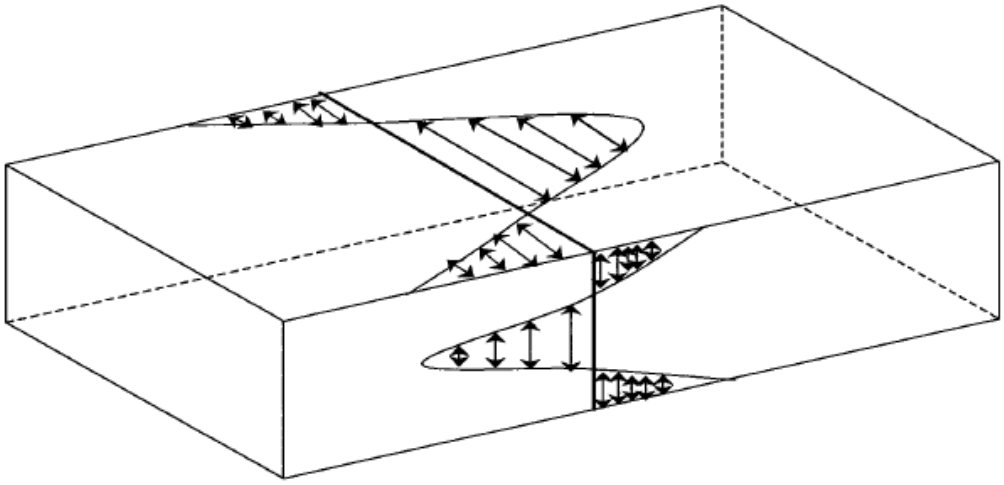
Kalıntı gerilmelerin kaynağı ve oluşumu genellikle malzemedeki ısıl, mekanik ve metalurjik değişimlerdir. Bu değişimler malzemeye montaj, kaynak, haddeleme gibi çeşitli imalat yöntemleri sonucunda dahil olur. Ayrıca kalıntı gerilmeler ısıl işlem, homojen olmayan plastik şekil değişimi, mekanik işlemler sonrası sıcaklığın yükselmesi ve sonucunda faz dönüşümü neticesinde oluşabilir. Faz değişimleri malzemedeki kalıntı gerilme oluşumunu arttırır.



(a) Derinlik ile değişen Kalıntı Gerilmeler



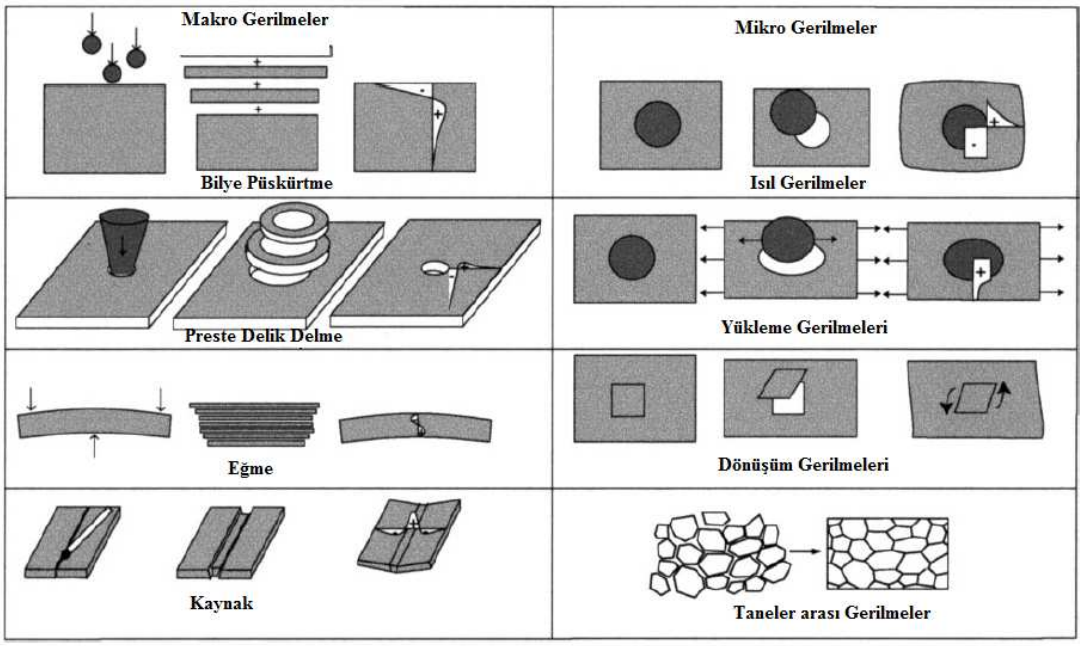
(b) Derinlik Boyunca Sabit ancak düzlemle değişen Kalıntı Gerilmeler



(c) Hem derinlik hemde düzlem ile değişen Kalıntı Gerilmeler

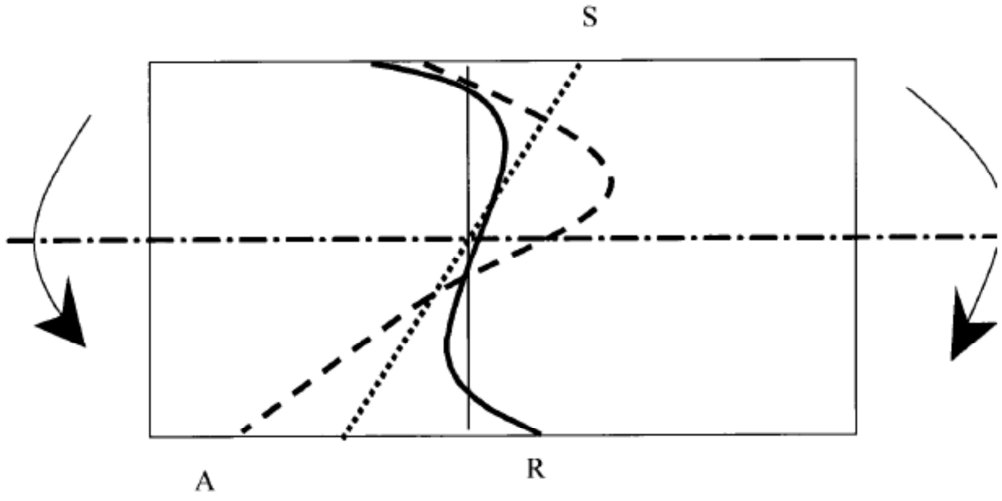
Şekil 4.2 : Kalıntı gerilmelerin dağılımı [55].

Kalıntı gerilmeler malzemelere üstteki yollarla dahil olduktan sonra dışarından ilave bir kuvvet uygulanmadan malzeme içinde var olmaya devam eder. Şekil 4.3'te makro ve mikro kalıntı gerilme örnekleri görülebilir.



Şekil 4.3 : Farklı işlemler sonrası oluşan makro ve mikro gerilmeler[56].

Şekil 4.4'teki kiriş örneği kalıntı gerilme açısından incelenecek olursa, Şekil 4.4 teki 'S' eğme sonrası oluşan gerilmeyi, 'R' kiriş içindeki kalıntı gerilmesini ifade etmektedir. Mekanik teorisine göre tahmin edilen gerilmeler servis gerilmesine çok yakın olacaktır ancak kalıntı gerilmelerin varlığında gerçek gerilmeler 'A' şeklinde olacaktır. 'A' gerilmesi eğme sonrası oluşan servis gerilmesi ve kiriş içindeki kalıntı gerilmenin toplamı sonrası elde edilen gerçek gerilmedir. Eğer kalıntı gerilmeler çekme şeklindeyse parça ilave olarak yüklenerek hasara karşı daha hassas bir duruma gelir. Kalıntı gerilmelerin basma şeklinde olması durumunda ise parça servis gerilmelerinden daha az gerilmelere maruz kalır ve parça ömrü artmış olur.



Şekil 4.4 : Kalıntı gerilmelerin oluşması ve gelişimi [55].

4.1.4 Kalıntı gerilmelerin önemi

Kalıntı gerilmeler yorulma, kırılma, korozyon ve sürtünme gibi malzeme özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Kalıntı gerilmelerin malzeme içindeki dağılımını ve büyüklüğünü tahmin etmek karmaşık bir olaydır. Mekanik parçalardaki gerilmelerin doğru bir şekilde hassas olarak ölçülmesi önemlidir. Kalıntı gerilmenin önemi uygulamanın tipine, malzemeye, kalıntı gerilmenin dağılımı ve büyüklüğüne bağlıdır. Kalıntı gerilmenin kabul edilebilir seviyesi için bu özelliklerden bağımsız birşey söylemek uygun değildir. Malzemenin ısıl, mekanik ve diğer yüklemeler altındaki performansı imalat yöntemleri ve çalışması süresince eklenen kalıntı gerilmelere bağlıdır.

Kalıntı gerilmelerin varlığı kalıntı gerilmelerin malzeme içindeki dağılımı ve büyüklüğüne göre avantaj veya dezavantaj olabilir. Basma kalıntı gerilmeleri çekme kalıntı malzemede çatlak oluşumunu zorlaştırdığı malzemenin yorulma dayanımını arttırır.

Birçok durumda malzeme içindeki kalıntı gerilme servis gerilmesine ilave olarak, malzemenin gevrek kırılmaya karşı hassasiyetini arttırır veya gerilmeli korozyon çatlak oluşumunu hızlandırır.

Gerilme giderme tavlamasının uygulanması istenmeyen dış gerilmelerinin malzeme içinde azaltılmasını sağlar. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda malzemenin akma dayanımını geçen iç çekme gerilmeleri plastik şekil değişimlerine sebep olur.

Soğuk şekil verme ve titreşim yöntemleri çekme kalıntı gerilmelerinin azaltılması için kullanılmaktadır. Soğuk haddeleme sonrası uygulanan soğuk germe işlemi çekme kalıntı gerilmelerin büyüklüğünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Günümüzde, titreşim yöntemlerini kullanarak kalıntı gerilmeleri azaltan ekipmanlar mevcuttur.

Genellikle tasarım sürecinde büyüklüğü bilinmeyen kalıntı gerilmelerin etkilerinin hesaba katılabilmesi için yüksek emniyet katsayıları kullanılır. Bu durum ağır ve pahalı parçaların üretilmesine sebep olur. Ancak bazı uygulamalarda ağırlık ve maliyet sınırlamaları yüksek emniyet katsayılarının kullanılmasını mümkün kılmaz. Bu nedenle malzemedeki kalıntı gerilmelerin hassas ve doğru bir şekilde ölçülmesi gerekliliği ortaya çıkar. Parçalar içindeki kalıntı gerilmelerin bilinmesi hafif, ucuz ve yüksek güvenilirliğe sahip tasarımların yapılmasını mümkün kılar. Kalıntı gerilmelerin sadece belirli endüstrilerin teknik gereksinimleri arasında bir parametre

olarak değerlendirilmesine rağmen, giderek artan hafif ve yüksek dayanımlı tasarımlara olan ihtiyaç kalıntı gerilme ölçümlerini standart bir hale getirecektir.

4.1.5 Talaşlı imalat kaynaklı kalıntı gerilmeler

Birçok imalat yöntemi parçalarda berlirli seviyelerde kalıntı gerilmelerin oluşumuna sebep olur.Kalıntı gerilmelerin büyüklüğü ve doğrultusu yükleme koşullarına, malzeme özelliklerine, ortam koşullarına göre prosesler arası farklılık gösterir. Talaşsız şekil verme işlemlerine kıyasla talaşlı işlemede temas ve dış kuvvetleri tanımlamak oldukça zordur. Ayrıca sıcaklık etkisi kalıntı gerilme oluşmasına sebep olur ve faz dönüşümlerini tetikler. Bu etkiler birlikte veya tek başına iş parçasına etkir ve iş parçası malzemesi ve işleme koşullarına göre parçada kalıntı gerilmeler oluşur.Farklı talaşlı işleme yöntemlerinde farklı kesme özellikleri nedeniyle farklı ısıl ve mekanik yükler oluşur. Örneğin taşlama işleminde kalıntı gerilme oluşumuna neden olan en önemli etken ısıl yüklerken, tornalama ve frezeleme işlemlerinde kalıntı gerilme oluşumuna neden olan en önemli etkenler mekanik kesme kuvvetleridir. Yükleme koşulları işleme yöntemleri arasında farklı olduğu için kalıntı gerilmelerin dağılımı da farklıdır.

Frezelemede kesme çevrimi süresince takım iş parçasına periyodik olarak kuvvet uygular. Bu tip periyodik temas durumunda talaş oluşumu süreksiz ve değişik şekillerde gerçekleşir ve kesme kuvvetleri periyodik olarak değişir. Değişken kesme kuvvetleri iş parçasındaki kalıntı gerilme dağılımını değiştirir. Freze takım geometrisi, paso, ilerleme ve anamil hızı kesme kuvvetlerinin periyodik olmasını etkiler. Herbir kesme parametresi kombinasyonu kendi kalıntı gerilme dağılımını oluşturur. Frezeleme işlemi sonucunda genel olarak basma kalıntı gerilmeleri yüzeyin altında gerçekleşir ve derinlik arttıkça kalıntı gerilme azalır. Yapılan deneysel çalışmalarda yukarı frezeleme yapıldığında kalıntı gerilmelerin basma yönünde olduğu ve aşağı frezeleme yapıldığında ise kalıntı gerilmelerin yönünün yine basma olduğu ancak büyüklüğünün yukarı frezelemeye göre daha düşük olduğu görülmüştür. İlerleme hızının ve kesme hızının düşürülmesi kalıntı gerilmelerin basma dan çekmeye değişmesine sebep olmuştur.

Taşlama makine elemanlarının son işlemelerinde yaygın kullanıldığı için bu işlem sonrası oluşan kalıntı gerilmelerin kontrol edilmesi çok önemlidir. Taşlama sonrası oluşan kalıntı gerilmeler genellikle gerçekleşen plastik şekil değişimi ve taşlama ile

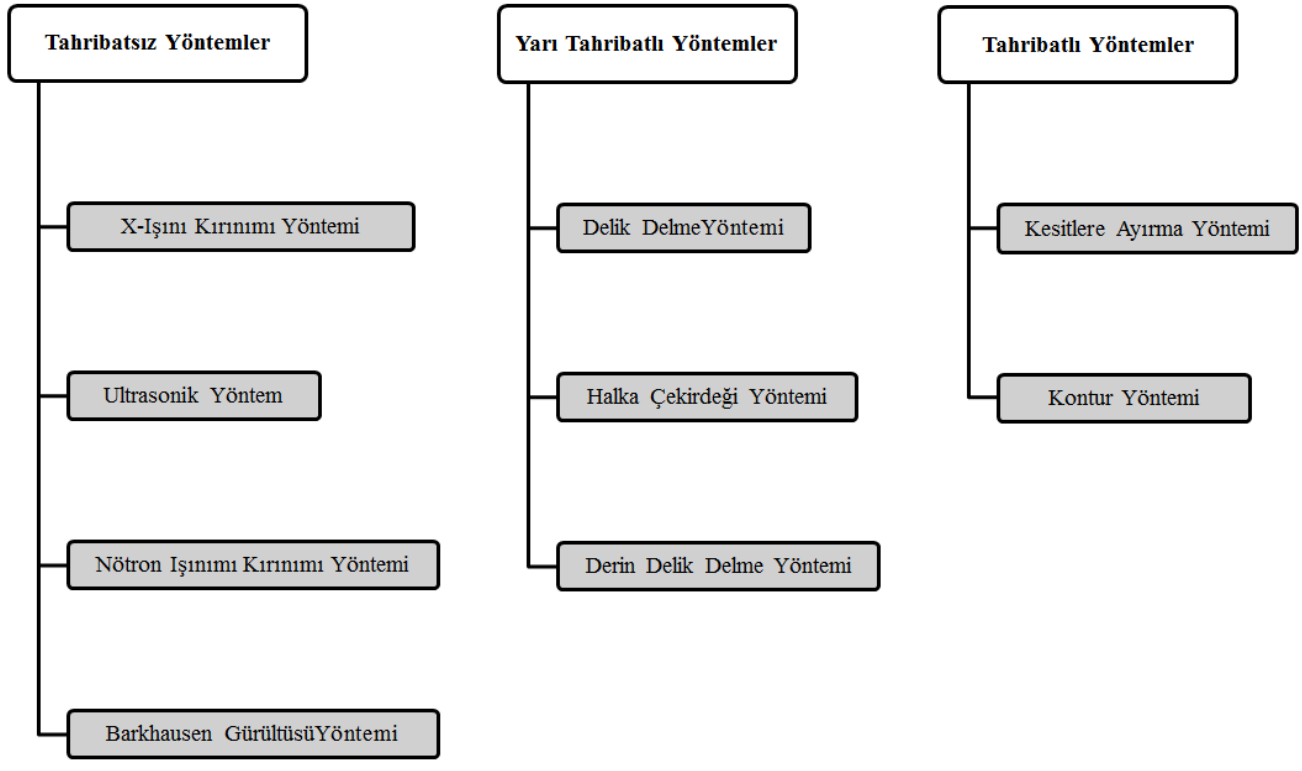
oluşan sıcaklıkla ilgilidir. Yüksek sıcaklıklar çekme kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olurken, plastik şekil değişimleri ise basma kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olur. Her iki kalıntı gerilme tipinin oluşumuna sebep olan parametreler ise taşlama parametreleri, taşlama taşının topoğrafyası, taşlama taşının özellikleri ve soğutma koşullarıdır. Her bir koşuldaki parametrelerin kalıntı gerilmeye etkisinin belirlenmesi gereklidir.

Paso ve ilerleme kalıntı gerilmelerin oluşumu açısından birbirine zıt etkiler göstermektedir. Pasodaki ve kesme hızındaki artış çekme kalıntı gerilmelerini arttırırken ilerlemedeki azalma çekme kalıntı gerilmelerine sebep olmuştur. Taşlama taşının topoğrafyası bileme hızından etkilenmektedir. Düşük bileme hızlarıyla bilenen taşlar daha yüksek kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Taşlama sırasında aşınan aşındırıcı tanecikler genellikle kalıntı gerilmenin çekme şeklinde olmasına sebep olmuştur. Ayrıca aşındırıcı taneciklerin özelliklerininde oluşacak kalıntı gerilmenin tipi hakkında önemli etkileri vardır. Sert aşındırıcı tanecikler daha yüksek basma kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olmaktadır.

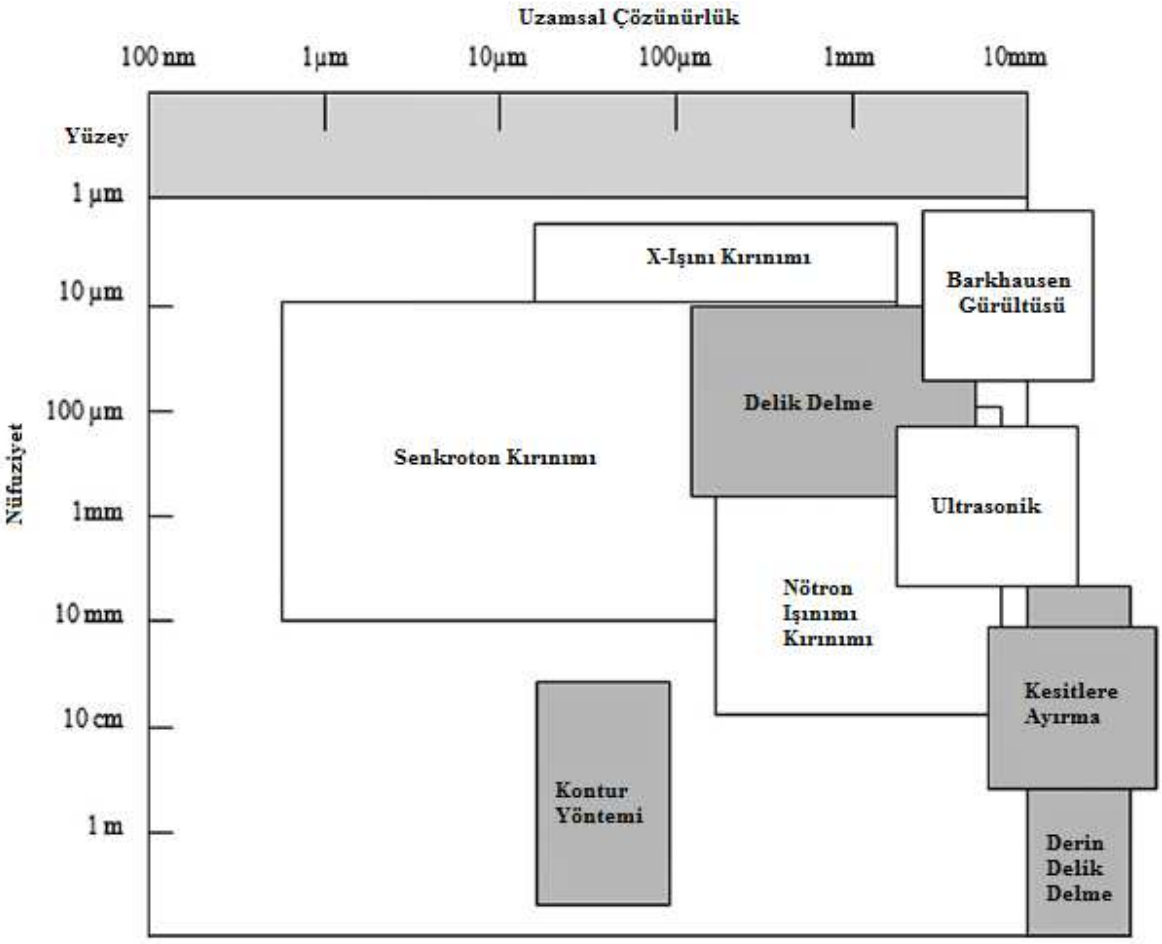
Tornalamada ise kalıntı gerilme üç yönde gerçekleşir. Bunlar eksenel, radyal ve silindirik parçanın çevresi boyunca açısal yöndür. Tornalama ile iş parçasının yüzeyinde oluşan kalıntı gerilme iş parçasının malzemesine ve kesme parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler ilerleme hızı, paso, kesme hızı, takım kaplaması ve takım geometrisidir. Tornalamada kalıntı gerilmeler genellikle parça yüzeyinde çekme yönündedir ve kesme hızı arttıkça artma eğilimindedir. İlerleme hızının artması çevresel yönde çekme kalıntı gerilmelerini arttırmaktadır. Ancak eksenel yöndeilerleme hızının kalıntı gerilmeye etkisi pek yoktur. İlerleme hızına benzer şekilde kesme hızının arttırılması çevresel yönde çekme kalıntı gerilmelerini arttırırken eksenel yönde basma kalıntı gerilmelerini azaltmaktadır. İlerleme ve kesme hızının aksine paso arttıkça çevresel yönde çekme kalıntı gerilmeleri azalmakta ve eksenel yönde basma kalıntı gerilmeleri artmaktadır. Tornalamada kesici takım geometrisinin kalıntı gerilme oluşumu üzerinde etkisi büyüktür. Takım ucunun keskinliğinin kalıntı gerilmelere etkisi büyüktür.Yapılan deneyler keskin takım uçlarının çevresel yönde daha yüksek çekme kalıntı gerilmelerin oluşmasına sebep olmuştur. Düşük ilerleme hızlarında ise keskin olmayan takım uçları sürtünmeden dolayı daha yüksek çekme kalıntı gerilmelerinin oluşumuna sebep olmaktadır.

4.2 Kalıntı Gerilme Ölçüm Yöntemleri

Geçtiğimiz on yılda farklı parça ve malzemelerde kalıntı gerilme ölçümünü mümkün kılan kalıntı gerilme ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir. Kırınım yöntemleri dışındaki sadece Tip I denilen makro gerilmelerin ölçümü mümkün kılan yöntemler Şekil 4.5'te görüldüğü gibi tahribatsız, yarı tahribatlı ve tahribatlı olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Tahribatlı ve yarı tahribatlı yöntemlere mekanik yöntemlerde denilmektedir. Bu yöntemlerde parçanın üzerinden malzeme kaldırılması sonucu ortaya çıkan şekil değişimleri ölçülerek kalıntı gerilmeler ölçülür. Delik delme, halka çekirdeği, derin delik delme, kesitlere ayırma ve kontur yöntemleri tahribatlı ve yarı tahribatlı yöntemleri oluşturur. Tahribatsız yöntemler ise X-ışını kırınımı, Nötron Işınımı Kırınımı, Ultrasonik ve Barkhausen Gürültüsü yöntemlerinden oluşur. Bu yöntemlerle genellikle gerilmeyle ilişkili parametreler ölçülür ve sonrasında gerilme hesaplanır. Kalıntı gerilme ölçüm yöntemlerinin uzamsal çözünürlük ve nufuziyet açısından kıyaslanması Şekil 4.6'da görülebilir.



Şekil 4.5 : Kalıntı gerilme ölçüm yöntemleri [56].



Şekil 4.6 : Kalıntı gerilme ölçüm yöntemlerinin kıyaslanması [56].

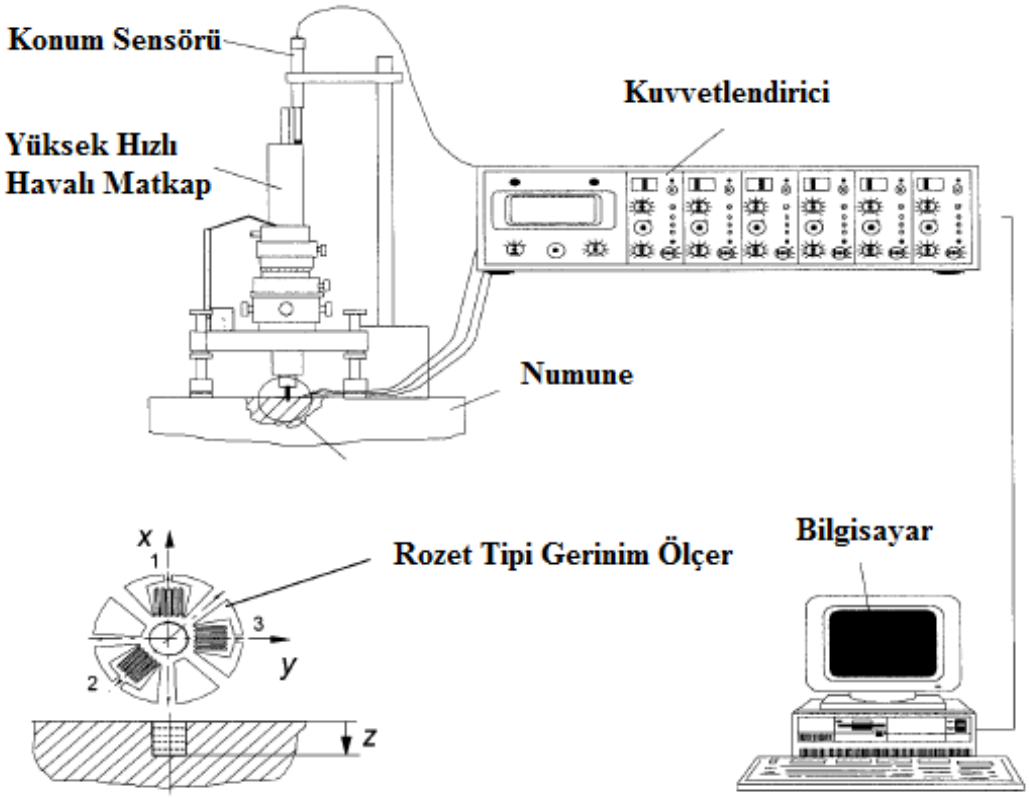
4.2.1 Tahribatlı ve yarı tahribatlı yöntemler

Tahribatlı ve tahribatsız yöntemler malzeme üzerinden malzeme kaldırılması sonucu oluşan şekil değişiminin ölçülerek kalıntı gerilmelerin hesaplanması esasına dayanır.

4.2.1.1 Delik delme yöntemi

Delik delme yöntemi diğer yöntemlere kıyasla basit ve hızlı bir yöntem olmasından dolayı kalıntı gerilmelerin kalınlık boyunca büyüklüğünün ve yönünün belirlenmesinde en yaygın kullanılan yarı tahribatlı kalıntı gerilme ölçüm yöntemidir. İyi doğruluğa sahip olması, güvenirliği ve standartlaştırılmış test prosedürleri bu yöntemin avantajlarını oluşturmaktadır. Numuneye açılan küçük delik çoğu zaman kabul veya tamir edilebilir. Bu yöntemin temel prensibi kalıntı gerilme ölçümü yapılacak olan bölgeye küçük bir delik delinmesine dayanır. Delik delinmesiyle açığa çıkan şekil değişimi delikle aynı merkeze yapıştırılmış olan gerinim ölçer ile ölçülür ve ölçülen şekil değişimleri kullanılarak kalıntı gerilmeler hesaplanır. Şekil 4.7'de delik delme yöntemine ait kalıntı gerilme ölçüm düzeneği görülebilir. Bu

çalışma kapsamında kalın camsı metal malzemede taşlama sonrası kalıntı gerilme ölçümü delik delme yöntemiyle yapılmıştır. Bu yöntemin kullanılarak yapılan ölçüm ve hesaplamalara 5. Bölümde detaylı olarak değinilmiştir.



Şekil 4.7 : Delik delme ile kalıntı gerilme ölçümü [55].

İleride değinilecek olan halka çekirdeği yöntemi de delik delme yönteminin farklı bir türü sayılabilir. Delik delme yönteminde gerinim ölçerin merkezine bir delik delinirken halka çekirdeği yönteminde ise gerinim ölçerin dışında bir halka oluşturularak açığa çıkan şekil değişimlerinin ölçülmesi sonucu kalıntı gerilmeler hesaplanır. Halka çekirdeği yönteminin delik delme yöntemine göre avantajı daha büyük şekil değişimlerinin ölçümü mümkün kılması ve dolayısıyla daha büyük kalıntı gerilmeleri ölçebilmesidir. Ancak ölçüm yapılan parçaya daha fazla tahribat vermesi ve kullanım zorluğu nedeniyle delik delme yöntemine göre daha az kullanılmaktadır. Çizelge 4.1'de delik delme kalıntı gerilme ölçüm yönteminin özellikleri görülebilir.

Delik delme yöntemi tahribatsız kalıntı gerilme yöntemlerinin aksine tüm malzemelerde kalıntı gerilme ölçümü için uygundur.Öncelikle malzemelerin izotropik olması ve elastik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca malzemeye

delik açılabilmesi gerekmektedir. Delik delme yöntemi Tip I delilen makro kalıntı gerilmelerin ölçümü için uygundur. Delik delme işlemiyle açılan deliğin etrafındaki gerilme yığılması nedeniyle malzemenin akma dayanımının % 60-70 ine kadar olan kalıntı gerilmelerin ölçümü için uygundur. Ayrıca delinen deliğin derinliği çapın yarısından az olmamalıdır.

Çizelge 4.1 : Delik delme yönteminin özellikleri [55].

Yöntemin Tipi	Yarı tahribatlı ve temaslı
Standartlar	ASTM E837-01
Ölçülebilen Kalıntı Gerilme Tipi	Tip I (Makro Gerilmeler)
Numune gereksinimleri ve hazırlama	Yüzeyin düz ve gerinim ölçerlerin yapıştırılabilmesi için temiz olması gerekir, malzemedeki kalıntı gerilme dağılımının bozulmaması için dikkat edilmelidir.
Malzeme Tipi	Kristal veya Amorf yapıya sahip metaller, plastikler ve kompozitler
Ölçülen büyüklük	Yüzey Gerinimi
Gerilme Durumu	Tek ve iki eksenli ölçümler için uygun.
Çözünürlük	En düşük derinlik 20 μm
Doğruluk	± 20 MPa
Nüfuz Etme Derinliği	Delinen deliğin çapının 1.2 katına kadar
Ölçüm zamanı	1 saatten az
Cihaz Maliyeti	10.000 - 30.000 USD
Ekipman taşınabilirliği	Laboratuvar ve Endüstriyel uygulamalar için uygun
Avantaj ve Dezavantajları	* Hızlı ve kolay bir yöntem * Ticari olarak ekipmanlar hazır olduğu için en yaygın yöntem * Amorf ve kristal malzemelerde kalıntı gerilme ölçümü yapabilme * Delik delme nedeniyle uygulama alanı sınırlı

Bu yöntem ile kalıntı gerilme öncesi bir takım hazırlıklar gerekir bunlar sırasıyla yüzeyin ve gerinim ölçerin hazırlanarak yüzeye yapıştırılması, gerinim ölçerlere kabloların lehimlenerek gerinim göstergeci kullanılarak herbir bağlantının kontrol edilmesi, yüksek hızlı havalı delik delme cihazının sabitlenerek delik merkezinin hassas olarak ayarlanması, delik delme işlemi ve eş zamanlı gerinimlerin ölçülmesi ve elde edilen şekil değişimleri kullanılarak kalıntı gerilmelerin hesaplanmasıdır.

Kalıntı gerilme ölçüm hatalarından kaçınmak için delik delme işlemine özen gösterilmelidir. Üç ana hata kaynağı vardır, bunlar delik delme sırasında oluşan işleme gerilmeleri, silindirik olmayan delik şekli ve delik ekseni ile gerinim ölçer arasındaki eksen kaçıklığıdır. Ancak bu yöntem ASTM tarafından kabul edilmiş ve standartlaştırılmış tek kalıntı gerilme ölçüm yöntemidir. Genellikle delik delme ile malzemeye eklenen gerilme delik delme yöntemine ve delik delme parametrelerine bağlıdır. Yüksek hızda delik delme yöntemiyle malzemeye eklenen kalıntı gerilme diğer delik delme yöntemlerine göre çok azdır. Ayrıca yüksek hızda delik delme yönteminin diğer avantajıda basit ekapmana ve kolay bir işleme sahip olmasıdır.

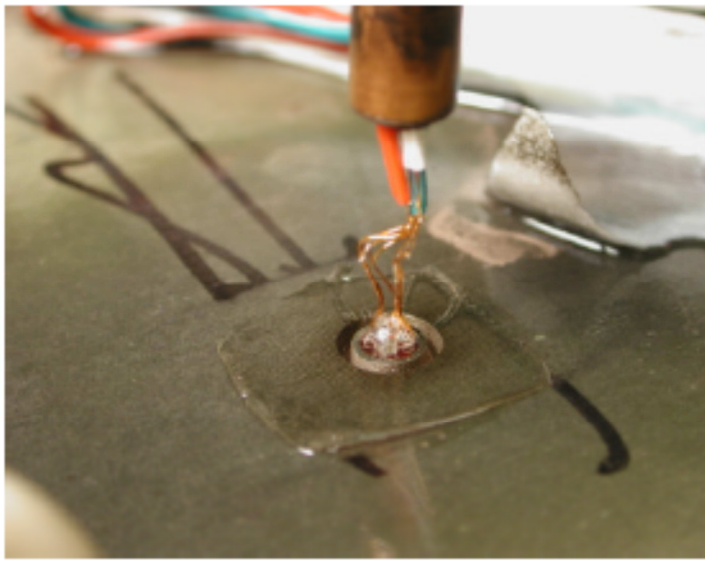
Çok sert malzemelerde delik delme işlemlerinde delme uçunda aşırı aşınma sonucu hasar olan durumlarda elektro erezyon yöntemi kullanılarak delik delme işlemi gerçekleştirilebilir. Birçok pratik uygulamada kalıntı gerilmelerin derinlikle değişimi üniform olmadığı için artımlı delik delme işlemi gerçekleştirilmektedir. Böylece kalıntı gerilmenin derinlik boyunca değişimi elde edilebilmektedir.

4.2.1.2 Halka çekirdeği yöntemi

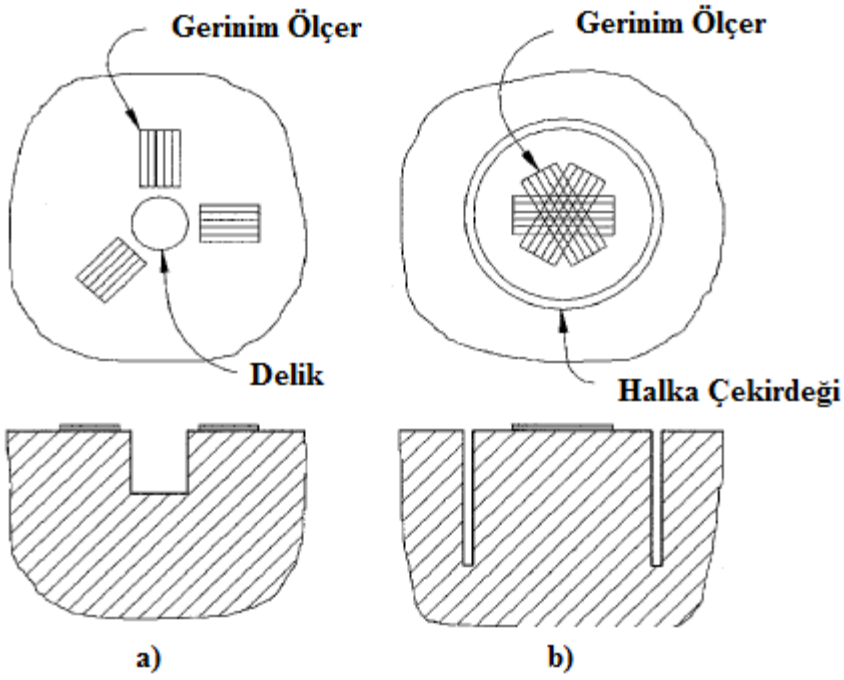
Halka çekirdeği yöntemi kalıntı gerilmelerin malzemenin belirlenen derinliği boyunca ölçülmesini sağlayan tahribatlı bir kalıntı gerilme ölçüm yöntemidir. Bu yöntem elastik teoriye dayanır. Parçadan malzeme kaldırılma sırasında kalıntı gerinim açığa çıkar. Gerinimdeki değişim delik derinliği boyunca bilgisayar tarafından kayıt edilir. Sonrasında kalıntı gerilmeler delik derinliği boyunca bilgisayarın kaydettiği gerinimler kullanılarak hesaplanır. Halka çekirdeği yöntemi elastik teorinin geçerli olduğu metaller, seramikler ve polimerlerde kullanılabilir.

Halka çekirdeği yönteminin delik delme yöntemine göre bir takım avantajları mevcuttur. Bu yöntemle delik delme yöntemine göre elde edilen gerinim sinyallerinin büyüklüğü bu yöntemle elde edilen gerimin rahatlaması daha fazla olduğu için yüksektir. Delik delme yönteminde nominal olarak malzemenin akma dayanımının %60'ındandaha az olan kalıntı gerilmeler ölçülebilir. Bu durum gerinim ölçerin merkezine delinen deliğin yarattığı gerilme şiddeti faktörüyle açıklanmaktadır. Halka çekirdeği yönteminde gerinim ölçerin etrafındaki malzeme kaldırıldığı için gerilme şiddeti faktörü yaratmamaktadır. Bu yöntemle malzemenin akma dayanımına kadar olan kalıntı gerilmeler ölçülebilmektedir. Yüksek hızda delik delme işlemi pekleşebilen nikel esaslı süper alaşımlar ve östenitik paslanmaz

çeliklerde ilave kalıntı gerilmelere sebep olabilmektedir ancak halka çekirdeği yönteminde işlemenin yarattığı gerilmelerin kalıntı gerilmelere etkisi yoktur. Halka çekirdeği yönteminde işleme ile elde edilen halkanın merkezlenmesinin hassasiyeti sonuçlar açısından delik delme yönteminde delinen deliğin merkezlenmesi kadar kritik değildir. Şekil 4.8'de halka çekirdeği yöntemi kullanılarak yapılan bir kalıntı gerilme ölçümü görülebilir. Ayrıca Şekil 4.9'da halka çekirdeği ve delik delme yönteminin kıyaslaması görülebilir.



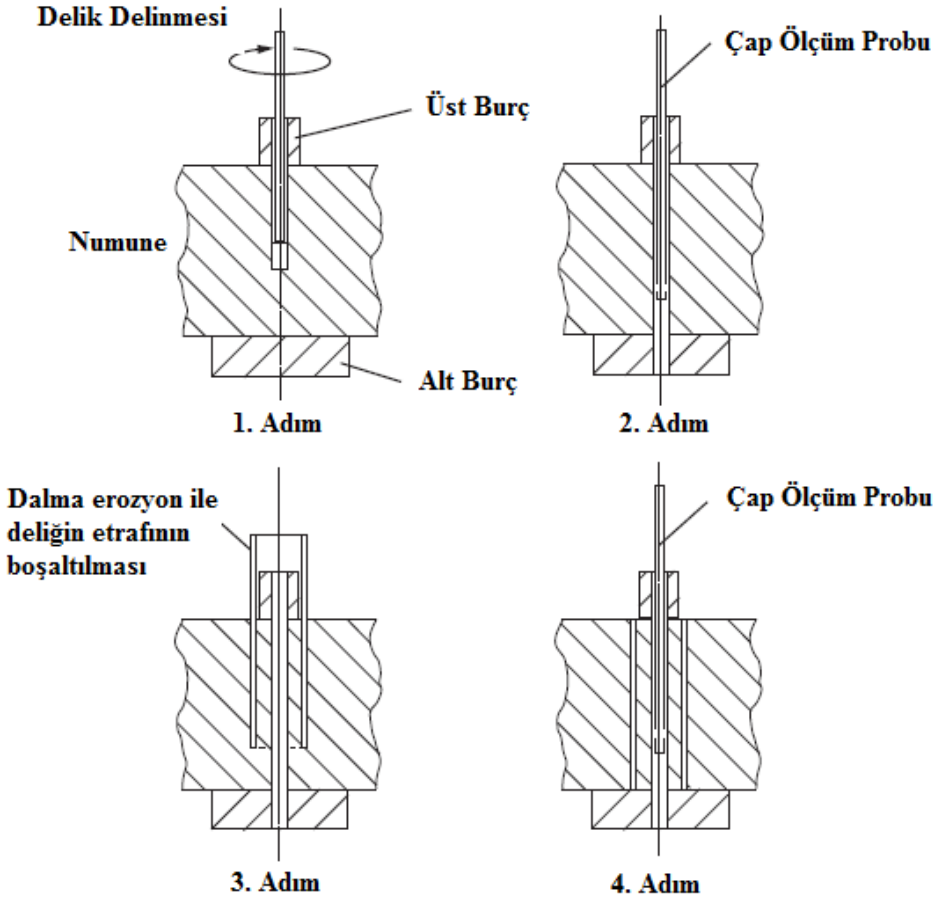
Şekil 4.8 : Halka çekirdeği yöntemi ile kalıntı gerilme ölçümü [57].



Şekil 4.9 : Kalıntı gerilme ölçüm yöntemleri a) delik delme yöntemib) halka çekirdeği yöntemi.

4.2.1.3 Derin delik delme yöntemi

Derin delik delme yöntemi delik delme ve halka çekirdeği yöntemlerinden ortak taraflara sahip ara bir yöntemdir. Derin delik delme yöntemde parça tüm kalınlığı boyunca delinir. Delinen deliğin çapı hassas olarak ölçüldükten sonra, deliğin etrafındaki malzeme daldırma erozyon yöntemi ile boşaltılır ve sonrasında deliğin çapı tekrar ölçülür. Derinlik boyunca hangi sıklıkla kalıntı gerilmeler hesaplanmak isteniyorsa o sıklıkta çap ölçümü havalı hassas ölçme takımları kullanılarak gerçekleştirilir. Delinen deliğinin çapının değişimi kullanılarak kalıntı gerilme hesaplanır. Şekil 4.10'da işlemin adımları görülebilir. Derin delik delme yöntemi parça üzerinde kalıcı bir delik bırakmasına rağmen yarı tahribatlı kalıntı gerilme ölçüm yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Derin delik delme yönteminin en önemli özelliği parça içindeki yüzeyden derin kalıntı gerilmelerin ölçülmesini mümkün kılmasıdır.

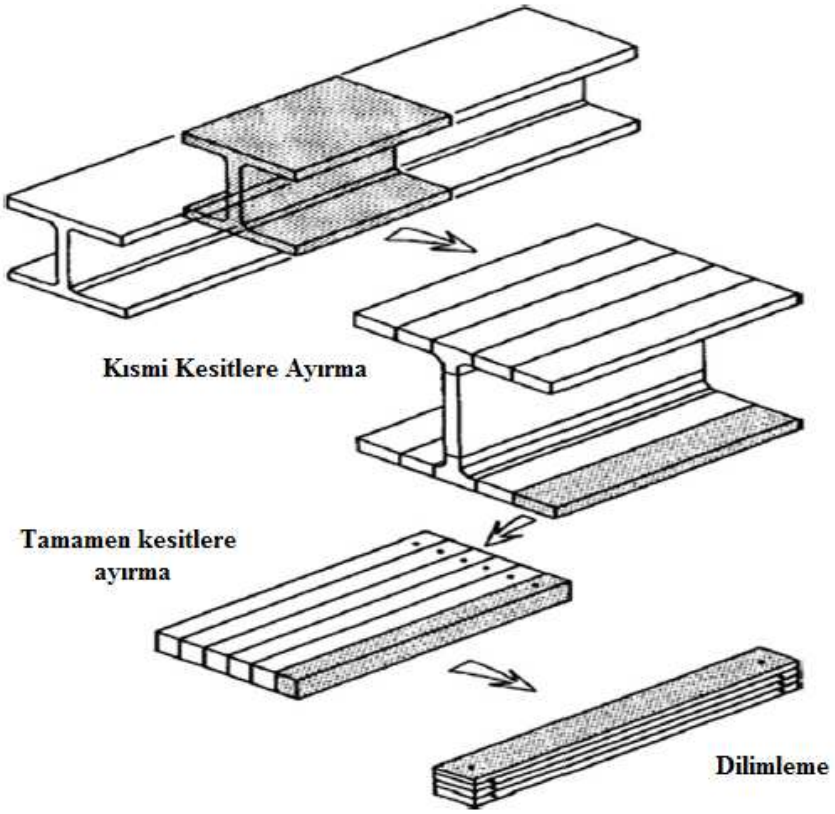


Şekil 4.10 : Derin delik delme ile kalıntıgerilme ölçümü işlem adımları.

Bu yöntem ile olduça büyük alüminyum ve çelik döküm parçalar üzerinde ölçüm yapılabilir. Derin delik delme yöntemi izotropik malzemelerin kalıntı gerilme ölçümlerinde kullanılan standart bir yöntem haline gelmiştir. Bu yöntem genellikle kalın parçalarda kalıntı gerilme ölçümleri için uygundur. Yapılan yeni çalışmalarda bu yöntemin tabakalı kompozit ortotropik malzemelerde kalıntı gerilmelerin ölçümünde kullanılması mümkün kılınmıştır.

4.2.1.4 Kesitlere ayırma yöntemi

Kesitlere ayırma yöntemi numuneden malzeme kaldırılması sonucu meydana gelen şekil değişiminin ölçülerek kalıntı gerilmenin hesaplanmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem yapısal karbon çelikleri, aluminyum ve paslanmaz çelik kesitlerde kalıntı gerilmelerin ölçülmesinde kullanılmaktadır.Bu yöntem kalıntı gerilmelerin ölçülebilmesi için kesitlere ayırmadan oluşur. Kesitlere ayrılırken kesme işlemi parçada plastik şekil değişimine ve sıcaklıkların yükselmesine sebep olmamalıdır. Böylece gerçek kalıntı gerilmelere kesme işlemenin etkilerinden ayrı bir şekilde belirlenmiş olmaktadır. Şekil 4.11'de I kesitli bir kirişe ait kesitlere ayırma yönteminde kesitlere ayırma sıralaması görülebilir.



Şekil 4.11 : Kesitlere ayırma yöntemi [56].

Kesme işlemi sırasında açığa çıkan gerinimler genellikle mekanik ve elektriksel gerinim ölçerler kullanılarak ölçülür. Genellikle kesitlere ayrıma yöntemiyle elde edilen kesilmiş numuneler eksenel ve eğme şeklinde deformasyonlar maruz kalabilirler. Literatürde bu yöntem ile elde edilmiş başarılı ölçümler mevcuttur.

4.2.1.5 Kontur yöntemi

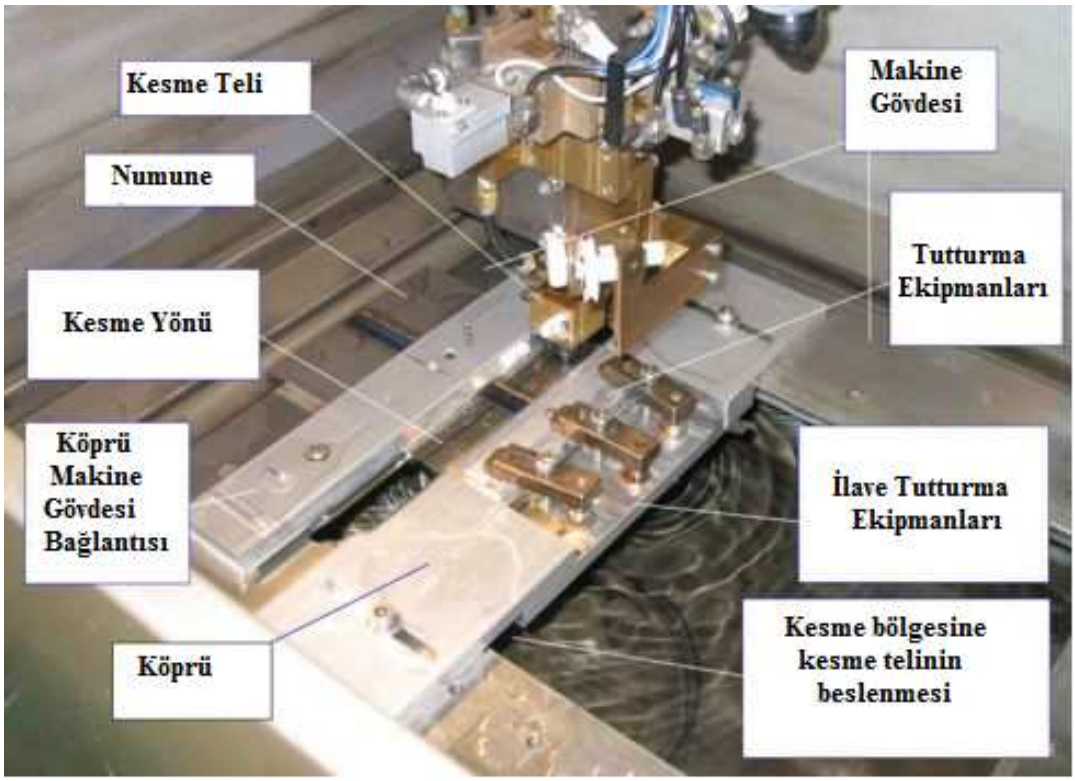
Kontur yöntemi ilk olarak 2000 yılında iştenen düzlemde kalıntı gerilmelerin iki boyutlu olarak değerlendirilmesi için geliştirilmiştir.Kontur yöntemi daha yüksek uzamasal çözünürlüğe, daha kolay parçanın kesilmesine ve kolay hesaplamalara sahiptir. Kontur yöntemi Bückners'in elastik süperpozisyon ilkesine dayanır. Literatürde yapılan çalışmalarda kontur yöntemi ile elde edilen tamamen farklı bir yöntem olan Nötron Işını Kırınımı ile kıyaslandığında yakın sonuçların olduğu görülmüştür.

Kontur yönteminin uygulaması dört adımdan oluşur bunlar numunenin kesilmesi, yüzey profilinin ölçülmesi, data azaltımı ve gerilme ölçülmesidir.

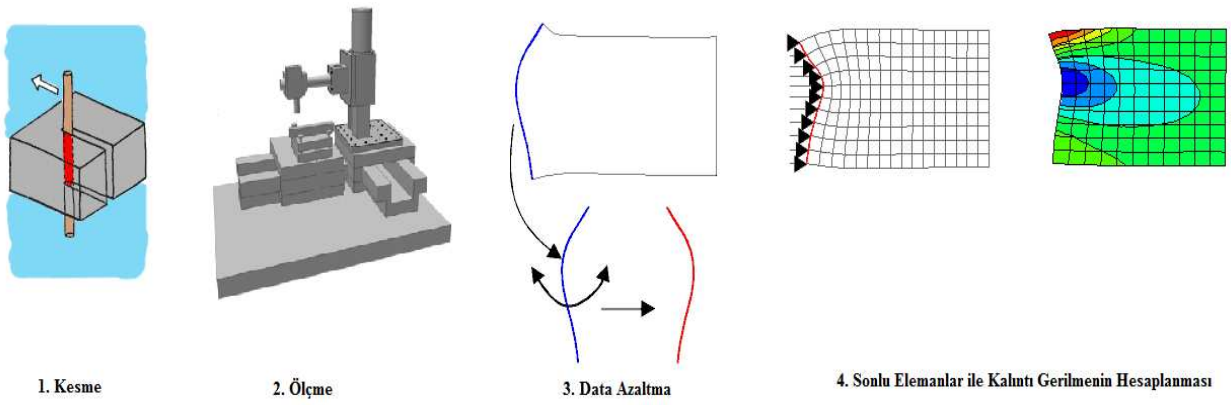
Numunenin kesilmesi kontur yönteminde işlemin ilk ve daha sonraki işlemlerin başarılı olması kesilen yüzeyin kalitesine bağlı olduğu için en önemli adımıdır. Kesme işleminde sert kesme takımları yerine tel erozyon yötemi kullanılmaktadır. Yüzeyin tek bir adımda düz şekilde kesilmesi yüksek doğruluk elde edilmesi için önemlidir. Bu nedenle parçanın kesme süresince tutturulması ve kesme genişliğinin düz bir yüzey elde edilmesi için kontrol edilmesi gerekmektedir. Kesme genişliğinin kullanılan tel erezton telinin tipine, kesilen malzemenin özelliğine, parça geometisine ve tel erezyon işlem parametrelerine bağlıdır. Kesme telinin kalınlığı en az malzeme kaldırılmasını mümkün kılmak için mümkün olduça küçük olmalıdır. Bu durum yüksek gerilme gradyanına sahip parçalarda daha önemlidir. Kontur yöntemindeki kesme işlemi Şekil 4.12'de ve kontur yönteminin işlem adımları Şekil 4.13'de görülebilir.

Kesme işlemi sonrası yüzey açığa çıkan kalıntı gerilmelerden dolayı şekil değiştirir ve bu nedenle yüzeyin ölçülmesi gerekmektedir. Yüzey ölçümleri için hassas ölçüm yeteneklerinden dolayı koordinat ölçüm makineleri kullanılmaktadır. Koordinat ölçüm makinesi kesilen yüzeyde belirlenen noktalarda ölçüm yapar.

Ölçüm işlemi sonrasında ölçülen noktalar karşıklık iki düzlemde aynı yerde olması gerektiği için kontrol edilir ve gerektiğinde data azaltımı yapılır. Data azaltımı sonrası elde edilen yüzey profili sonlu elemanlar modeline şekil değiştirme sınır koşulu olarak girilir ve gerilmeler hesaplanır.



Şekil 4.12 : Kontur yönteminde kesme işlemi [58].



Şekil 4.13 : Kontur yöntemi.

4.2.2 Tahribatsız yöntemler

Tahribatsız yöntemler elastik şekil değişiminin belirlenmesi esasına dayanır. Elastik deformasyon kristal yapı içerisindeki atomik düzlemler arasındaki mesafenin değişmesine sebep olur. Tahribatsız yöntemler enfazla şekil değişiminin olduğu

yerdeki açıları ölçer. Daha sonra açılar kullanılarak Bragg yasası ile atomik düzlemler arasındaki mesafeler ölçülür. Eğer parçada kalıntı gerilme varsa, atomik düzlemler arası mesafe gerilme olmayan duruma göre farklı olacaktır. Bu farkın büyüklüğü kalıntı gerilmeyi vermektedir. En yaygın kullanılan tahribatsız yöntemler X-ışını kırınımı, ultrasonik, nötron ışınımı kırınımı ve Barkhausen gürültüsü yöntemleridir.

4.2.2.1 X-ışını kırınımı yöntemi

X-Işını kırınımı yöntemi malzemelerin yüzeyindeki kalıntı gerilmelerin ölçülmesi için kullanılan tahribatsız kalıntı gerilme ölçüm yöntemidir. X-ışını kırınımı yöntemi malzemelerin gerilme altında veya kalıntı gerilmeye sahip olduğunda oluşan elastik şekil değişimlerinin atomik düzlemlerin arasındaki mesafeyi değiştirmesinin ölçümüne dayanır. X-Işını kırınımı yöntemi atomik düzlemlerin arasındaki mesafe elde edilebilir ve sonrasında şekil değişimi hesaplanarak malzemedeki kalıntı gerilme hesaplanabilir.

X- ışınımı kırınımı yöntemi kalıntı gerilmelerin elde edilmesinde oldukça doğru sonuçlar veren bir yöntemdir. Kristal yapı içerisinde bulunan atomik düzlemler arasındaki mesafe, uygulanan gerilmeler ve malzemeki kalıntı gerilmeler sayesinde uzayıp kısalır. Bu mesafenin artması o bölgedeki çekme kalıntı gerilmelerini, azalması ise basma kalıntı gerilmelerini ifade eder. X-Işını kırınımı yönteminde malzemeye gönderilen X-ışınları malzeme içerisindeki kristal düzlemlerden yansır. Bu sırada malzemeye gelen ışınları yönü değiştirilerek en çok yansımanın oluştuğu açı bulunur. Bulunan açı ve Bragg yasası kullanılarak iki atomik düzlem arasındaki mesafe hesaplanır. Atomik düzlemler arası mesafenin ilk duruma göre farklı olması kalıntı gerilmenin varlığını işaret eder. Bu şekil değişimi kullanılarak kalıntı gerilmeler hesaplanır.Çizelge 4.2’de x-ışını kırınımı yönteminin temel özellikleri görülebilir.

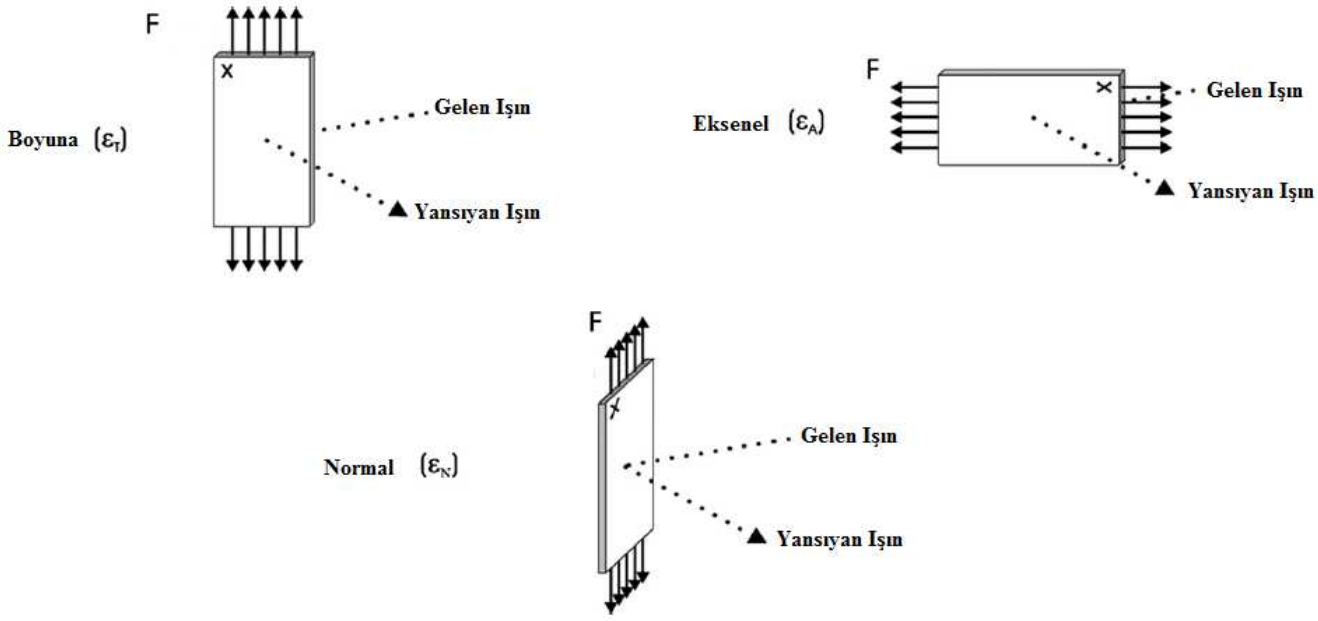
X-Işını kırınımı yöntemi ince taneli, kristal yapıya sahip ve numune yüzeyinde her bir doğrultuda kırınıma izin verecek malzemeler için uygundur. Bu yöntemin avantajı tüm kalıntı gerilme tiplerinin ölçülebilmesidir. Dezavantajları ise yüksek cihaz maliyeti ve sınırlı numune boyutu olarak özetlenebilir.

Çizelge 4.2 : X-ışını kırınımı yönteminin özellikleri [55].

Yöntemin Tipi	Tahribatsız ve eğer yüzey ölçümleri yapılacaksa temassız
Standartlar	Yöntem ile ilgili bir ölçüm standardı mevcut değil
Ölçülebilen Kalıntı Gerilme Tipi	Tip I (Makro Gerilmeler), Tip II (Mikro Gerilmeler) ve Tip III (Mikro-atomik Gerilmeler)
Numune gereksinimleri ve hazırlama	İlk numune yüzeyinin hazırlanmasında hassas gereksinimler, ölçüm sonucu yüzey kalitesiyle yakından ilişkili
Malzeme Tipi	Kristal yapıya sahip metaller ve seramikler
Ölçülen büyüklük	Atomik düzlemler arasındaki mesafe
Gerilme Durumu	Tek ve iki eksenli ölçümler için uygun, katman kaldırma ile çeşitli gerilmeler ölçülebilir.
Çözünürlük	1 mm yanlamasına 20μm derinlik
Doğruluk	± 20 Mpa
Nüfuz Etme Derinliği	<50μm (Aluminyum) <5μm (Titanyum) <1mm katman kaldırma
Ölçüm zamanı	1 saatten az
Cihaz Maliyeti	100.000 -200.000 USD
Ekipman taşınabilirliği	Laboratuvar ve Endüstriyel uygulamalar için uygun
Avantaj ve Dezavantajları	* Yüksek çözünürlük ve doğrulukta gerilme ölçümleri * Taşınabilir cihazlar * Radyasyon problemli yüksek maliyetli cihazlar * Sınırlı numune boyutu

4.2.2.2 Nötron ışınımı yöntemi

Nötron ışını kırınımı yöntemi X-ışını kırınımı yöntemindeki gibi malzemenin kristal yapısındaki atomik düzlemler arasındaki mesafeyi ölçerek kalıntı gerilmelerin elde edilmesini sağlar. Bu yöntemin avantajı x-ışınları yerine daha kuvvetli nötronlar gönderildiği için bu yöntemde nüfuziyet derinliğinin daha fazla olmasıdır. Ölçüm derinliği alüminyumda 200 mm, çelikte 25 mm ve titanyumda 25 mm'ye kadar ulaşabilir.Her bir ölçüm noktasında şekil değişimi üç farklı doğrultuda ölçülebilir. Bu ölçüm yapılan parçanın Şekil 4.14'de olduğu gibi parçadan üç farklı konumda ölçüm alınması ile mümkün olmaktadır.



Şekil 4.14 : Boyuna, eksenel ve normal doğrultularda alınan ölçümler.

Ancak x-ışını kırınımı gibi diğer yöntemlere kıyasla bu yöntemin ilk yatırım maliyeti çok yüksektir ve mühendislik uygulamalarındaki rutin imalat kalite kontrolleri için uygun değildir. Yöntem laboratuvar ortamında ve genellikle araştırma geliştirme çalışmalarında kullanılmaktadır. Çizelge 4.3'de nötron ışınımı kırınımı yönteminin temel özellikleri görülebilir.

4.2.2.3 Ultrasonik yöntem

Bu yöntem katı cisimlerde elastik dalga yayılımının mekanik gerilmelere bağlı olması esasına dayanır. Diğer bir deyişle malzemede enine ve boyuna ilerleyen dalgaların hızı malzemede varolan gerilmelerden etkilenerek değişir.

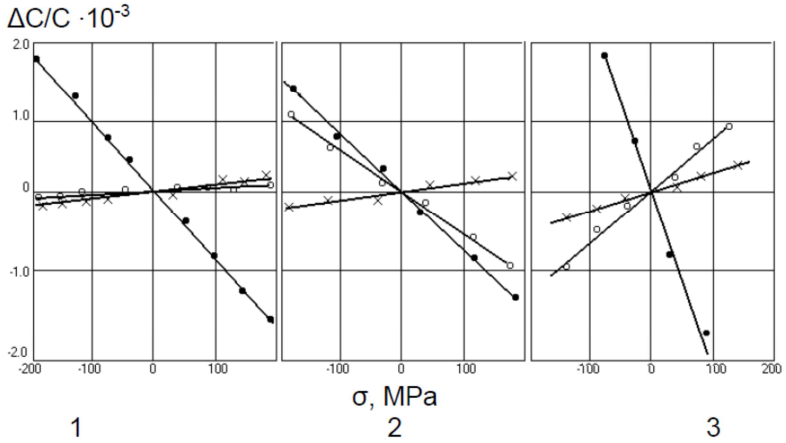
Malzeme içindeki kalıntı gerilmeler ses dalgalarının ilerlemesine engel oluşturdukları için ses dalgalarının hızlarını yavaşlatırlar. Bu nedenle malzeme içerisinden ilerleyip arka yüzeyinden yansıyan ses dalgalarının gidiş geliş mesafesi kalıntı gerilme içermeyen bir malzemeye kıyasla daha farklı olur. Bu fark nano saniye mertebesinde olduğu için ölçülmesi için çok hassas cihazlar gerektirir.

Ultrasonik yöntem kullanılarak makro kalıntı gerilmeler malzeme derinliğinden bağımsız olarak bulunabilir.İzotropik olmayan malzemelerde yöne bağlı olarak ses hızları değişebildiğinden dolayı bu bölgelerden alınan uçuş süresi farklılıklarını ayırt etmek zordur.

Çizelge 4.3 : Nötron ışınımı yönteminin özellikleri [55].

Yöntemin Tipi	Tahribatsız ve temassız
Standartlar	Yöntem ile ilgili bir ölçüm standardı mevcut değil
Ölçülebilen Kalıntı Gerilme Tipi	Tip I (Makro Gerilmeler) ve Tip II (Mikro Gerilmeler)
Numune gereksinimleri ve hazırlama	Ölçüm sonucu malzenin yüzey durumu ve hazırlanması ile alakalı değildir.
Malzeme Tipi	Kristal yapıya sahip metaller ve seramikler
Ölçülen büyüklük	Atomik düzlemler arasındaki mesafe
Gerilme Durumu	Tek,iki ve üç eksenli ölçümler için uygun, katman kaldırma ile çeşitli gerilmeler ölçülebilir.
Çözünürlük	500 μm
Doğruluk	± 50 × 10e-6 şekil değişimi ± 30 Mpa
Nüfuz Etme Derinliği	En düşük nüfuziyet 1mm 200 mm (Aluminyum), 25 mm (Çelik), 4 mm (Titanyum)
Ölçüm zamanı	2 saat - 1 hafta
Cihaz Maliyeti	Çok pahalı
Ekipman taşınabilirliği	Laboratuvar uygulamaları için uygun, taşınamaz
Avantaj ve Dezavantajları	* Yüksek çözünürlük ve nüfuziyet * Ölçüm için uzmanlık gerektirir

Ayrıca mikroyapı değişikliklerinin olduğu bölgelerde de ses hızları değiştiğinden bu bölgelerde de bu farklılıkların ölçülmesi oldukça zorlaşmaktadır. Dalga hızlarının çekme ve basmaya maruz kalan çelik ve aluminyum alaşımlardaki değişimi Şekil 4.15'da görülebilir.Ultrasonik yöntemin özellikleri Çizelge 4.4'te görülebilir.



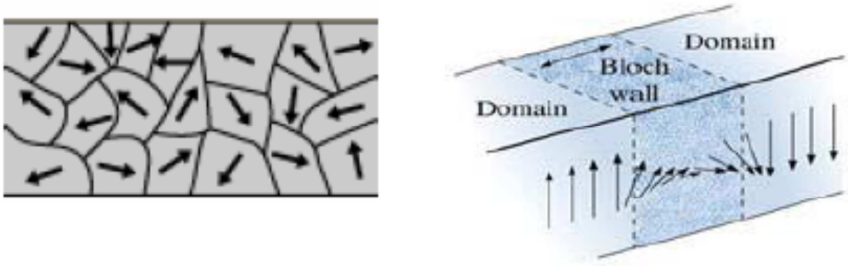
Şekil 4.15 : Dalga hızlarının malzemeye göre değişimi; (1-2) çelik, (3) alüminyum [56].

Çizelge 4.4 : Ultrasonik yöntemin özellikleri [55].

Yöntemin Tipi	Tahribatsız ve temassız
Standartlar	Yöntem ile ilgili bir ölçüm standardı mevcut değil
Ölçülebilen Kalıntı Gerilme Tipi	Tip I (Makro Gerilmeler), Tip II (Mikro Gerilmeler) ve Tip III (Mikro-atomik Gerilmeler)
Numune gereksinimleri ve hazırlama	Ölçüm sonucu malzenin yüzey durumu ve hazırlanması ile alakalı değildir.
Malzeme Tipi	Kristal yapıya sahip metaller ve seramikler
Ölçülen büyüklük	Ultrasonik dalgaların yansıma hızındaki değişim
Gerilme Durumu	Tek ve iki eksenli ölçümler için uygun.
Çözünürlük	5 mm
Doğruluk	10 - 20 MPa
Nüfuz Etme Derinliği	>10 cm
Ölçüm zamanı	Birkaç dakika
Cihaz Maliyeti	40.000 - 200.000 USD
Ekipman taşınabilirliği	Laboratuvar ve Endüstriyel uygulamalar için uygun
Avantaj ve Dezavantajları	* Düşük maliyetli ve hızlı bir yöntem * Malzemenin mikroyapısına çok hassas olduğu için uygulama alanı sınırlı

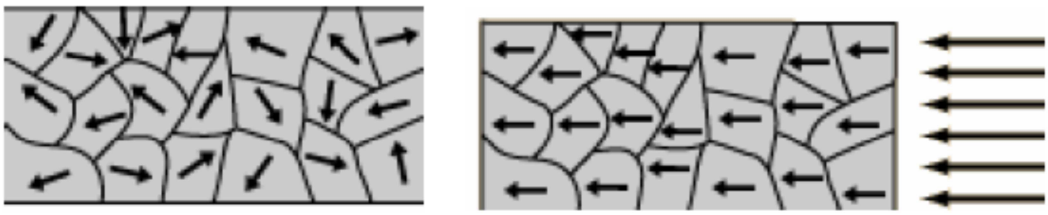
4.2.2.4 Barkhausen gürültüsü yöntemi

Barkhausen gürültüsü, ferromanyetik malzemeler içinde yer alan manyetik dipollerin hareket etmesi veya yönlenmesi sonucunda ortaya çıkan ses sinyalleridir. Şekil 4.16'da görüldüğü gibi ferromanyetik malzemler içlerinde manyetik dipollerin oluştuğu küçük bölgelerden oluşurlar. Bu bölgelere domen adı verilir. Domenler birbirlerinden domen duvarları sayesinde ayrılırlar. Domenler ferromanyetik malzeme içinde mıknatıslanmanın homojen olarak dağıldığı bölgelerdir ve boyutları yaklaşık 0.1 mm'den birkaç mm'ye kadar değişebilir. Bu bölgeler içerisinde, yaklaşık 10^{12} – 10^{18} adet manyetik dipol aynı yönde yönlenerek domen sınırlarını belirlerler. İki ayrı domen birbirlerinden domen duvarları ile ayrılır. Domenler içindeki iki farklı yöne yönlenmiş olan manyetik dipoller bu duvarlar içerisinde birinden diğerine doğru yön değiştirirler.



Şekil 4.16 : Ferromanyetik malzeme içerisindeki domenler ve manyetik dipoller.

Ferromanyetik malzemeler mıknatıslanmadan önce manyetik dipoller, domenler içerisinde karışık ve dağınık bir şekilde yönlenmiş halde bulunurlar. Bu sırada net manyetik alan şiddeti sıfırdır. Dışarıdan bir kuvvet veya manyetik alan uygulanmaya başlandığında başlangıçta dağınık halde bulunan manyetik dipoller uygulanan kuvvet veya manyetik alan yönünde dönmeye başlarlar (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 : a) Domenler dağınık durumda yönlenmiş b) manyetik alan uygulandıktan sonra domenler düzgün yönlenmiş.

Bu yöntem bir malzemenin mıknatıslanma sırasında oluşturduğu manyetik gürültüyü analiz ederek bir ölçüm yapar. Ölçüm derinliği 10 mm'ye kadar ulaşabilir. Malzeme geometrisine göre özel olarak hazırlanabilen problar aracılığı ile malzeme mıknatıslanırken aynı anda malzeme üzerinden ölçüm alınır. Bu ölçümler manyetik parametre cinsindendir. Ölçülen bu değerlerin gerilim değerlerini bulabilmek için ise ölçümleme eğrileri kullanılır. Bu eğriler ölçüm yapılacak malzemeyle aynı malzemeden imal edilerek bilinen gerilimlere karşılık gelen manyetik parametre değerleri bulunarak oluşturulur. Daha sonra bu eğriler kullanılarak parça içerisindeki kalıntı gerilmeler elde edilebilir.

Çizelge 4.5 : Barkhausen gürültüsü yönteminin özellikleri [55].

Yöntemin Tipi	Tahribatsız ve temassız
Standartlar	Yöntem ile ilgili bir ölçüm standardı mevcut değil
Ölçülebilen Kalıntı Gerilme Tipi	Tip I (Makro Gerilmeler), Tip II (Mikro Gerilmeler) ve Tip III (Mikro-atomik Gerilmeler)
Numune gereksinimleri ve hazırlama	Ölçüm sonucu malzenin yüzey durumu ve hazırlanması ile alakalı değildir.
Malzeme Tipi	Kristal yapıya sahip ferromanyetik malzemeler
Ölçülen büyüklük	Ultrasonik dalgaların yansıma hızındaki değişim
Gerilme Durumu	Tek ve iki eksenli ölçümler için uygun.
Çözünürlük	1 mm
Doğruluk	10 - 20 MPa
Nüfuz Etme Derinliği	10 mm 20-300 μm (Barkhausen yöntemiyle)
Ölçüm zamanı	Birkaç dakika
Cihaz Maliyeti	10.000 - 60.000 USD
Ekipman taşınabilirliği	Laboratuvar ve Endüstriyel uygulamalar için uygun
Avantaj ve Dezavantajları	* Hızlı, taşınabilir * Sadece ferromanyetik malzemelerde kullanılır * Mikroyapıya çok hassastır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1 İş Parçasının Malzemesi ve Taşlama

Kalın camsı metal malzemenin taşlama sonrası delik delme yöntemiyle kalıntı gerilmelerin ölçülmesi amacıyla yapılan bu çalışmada 10 mm çapında ve ark eritme yöntemiyle yüksek saflıkta yüksek saflıkta üretilen $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ bileşimine sahip Zr-esaslı kalın camsı metal malzeme kullanılmıştır. Kullanılan Zr-esaslı kalın camsı metalin mekanik ve ısıl özellikleri Çizelge 5.1'de görülebilir.Bu çalışmada kullanılan 10 mm çapındaki Zr-esaslı kalın camsı metal malzeme Şekil 5.1'de görülebilir.

Çizelge 5.1 : Zr-esaslı kalın camsı metal numunenin mekanik ve ısıl özellikleri.

Elastisite modülü (GPa)	Sertlik (HRA)	Poisson oranı	Pekleşme üsteli	Çekme dayanımı (MPa)	Kırılma tokluğu ($Mpa.m^{1/2}$)	Kopma uzaması (%)
96	77	0,36	~0	1900	40-55	2 (elastik)



Şekil 5.1 : Zr- esaslı kalın camsı metal çubuk.

10 mm çapında ve 100 mm'de uzunluğundaki kalın camsı metal çubuk 25 mm uzunluğunda olucak şekilde Şekil 5.2'de görülen Metkon Micracut 150 hassas kesme makinesinde elmas disk kullanılarak kesilmiştir. Kesme işlemi ile numunelere ilave kalıntı gerilme ilave etmemek için işlem düşük kesme hızlarında ve suile soğutularak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2 : Micracut 150 hassas kesme makinesi.

Kalın camsı metal numune İTÜ Makina Fakültesinde bulunan Spinner VC650 CNC kontrollü dik işleme merkeziyle (Şekil 5.3) gerçekleştirilmiştir.

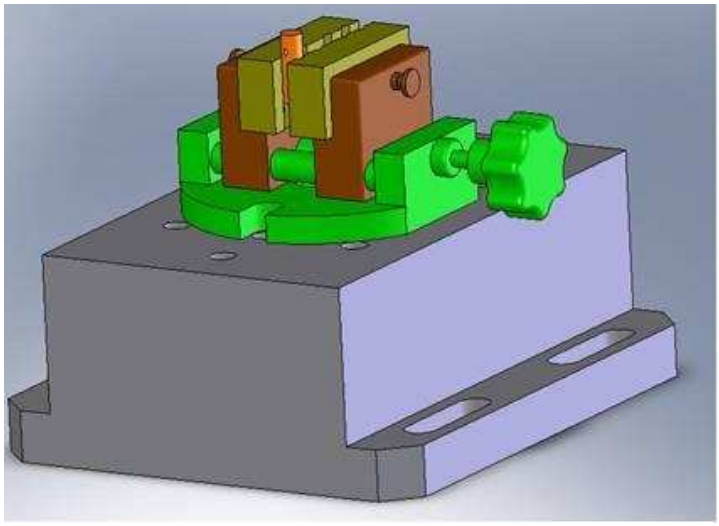


Şekil 5.3 : Taşlamanın yapıldığı spinner dik işleme merkezi.

Taşlama işlemi CBN aşındırıcılı çanak taşlar kullanılarak ve 10 mm çapındaki Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin Şekil 5.4'te gösterilen tutucu ile tezgaha bağlanması ile gerçekleştirilmiştir.

Taşlamada kullanılan CBN aşındırıcılı taşlama taşı bağ malzemesi olarak reçine kullanmaktadır. Kullanılan taşın özellikleri Çizelge 5.2'de görülebilir.

Taşlama taşları tezgaha bağlandıktan sonra salgılarının alınmasıbir taş düzeltme işlemi uygulanmıştır. CBN aşındırıcılı taşların düzeltilmesi ve bilenmesi iki ayrı işlemle yapılmıştır. CBN taşların düzeltilmesi için tek uçlu elmas düzeltme takımı kullanılmıştır.



Şekil 5.4 : İş parçasının tezgaha bağlanmasında kullanılan tutucu.

Düzeltme işleminden sonra CBN taşlama taşının salgısı yaklaşık 1μm değerine kadar düşürülmüştür. Fakat elmas ile düzeltme işlemi sırasında CBN aşındırıcı tanelerin köreldikleri ve taş yüzeyinin düzleştiği için bu işlem sonrasında alüminyum oksit taşlarla bileme işlemi yapılmıştır. Bu işlem sonrasında tanelerin etrafındaki bağlayıcılar kaldırılarak, taş yüzeyleri daha da açılmıştır.

Çizelge 5.2 : Taşlamada kullanılan CBN taşın özellikleri.

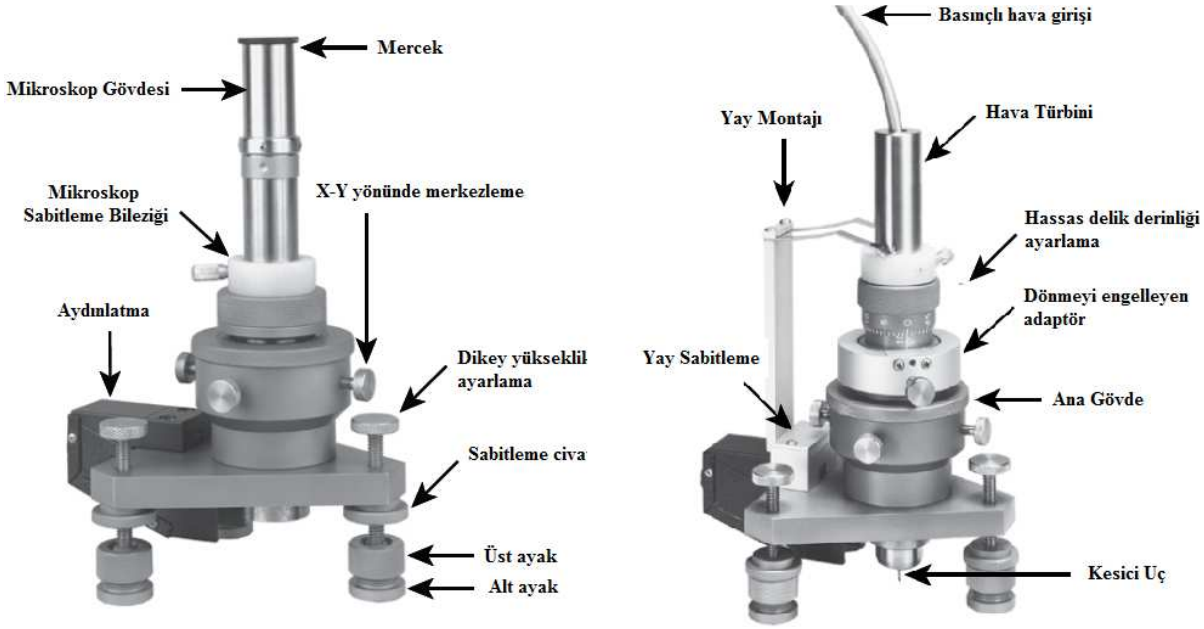
CBN Taşın Özellikleri	
Dış Çap (mm)	100
İç Çap (mm)	88
Tane Boyutu	B91
Konsantrasyon	100
Bağ Malzemesi	Reçine

5.2 Kalıntı Gerilme Ölçüm Düzeneği

Bu çalışma kapsamında 10 mm çapındaki Zr-esaslı çubuk şeklindeki kalın camsı metal malzeme 2000 dev/dak anamil hızı, 1000 mm/dak ilerleme hızı ve 0.01 mm paso kalınlığı ile CBN taş kullanılarak kuru olarak işlendikten sonra işleme yapılan parça yüzeyinde kalıntı gerilme ölçümü yapılmıştır.

Dördüncü bölümde bahsedilen kalıntı gerilme ölçüm yöntemlerinden numune boyutunun küçük olması, Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin amorf yapıya sahip olmasından dolayı en uygun kalıntı gerilme ölçüm yöntemiyarı tahribatlı bir yöntem

olan delik delme yöntemi seçilmiştir. Bu kararda en belirleyici husus Zr-esaslı kalın camsı metalin sahip olduğu amorf yapısı x-ışını kırınımı gibi kristal yapıya sahip malzemelerin atomik düzlemler arası mesafenin değişimi ile kalıntı gerilmenin hesaplanmasını mümkün kılan tahribatsız yöntemlerin kullanılmasını engellemiştir. Ayrıca bu çalışma için temin edilen Zr-esaslı kalın camsı metal numunelerin 10 mm çapında çubuk şeklinde olması tahribatlı yöntemlerden halka çekirdeği yöntemi, kontur yöntemi ve derin delik delme yöntemlerinin kullanılmasını engellemiştir. Sahip olunan bu kısıtlardan dolayı bu çalışmada delik delme yöntemi kullanılmıştır.Şekil 5.5'te Vishay RS-200 kalıntı gerilme ölçüm cihazı görülmektedir.



Şekil 5.5 : Vishay RS-200 kalıntı gerilme ölçüm cihazı [59].

Delik delme yöntemi yarı tahribatlı bir yöntem olarak tanımlanmaktadır ve ekipmanın ve sistemin basitliği, hızlı olması ve ucuz olması nedeniyle en yaygın olarak kullanılan kalıntı gerilme ölçme yöntemidir. Ayrıca delik delme ile kalıntı gerilme ölçümü ASTM tarafından E837-01 numarası ile standartlaştırılmıştır. Bu ölçme standardını sağlayan bir takım ölçüm cihazları ticari olarak mevcuttur. Bu çalışmada Vishay tarafından üretilen RS-200 delik delme ile kalıntı gerilme cihazı kullanılmıştır. Vishay RS-200 kalıntı gerilme ölçüm cihazı bu çalışma kapsamında İTÜ Makina Fakültesi envanterine dahil edilmiş ve sonraki çalışmalarda farklı malzeme ve durumlarda kalıntı gerilme ölçümlerinin alınabilmesi mümkün olmuştur.Delik delme yöntemi kalıntı gerilme ölçümü yapılacak olan yüzeye kalıntı

gerilme için ortasına delik delinebilecek şekilde özel üretilen Şekil 5.7'de gösterilen gerinim ölçerlerin yapıştırılması ve sonrasında Vishay RS-200 kalıntı gerilme cihazı kullanılarak yüksek delik delme hızlarıyla malzemede ilave kalıntı gerilme oluşturmadan delik delinmesi ve delik delinmesi ile açığa çıkan şekil değişimlerinin ölçülerek kalıntı gerilmenin hesaplanmasından oluşur. Çalışma sırasında gerinim ölçerler Şekil 5.6'da gösterilen Vishay P3 gerinim göstericiye bağlanarak kademeli delik delinme işlemi süresince ölçülen gerinimler sürekli olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.6 : Vishay P3 gerinim gösterici [59].

Delik delme işlemiyle kalıntı gerilme ölçümünde 10 mm çapında Zr-esaslı kalın camsı metal malzemde kalıntı gerilme ölçümleri yapılacağı için sahip olunan küçük boyutlara uygun Şekil 5.7'de görülen delik delme yöntemiyle kalıntı gerilme ölçümleri için özel üretilen Vishay EA-XX-031RE-120 gerimim ölçerleri kullanılmıştır. Vishay EA-XX-031RE-120 gerinim ölçerleri sahip oldukları küçük boyutlarından dolayı gerinim ölçerin merkezinde bulunan 0.8 mm çaplı deliğin hassas olarak delinmesi gerekmektedir. Küçük gerinim ölçer boyutlarından dolayı deliğin ekseninin gerinim ölçere göre kaçıklığı ölçüm hatasını ciddi ölçüde arttırmaktadır.

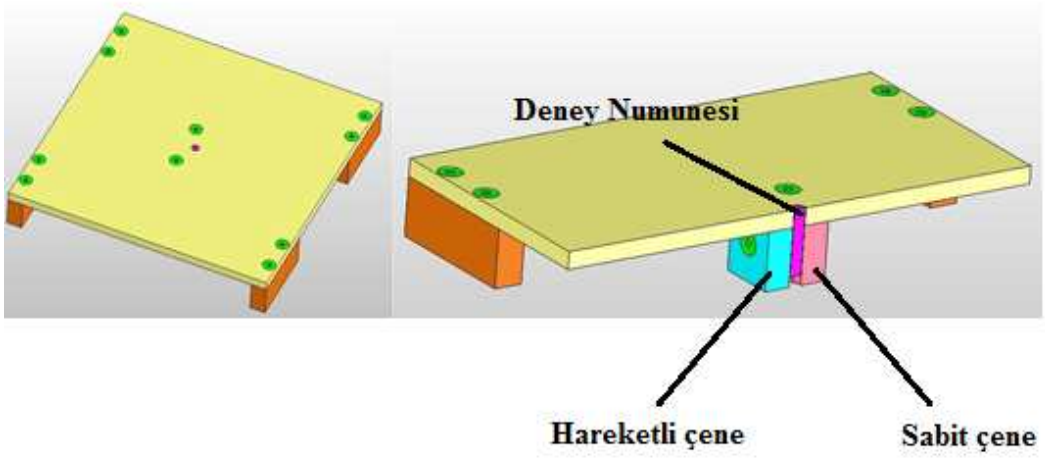
Bu çalışmada kullanılan RS-200 cihazı delik delinmesinden önce cihazın üzerindeki mikroskop ile eksenel kaçıklık en fazla 0.025 mm olucak şekilde merkezleme

yapılabilmektedir. Buda ölçüm hatasını en fazla 3 % olarak yapılan çalışmalarda gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : Vishay EA-XX-031RE-120 gerinim ölçer [59].

Bu çalışmada kullanılan Zr-esaslı kalın camsı metal malzeme 10 mm çapında çubuk şeklinde olduğu için malzemenin yüzeyine gerinim ölçerken ve yüksek hızda delik delme işlemi gerçekleştirilirken sabitlenmesi gerekmektedir. Ölçüm hassasiyeti için delinen deliğin eş merkezliliği ve dikliği çok önemlidir. Yüksek hızda delik delinirken malzemenin hareket etmemesi gereklidir bu nedenle Şekil 5.8'de görülen tutucu tasarlanılarak alüminyum lama ve plakalardan İTÜ Makina Fakültesi talaşlı imalat atölyesinde üretilmiştir.



Şekil 5.8 : Ölçüm sırasında deney numunesi sabitlemek için kullanılan tutucu.

Tutucu aynı zamanda Vishay RS-200 kalıntı gerilme ölçüm cihazının üzerine sabitlenmesi içinde kullanılmaktadır. Kalıntı gerilme ölçümü sonrasında delinen deliğin gerinim ölçerin üzerinde bulunan delik ile eş merkezli olup olmadığı ve delinen delik çaplarının kontrolü Şekil 5.9'da görülen Nikon SMZ800 optik mikroskopu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Şekil 5.10'da kalıntı gerilme ölçme deney düzeneğinin tamamı görülebilir.



Şekil 5.9 : Nikon SMZ800 optik mikroskopu.



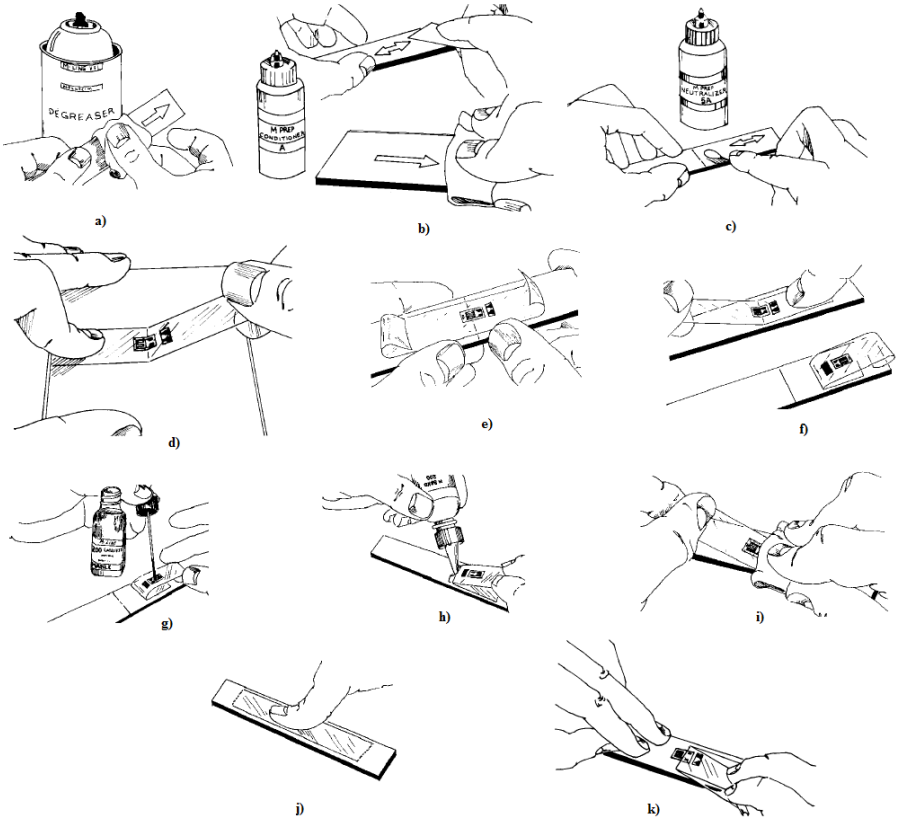
Şekil 5.10 : Kalıntı gerilme ölçüm deney düzeneği.

5.3 Kalıntı Gerilme Ölçümü İşlem Adımları

Delik delme yöntemi kullanılarak kalıntı gerilme ölçümü toplamda dört adımda gerçekleştirilmektedir. Bunlar sırasıyla kalıntı gerilme ölçümü yapılacak yüzeye gerinim ölçerin yapıştırılması, gerinim ölçere kabloların lehimlenmesi, Vishay RS-200 ve P3 gerinim gösterici kullanılarak artımlı olarak delik delinmesi ve gerinim ölçülmesi ve son olarakta delik delinmesi sonucu ortaya çıkan ölçülen gerinimler kullanılarak kalıntı gerilmenin hesaplanmasıdır.

5.3.1 Gerinim ölçerin yapıştırılması

Gerinim ölçerin yapıştırılması sağlıklı bir ölçüm alınabilmesinin ilk adımıdır. Gerinim ölçer Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin yüzeyine yapıştırılmadan önce pleksiglas malzemeden bir levha üzerine yapıştırılması gerekir ayrıca Zr-esaslı kalın camsı metal çubuk şeklindeki malzeme Şekil 5.8'de gösterilen tutucuya sabitlenir.Gerinim ölçerin yapıştırılma adımlarının şematik gösterimi Şekil 5.11'de görülebilir. Gerinim ölçer pleksiglas levhaya yapıştırılmadan önce yüzey iyice yağ çözücü ile temizlenir.



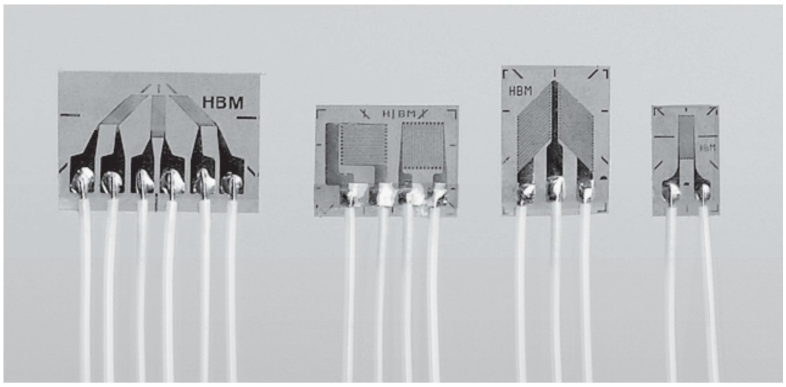
Şekil 5.11 : Gerinim ölçer yapıştırma işlemi [59].

Yüzeyin temizliğine göre bu işlem tekrarlanabilir. Sonrasında gerinim ölçerin lehim yapılacak yüzeyi üstte kalacak şekilde bırakılır ve yaklaşık 10 cm uzunluğunda yapıştırma bandı üzerine hava boşluğu kalmayacak şekilde yapıştırılır. Sonrasında gerinim ölçerin yapıştırılacağı Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin yüzeyi sırasıyla 220, 320 ve 400 numaralı zımparalar ile zımparalanır. Gerinim ölçerin yapıştırılacağı yüzeyin iyi bir yapışma olması için pH 7 olması gerekir. Bunu sağlayabilmek için yüzeyeasidik özelliğe sahip şartlandırıcı adı verilen bir kimyasal sürülerek zımpara işlemi tekrarlanır. Zımparalama sonrası yüzeyde kalan şartlandırıcının pamuklu kuru bir bezle iyice temizlenmesi ve yüzeyde kurumaması sağlanır. Gerinim ölçerin yapıştırılacağı Zr-esaslı kalın camsı metalin yüzeyine 4H kurşun kalem ile gerinim ölçerin istenen konumda yapıştırılmasına yardımcı olacak çizgiler çizilir. Sonrasında bu çizgiler nötürleştirici adı verilen kimyasal ile temizlenir. Nötürleştirici yüzeyin istenen pH değerine gelmesini sağlar sonrasında yüzey iyice kurulanır. Önceden pleksiglas yüzeyine yapıştırılmış olan gerinim ölçer bu yüzeyden bant yatayla 45° açı olacak şekilde kaldırılır. Sonrasında gerinim ölçer üzerindeki çizgiler ile yapıştırılacak olan parça üzerindeki çizgiler denk getirilerek parça yüzeyine yapıştırılır. Gerinim ölçer yapıştırıldıktan sonra yatayla 45° açı olacak şekilde kaldırılarak gerinim ölçerin altına bir damla M-Bond 200 gerinim ölçer yapıştırıcısı uygulanır. Sonrasında gerinim ölçerin altına fırça ile yapıştırıcının katalizörü sürülür. Yapışma işlemi basınç ve sıcaklık ile gerçekleştiği için yapıştırıcı ve katalizör uygulandıktan sonra parmak ile 2 dakika gerinim ölçer üzerine bastırmak gereklidir. Ortam sıcaklığının düşük olduğu durumlarda bu süre daha uzun tutulmalıdır. Yapıştırma işlemi böylece tamamlanmış olur ve sonrasında bant yavaşça kaldırılır ve gerinim ölçer kablo lehimleme için hazırdır.

5.3.2 Kablo lehimleme

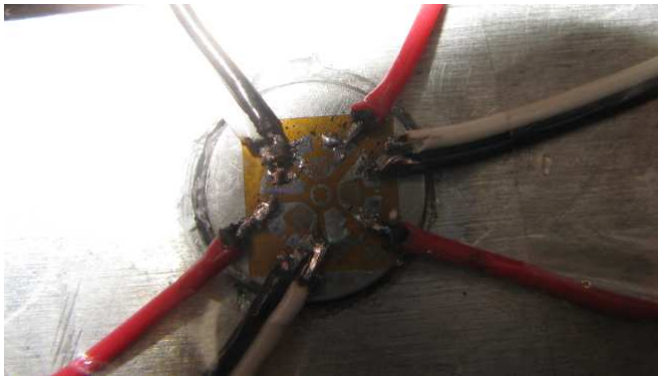
Fikstüre bağlanan 10 mm çapındaki Zr-esaslı kalın camsı metal malzemeye gerinim ölçer yapıştırıldıktan sonra ölçümün yapılabilmesi için gerinim ölçerin üzerine gerinim ölçeri gerinim göstericiye bağlayacak kabloların lehimlenmesi gerekmektedir. Lehimleme işlemi bu yöntemin en zorlayıcı adımıdır. Zr-esaslı kalın camsı metal numunenin çapının 10 mm olması Şekil 5.7'de gösterilen Vishay EA-XX-031RE-120 gerinim ölçerin kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Kullanılan gerinim ölçerin boyutlarının çok küçük olması zor olan lehimleme işlemini daha da zor hale getirmiştir. İşlemi zorluğunu ortadan kaldırmak için Şekil 5.12'de görülen kendinden

kablolu gerinim ölçerlerin kullanılması düşünülmüş ancak bu kadar küçük boyutlar için kendinden kablolu gerinim ölçerlerin üretilmediği görülmüştür.



Şekil 5.12 : Kendinden kablolu gerinim ölçerler.

İlk lehimleme çalışmalarında 60W gücünde sıcaklık kontrollü olmayan el tipi havya ve gerinim göstericiye bağlanacak kablolar doğrudan gerinim ölçerin üzerine lehimlenmeye çalışılmıştır. Kablo kalınlıklarının çok kalın olması ve havyanın sıcaklık kontrollü olmayışı gerinim ölçerin üç gridinden birinde temassızlık problemine sebep olmuştur. İlk yapılan lehimle Şekil 5.13'te görülebilir, şekilde görüldüğü gibi kabloların kalın olması ve özellikle gerinim göstericide üç kablo girişinin gerinim ölçerde iki kabloya dönüşmesi siyah ve beyaz kabloların birleştirilerek lehimlenmesini gerekli kılmış buda kablo kalınlıklarından dolayı lehimleme yüzeyinde ayrılmaya sebep olmuştur. Karşılaşılan diğer problem ise kalem havyanın sıcaklık kontrollü olmamasından dolayı sürekli ısınma sonucu gerinim ölçerin yapıştırıcısının özelliğini yitirmesi ve gerinim ölçerin kalkmasıdır.



Şekil 5.13 : Kalın kablolar kullanılarak yapılan kablolehimleme işlemi.

Gerçekleşen başarısız lehimleme sonrasında probleme sebep olan kalın kabloların ve kalem havyanın değiştirilmesine karar verilmiştir. Sonraki lehimleme işlemi Şekil 5.15'de gösterilen sıcaklık kontrollü 16 W gücünde Ersa kalem havya, ince teller ve

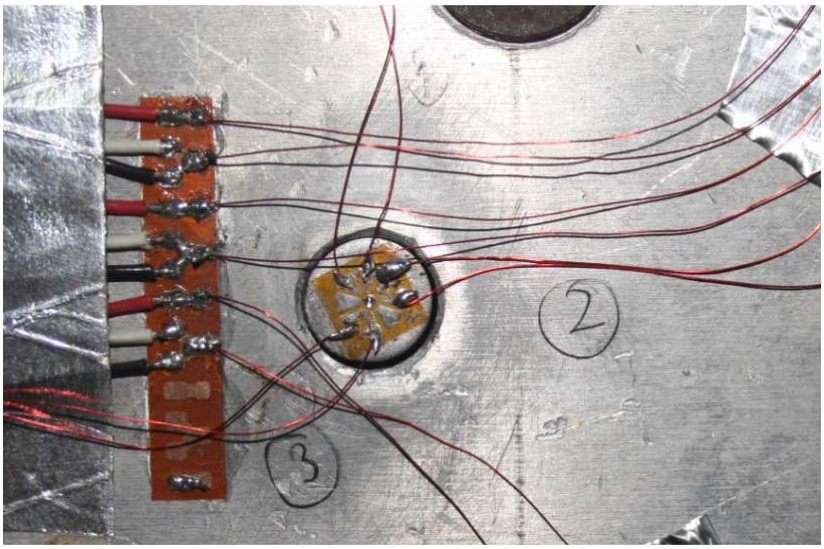
tellerin gerinim göstericide kullanılacak kalın kablolara geçişi sağlayan terminal kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu lehimleme işlemi başarı ile sonuçlanmış ve her bir terminal ve grid üzerinde 120 ohm olan direnç multimetre kullanılarak Şekil 5.14'te görüldüğü gibi okunmuştur. Multimetre ile yapılan bu kontrol lehimleme işleminin başarılı olarak yapıldığını göstermektedir.



Şekil 5.14 : Multimetre kullanılarak lehimleme kontrolü.



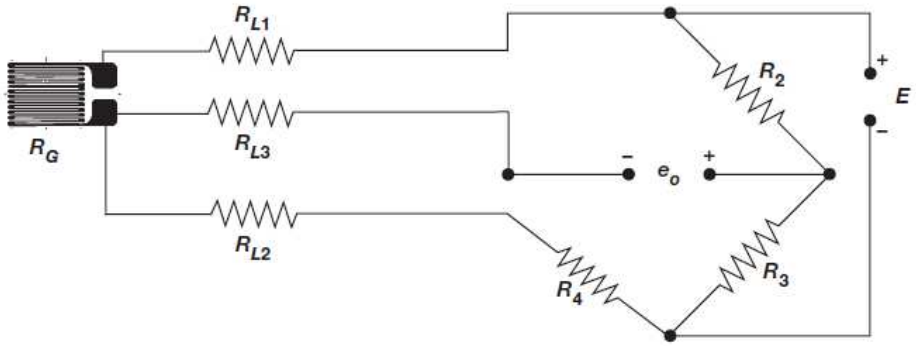
Şekil 5.15 : Ersa 16 W sıcaklık kontrollü kalem havya.



Şekil 5.16 : Başarıyla gerçekleştirilen lehimleme işlemi.

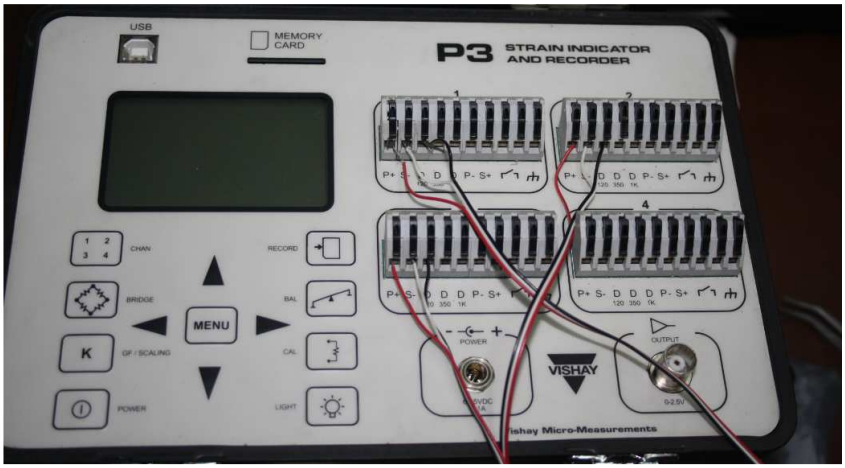
Lehimleme işlemi sonrası delik delme işlemi öncesi lehimlenen kablolar çeyrek wheatstone köprüsü olacak şekilde Şekil 5.17'de gösterildiği gibi gerinim

göstergecine bağlanır. Şekil 5.17'de gösterilen gösterimle R_{L1} gerinim gösterici üzerinde P+, R_{L2} S- ve R_{L3} ise D120 girişlerine bağlanır.



Şekil 5.17 : Çeyrek Wheatstone köprüsü [59].

Gerinim ölçer üzerindeki çeyrek wheatstone köprüsü şeklindeki bağlantı şekli Şekil 5.18'de görülebilir. Bağlantılar tamamlandıktan sonra gerinim gösterici açılarak ilk üç kanal aktif hale getirilir ve her bir kanal için gerinim ölçerin faktörleri girilir, her bir kanal için çeyrek wheatstone köprüsü tanımlaması yapılır ve son olarak her bir kanal sıfırlanarak ölçüme hazır hale getirilir.

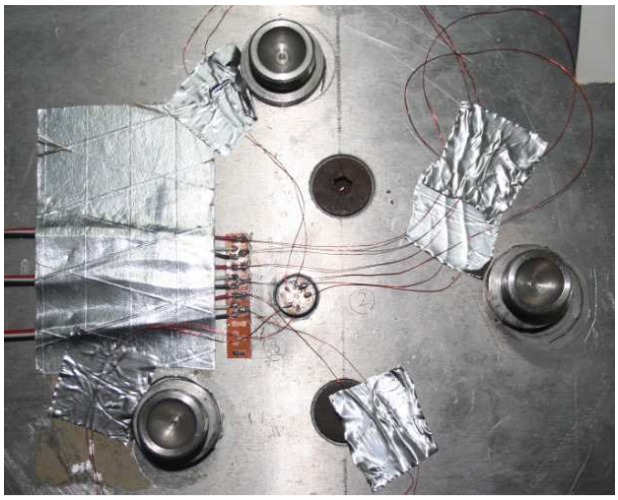


Şekil 5.18 : Gerinim gösterici üzerinde çeyrek wheatstone köprüsü bağlantısı.

5.3.3 Delik delme ve gerinim ölçümü

Gerinim ölçer yapıştırılması, kabloların lehimlenmesi ve bağlantıların tamamlanmasından sonra delik delme ve gerinim ölçümü gerçekleştirilebilir. İlk işlem olarak hareketli alt ayakların yeri şablon kullanarak belirlenir ve sonrasında hareketli ayaklar delik delme işlemi sırasında titreşim nedeniyle kaymayı engellemek için Şekil 5.19'da görüldüğü gibi tutucunun yüzeyine yapıştırılır.Alt ayakların yeri

belirlendikten sonra Vishay RS-200 delik delme cihazı alt ayakların üzerine monte edilir. Sonrasında cihaza mikroskop takılarak, aydınlatıcı kullanılarak, gerinim ölçerin merkezi ile delik merkezinin eş merkezli olması için Şekil 5.20'de görüldüğü gibi merkezleme yapılır.



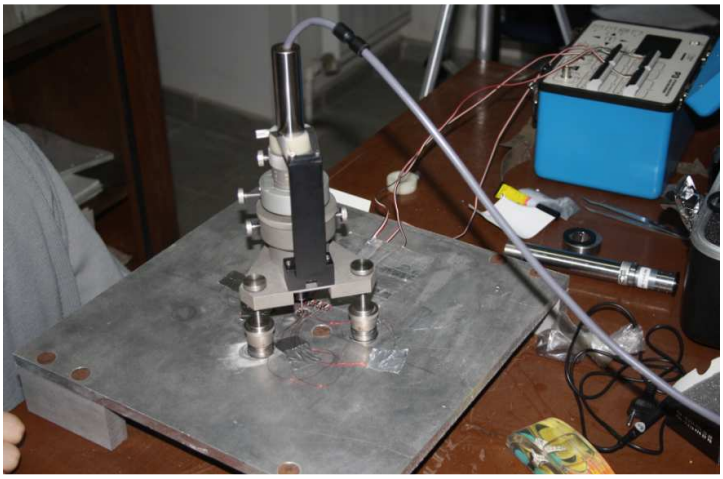
Şekil 5.19 : Alt ayakların siyanoakrilat yapıştırıcı ile tutucu yüzeyine yapıştırılması.



Şekil 5.20 : Mikroskop kullanılarak delinecek deliğin gerinim ölçer merkezine merkezlenmesi.

Delik delme öncesi merkezleme işlemi ölçüm doğruluğu açısından çok önemlidir. Vishay RS-200 yüksek hızlı delik delme yöntemi ile ± 0.025 mm toleransında merkezleme yapılabilmektedir. Yapılan çalışmalar bu merkezleme hatasının en fazla % 3 ölçüm hatasına sebep olduğunu belirlemişlerdir. Bu % 3'lük hata metallerde yaklaşık ± 20 MPa kalıntı gerilme ölçüm hatasına denk gelmektedir. Merkezleme sonrası konum merkezleme civatası sıkılarak sabitlenir. Merkezleme işlemi sonrası 400.000 d/d delik delme işlemi yapabilen hava türbinli matkap ile

gerçekleştirilmiştir. Kesici ucun çapı EA-XX-031RE-120 gerinim ölçere uygun olan 0.8 mm çapındaki elmas uçtur. Sert malzemelerden kalıntı gerilme ölçümleri için elmas uçlar uygunken daha düşük serlikteki aluminyum ve düşük alaşımlı çelikler için karbür uç kullanılabilir. Kesici elmas uç yüksek hızlı hava türbinli matkaba takıldıktan sonra matkap Şekil 5.21'de görüldüğü gibi cihazın üzerine monte edilir. Matkap cihaza bağlandıktan sonra matkap basınçlı hava ile tahrik edildiği için hava bağlantıları yapılır ve Şekil 5.22'de gösterilen basınç regülatörü hava kompresöründen gelen havanın basıncını 3.5 bar'a getirecek şekilde ayarlanır. Ayarlanan 3.5 bar hava basıncı Şekil 5.23'te görülen ayak pedalına basılıp matkap dönmeye başladığında 3 bar'a düşmektedir ve 3 bar'lık hava basıncı matkabı hava türbini sayesinde 400.000 d/d hıza çıkmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.21 : Yüksek hızlı hava türbinli matkabın monte edilmesi.

Yüksek hızda delik delme işleminin avantajı ölçüm yapılan parçaya delik delme kaynaklı en az kalıntı gerilme vermektir.



Şekil 5.22 : Hava basıncı regülatörü.

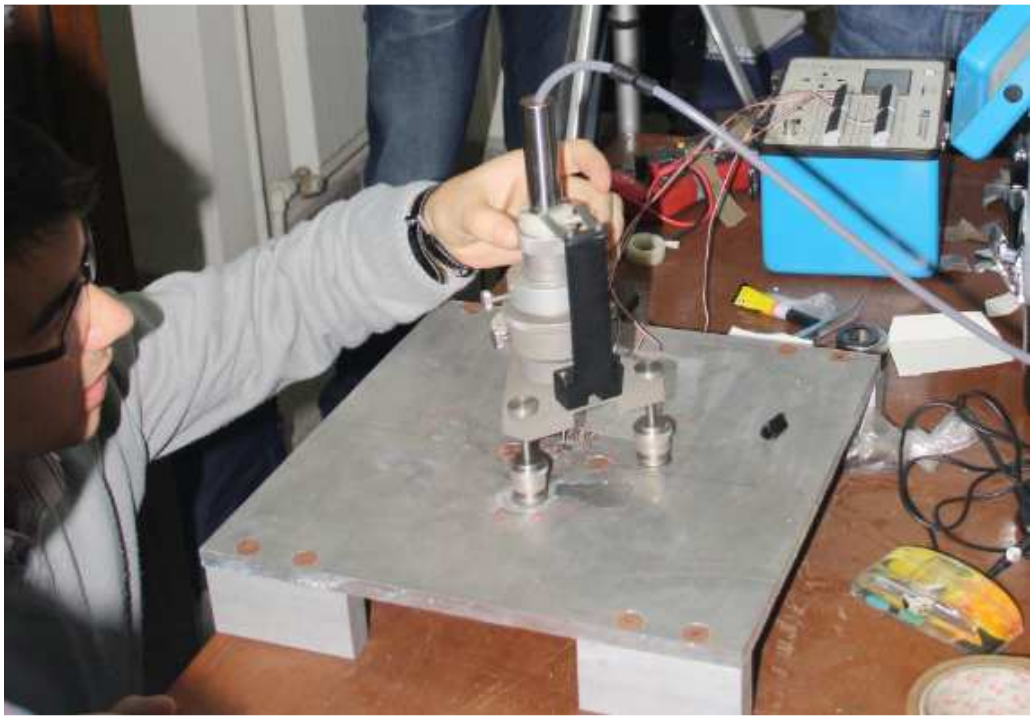
Hava bağlantıları da tamamlandıktan sonra sistem delik delme işlemi için hazırdır. Delik delme işlemi 20µm olarak kademeli gerçekleşeceği ve her bir kademede

gerinim ölçümü yapılacağı için delik delme işlemi öncesi delik yüzeyinde Şekil 5.25'te görüldüğü gibi sıfırlama yapılır.

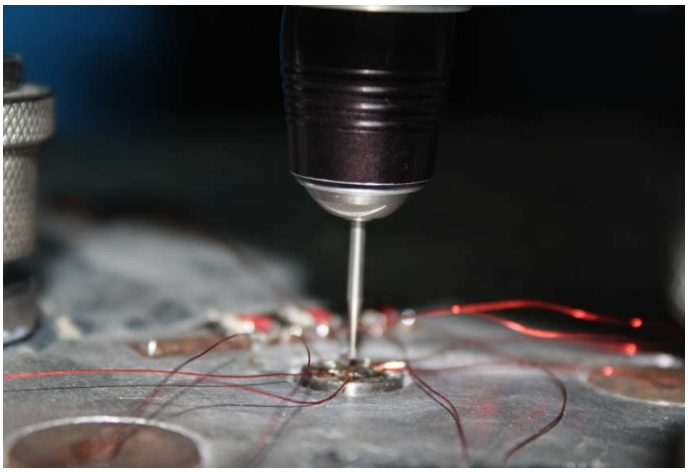


Şekil 5.23 : Yüksek hızlı havalı matkabın ayak pedalı ile kontrol edilmesi.

Sıfırlama sonrası Vishay RS-200 yüksek hızlı delik delme cihazının mikrometresi kullanılarak 20µm arttırımlarla Şekil 5.24'te görüldüğü gibi 1mm derinliğinde delik delinir ve her bir artımda ölçülen gerinim kaydedilir. Kaydedilen gerinim değerleri kullanılarak farklı yaklaşımlarla kalıntı gerilmeler hesaplanır.



Şekil 5.24 : Yüksek hızlı hava türbinli matkap kullanılarak kademeli delik delme.



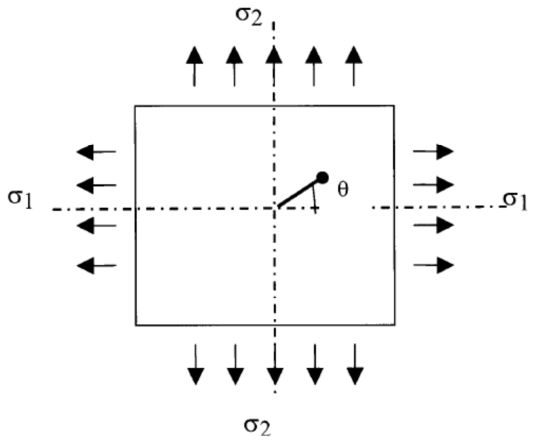
Şekil 5.25 : Delici ucun gerinim ölçer yüzeyine görekonumunun sıfırlanması.

5.4 Kalıntı Gerilmenin Hesaplanması

Şekil 5.26'da gösterilen sonsuz ölçülerdeki ince, elastik, homojen ve izotropik bir parçanın gerilme dağılım hali asal gerilmeler olarak şöyledir:

$$\sigma_r(ilk) = \left[\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}\right] + \left[\left(\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\right)\cos 2\theta\right] \quad \textbf{(5.1)}$$

$$\sigma_\theta(ilk) = \left[\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}\right] - \left[\left(\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\right)\cos 2\theta\right] \quad \textbf{(5.2)}$$



Şekil 5.26 : Deliksiz ince plakanın ilk gerilme hali [55].

Üstteki gerilme hali ve Hooke kanunu kullanılarak delik merkezinden (r) radial uzaklığında ve x- ekseninden saat yönünde θ açısında olan şekil değişimi şu şekilde ifade edilir;

$$\varepsilon_r(ilk) = \frac{1}{E}\left[(1-\nu)\left(\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}\right) + (1+\nu)\left(\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\right)\cos 2\theta\right] \quad \textbf{(5.3)}$$

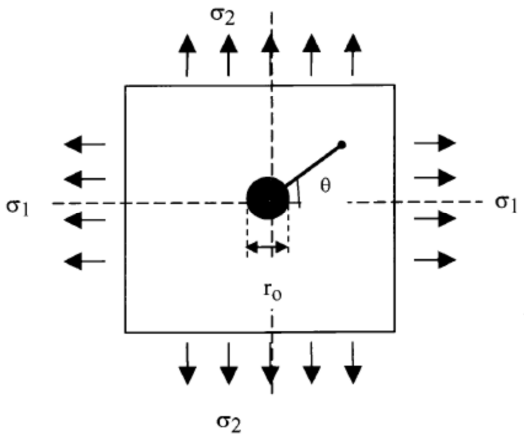
Denklemdeki ‘E’ elastiklik modülü, ‘ν’ Poisson oranı ve σ_1 ve σ_2 ise malzemedeki asal kalıntı gerilmeleri ifade etmektedir.

Aslında üstteki denklem 5.3’te kalıntı gerilme ve şekil değişimi arasındaki ilişki mevcuttur ancak ε_r ‘nin doğrudan ölçülmesi mümkün değildir. Bu nedenle ölçülebilen şekil değişimi ile malzemedeki kalıntı gerilme arasında bir ilişkinin oluşturulması gereklidir. Bunu gerçekleştirmenin basit bir yolu plakanın merkezine delik delmek ve açığa çıkan şekil değişimini ölçmektir.

Şekil 5.27’de gösterilen merkezine r_o yarıçapında kesintisiz bir delik delik delindiğinde Kirsch çözümü kullanarak, merkezinde delik olan bir plakanın gerilme hali şöyledir:

$$\sigma_r(son) = \left[\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}\right]\left[1-\left(\frac{r_0}{r}\right)^2\right] + \left[\left(\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\right)(\cos 2\theta)\right]\left[1+3\left(\frac{r_0}{r}\right)^4 - 4\left(\frac{r_0}{r}\right)^2\right] \quad \textbf{(5.4)}$$

$$\sigma_\theta(son) = \left[\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}\right]\left[1+\left(\frac{r_0}{r}\right)^2\right] - \left[\left(\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\right)(\cos 2\theta)\right]\left[1+3\left(\frac{r_0}{r}\right)^4\right] \quad \textbf{(5.5)}$$



Şekil 5.27 : Delikli ince plakanın son gerilme hali [55].

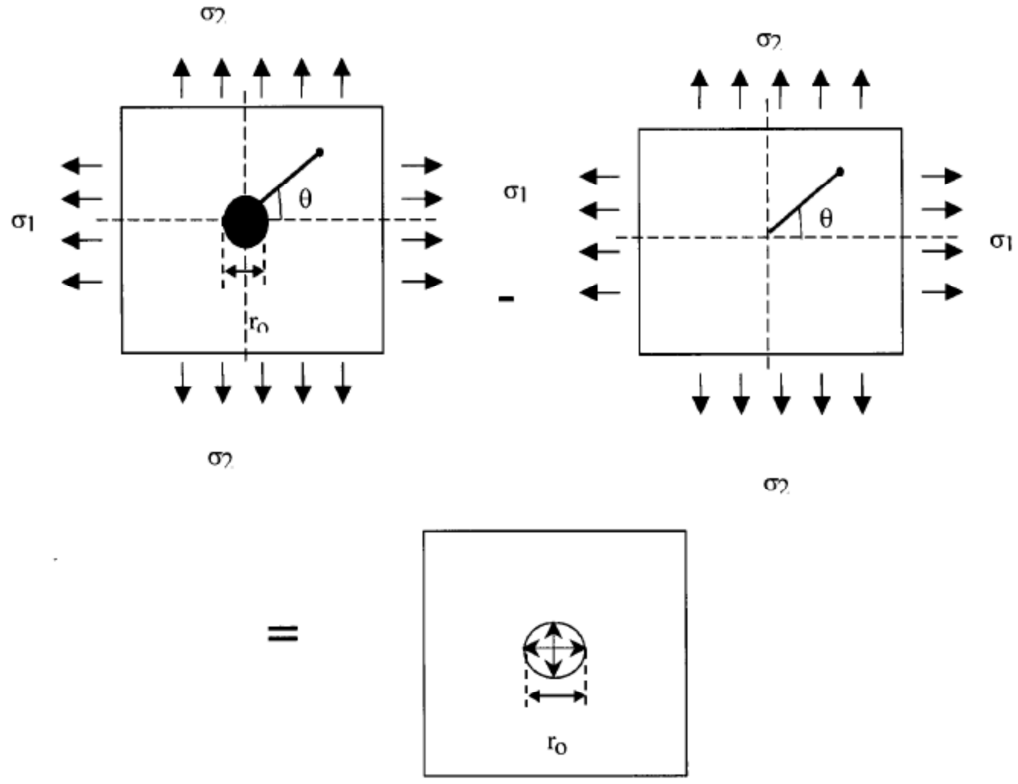
Üstteki gerilme hali ve Hooke kanunu kullanılarak delik merkezinden (r) radial uzaklığında ve x- ekseninden saat yönünde θ açısında olan şekil değişimi şu şekilde ifade edilir;

$$\varepsilon_r(son) = \frac{1}{E}\left\{\left[(1-\nu)-(1+\nu)\left(\frac{r_0}{r}\right)^2\right]\left[\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}\right] + \left[(1+\nu)-4\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 + \ldots 3(1+\nu)\left(\frac{r_0}{r}\right)^4\right]\left[\left(\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\right)(\cos 2\theta)\right]\right\} \quad \textbf{(5.6)}$$

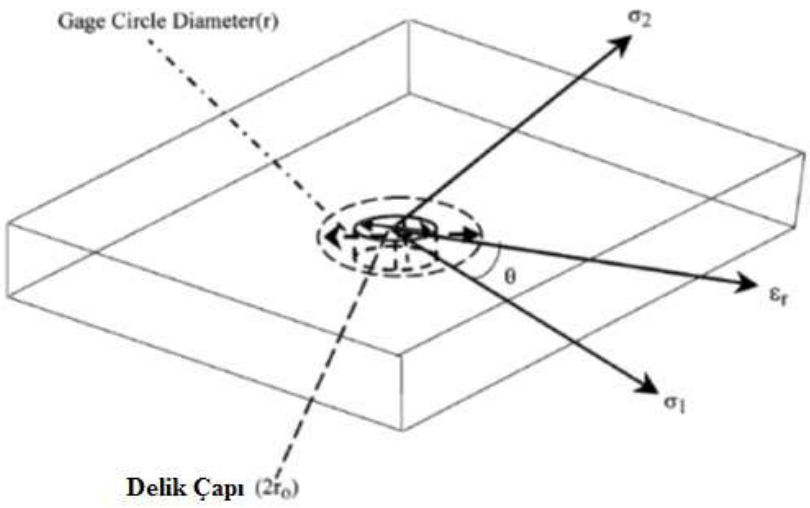
Şekil 5.28’te gösterildiği gibi delik delme ile açığa çıkan şekil değişimini elde etmek için delik delinmiş haldeki şekil değişimi deliksiz halden çıkarılabilir. Süperpozisyon

ilkesi kullanılarak delik delinmesi sonucu açığa çıkan şekil değişimi asal gerilmeler cinsinden şu şekilde elde edilir:

$$\varepsilon_r(\text{çıkan}) = -\frac{1}{E}\left\{\left[(1+\nu)\left(\frac{r_0}{r}\right)^2\left(\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}\right)\right] + \left[4\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 - 3(1+\nu)\left(\frac{r_0}{r}\right)^4\right]\left[\left(\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\right)(\cos 2\theta)\right]\right\} \qquad \textbf{(5.7)}$$



Şekil 5.28 : Kalıntı gerilme halinin grafiksel gösterimi [55].



Şekil 5.29 : Kalıntı gerilme hesaplanması için şekil değişimi ölçümü [55].

Denklem 5.7 gerinim ölçer ile şekil değişimlerinin ölçülerek kalıntı gerilmelerin hesaplanması için ana denklem olarak kullanılabilir.

Matematiksel olarak r_o çapında bir deliğin olduğu durumda, delik merkezine gore radyal 'r' konumundaki şekil değişimi şu şekilde gösterilir:

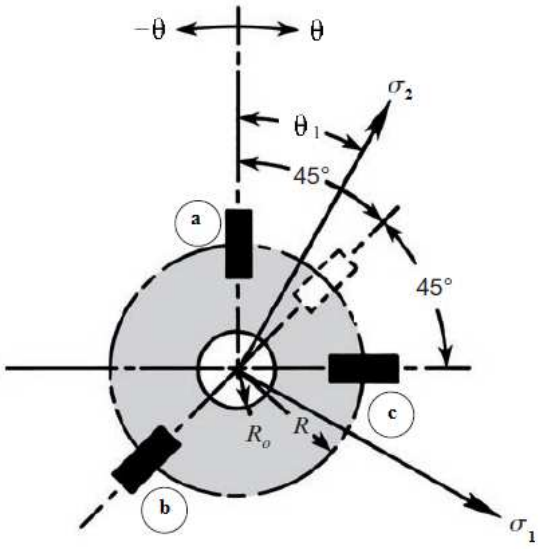
$$\varepsilon_r = A(\sigma_1 + \sigma_2) + B(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta \qquad \textbf{(5.8)}$$

Bu denklemde ε_r kesintisiz delik delme sonucu açığa çıkan şekil değişimi, σ_1 veσ_2 asal gerilmeleri, θ radyal konumun x-eksenine gore açısını, r delik merkezine gore radyal konumu, r_o delinen deliğin yarıçapını ve A,B ise kalibrasyon katsayılarını ifade etmektedir.

$$A = -\frac{1}{2E}(1+\nu)\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \qquad \textbf{(5.9)}$$

$$B = -\frac{1}{2E}\left[4\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 - 3(1+\nu)\left(\frac{r_0}{r}\right)^4\right] \qquad \textbf{(5.10)}$$

Üstteki denklemden üç tane bilinmeyen olduğu için bu denklemi çözmek için en az üç denkleme ihtiyaç olduğu görülebilir. Bu çalışmada kullandığımız özel rozet tipi Vishay EA-XX-031RE-120 gerinim ölçer ile delinen delik etrafında konumları bilinen üç farklı noktadan şekil değişimleri ölçülmektedir.



Şekil 5.30 : Kalıntı gerilme ölçümü için gerinim ölçer [59].

Böylece malzemedeki kalıntı gerilme hesaplanabilmektedir.Şekil 5.30'da olduğu gibi bu çalışmada kullanılan gerinim ölçerler 45° açıyla yerleştirildiğinde, ölçülen şekil değişimleri ve gerilmeler arasındaki ilişkiler şu şekilde ifade edilir:

$$\varepsilon_a = A(\sigma_1 + \sigma_2) + B(\sigma_1 - \sigma_2)\cos(2\theta) \quad \textbf{(5.11)}$$

$$\varepsilon_b = A(\sigma_1 + \sigma_2) + B(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad \textbf{(5.12)}$$

$$\varepsilon_c = A(\sigma_1 + \sigma_2) + B(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \quad \textbf{(5.13)}$$

Ölçüm sonucu elde edilen ε_a, ε_b ve ε_c kullanılıp denklem sistemi çözüldüğünde malzemedeki asal kalıntı gerilmeler şu şekilde elde edilir:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{4A} \pm \frac{\sqrt{2}}{4B}\sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \quad \textbf{(5.14)}$$

$$\theta = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{\varepsilon_a - 2\varepsilon_b + \varepsilon_c}{\varepsilon_c - \varepsilon_a}\right) \quad \textbf{(5.15)}$$

Denklem 5.14'de elde edilen kalıntı gerilme denklemleri kesintisiz delik delinmesi durumunda geçerlidir. Ancak pratikte bu uygulanan bir durum değildir, bu nedenle kör delik delinmesi durumunda geçerli olacak denklemlerin elde edilmesi gereklidir.

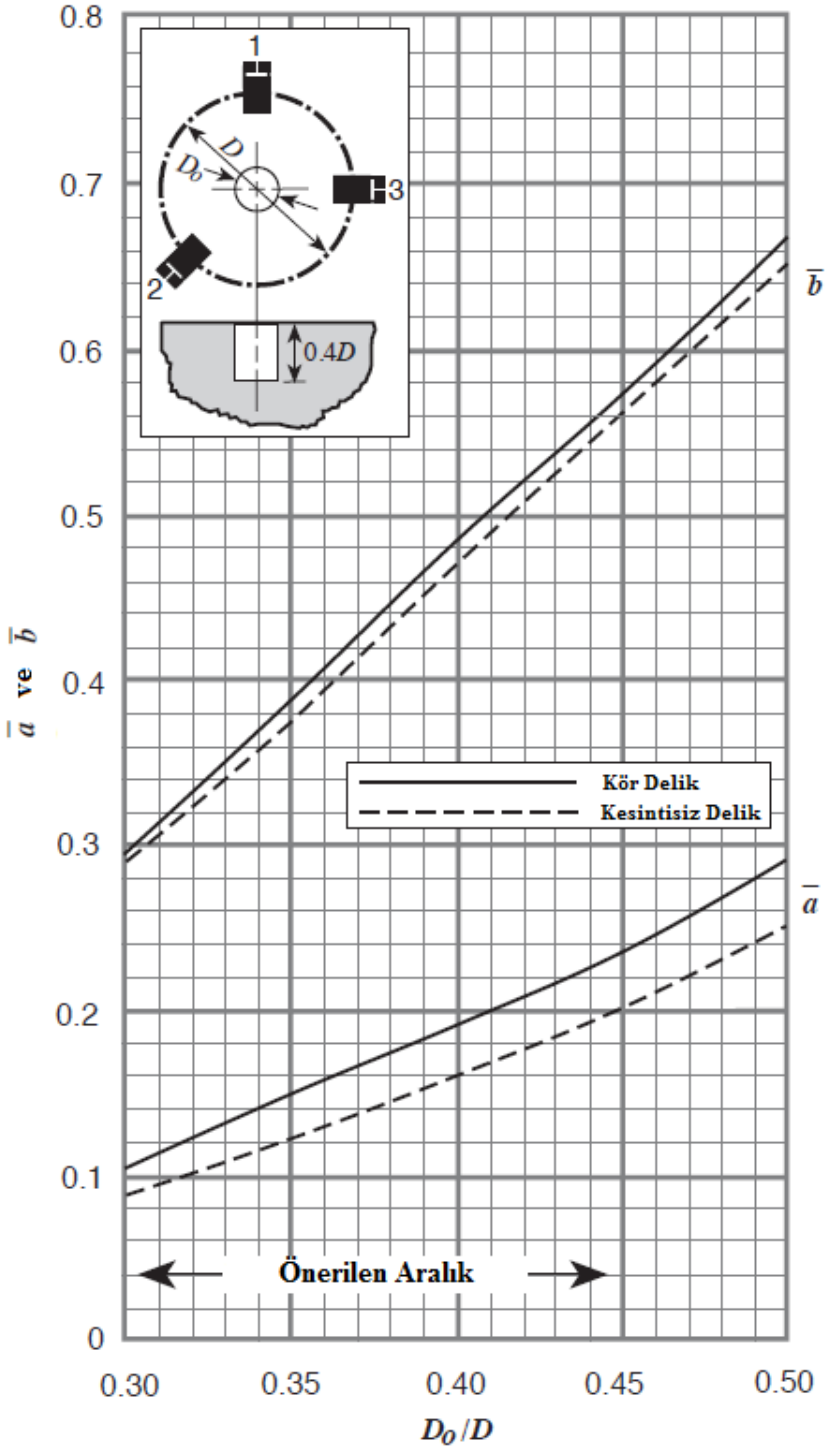
Düzlem gerilme alanında kör deliğin ilave edilmesi çok karmaşık gerilme halinin oluşmasına sebep olur ve elastisite teorisi ile kesin çözümü yoktur. Ancak denklem 5.14'un kör delik durumunda da geçerli olabilmesi için deneysel kalibrasyon ve sonlu elemanlar kullanılarak A ve B katsayıları $\bar{A}$ ve $\bar{B}$ olarak değiştirilmiştir. Bu katsayılar ASTM E837 standardı ile farklı gerinim ölçer tipleri için standartlaştırılmışlardır. Bu katsayıların farklı uygulamalarda kullanılabilmesi için bu katsayılar malzeme özelliklerinden bağımsız hale getirilerek $\bar{a}$ ve $\bar{b}$ haline dönüşmüştür:

$$\bar{a} = -\frac{2E\bar{A}}{1+\nu} \quad \textbf{(5.16)}$$

$$\bar{b} = -2E\bar{B} \quad \textbf{(5.17)}$$

Bu çalışmada kullandığımız gerinim ölçere ait $\bar{a}$ ve $\bar{b}$ katsayılarının geometrik özelliklerle değişimi Şekil 5.31'de görülebilir. ASTM E837'ye göre delik derinliği en fazla gerinim ölçer grid çapının 0.4 katı olmalıdır. Bu çalışmada delik derinliği buna uygun olarak 1 mm olarak şeçilmiştir. Şekil 5.31'de $\bar{a}$ ve $\bar{b}$ katsayılarını

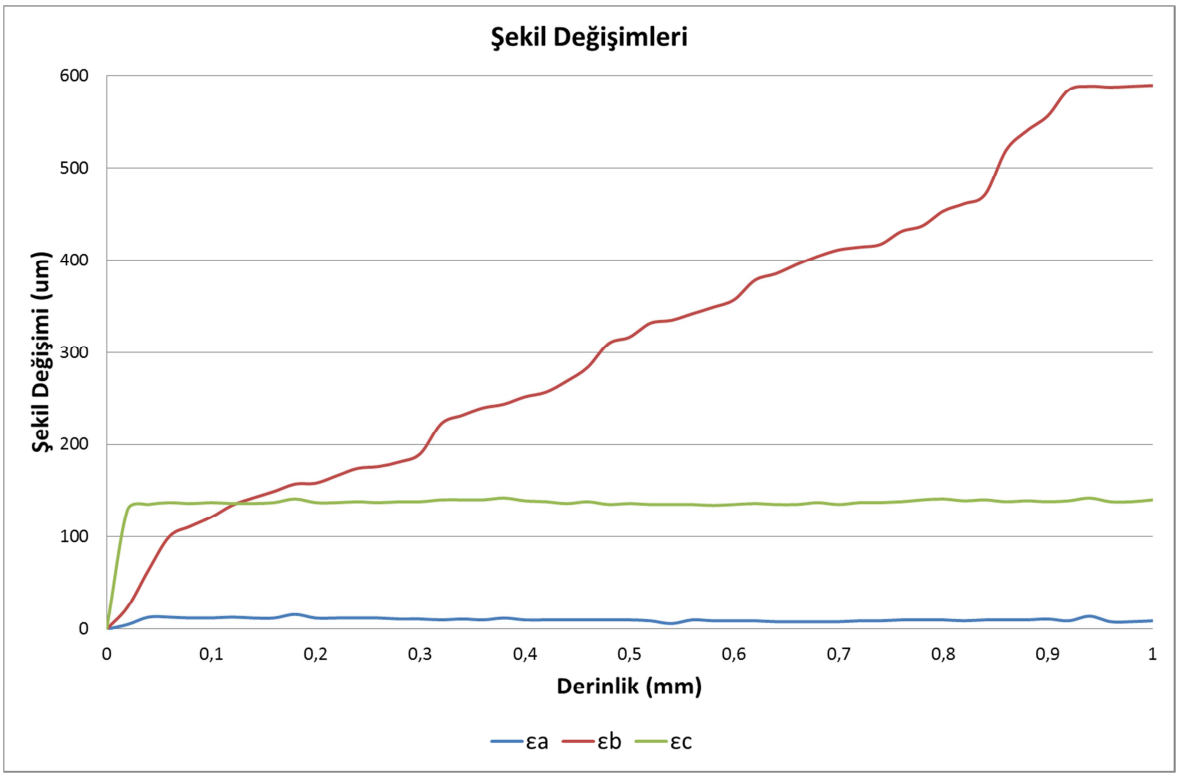
grafikten okumak için D_O/D değeri gereklidir. Bu değer kullandığımız gerinim ölçer ve delinen delik çapından dolayı 0.3125 tir. Bu değer kullanılarak kör delik için $\bar{a}$ ve $\bar{b}$ katsayıları elde edilmiştir.



Şekil 5.31 : ASTM E837'ye göre kör delik delme içinboyutsuz katsayılar [59].

5.5 Kalıntı Gerilme Hesaplama Sonuçları

Zr-esaslı kalın camsı metal malzemede kademeli delik delme işlemi sonucunda gerinim ölçer kullanılarak elde edilen şekil değişimlerinin delinen delik derinliği boyunca değişimi Şekil 5.32'de görülebilir.ε_b delik derinliği boyunca neredeyse doğrusal bir artış göstermişken ε_a ve ε_c ise delik derinliği boyunca değişim göstermemiştir.

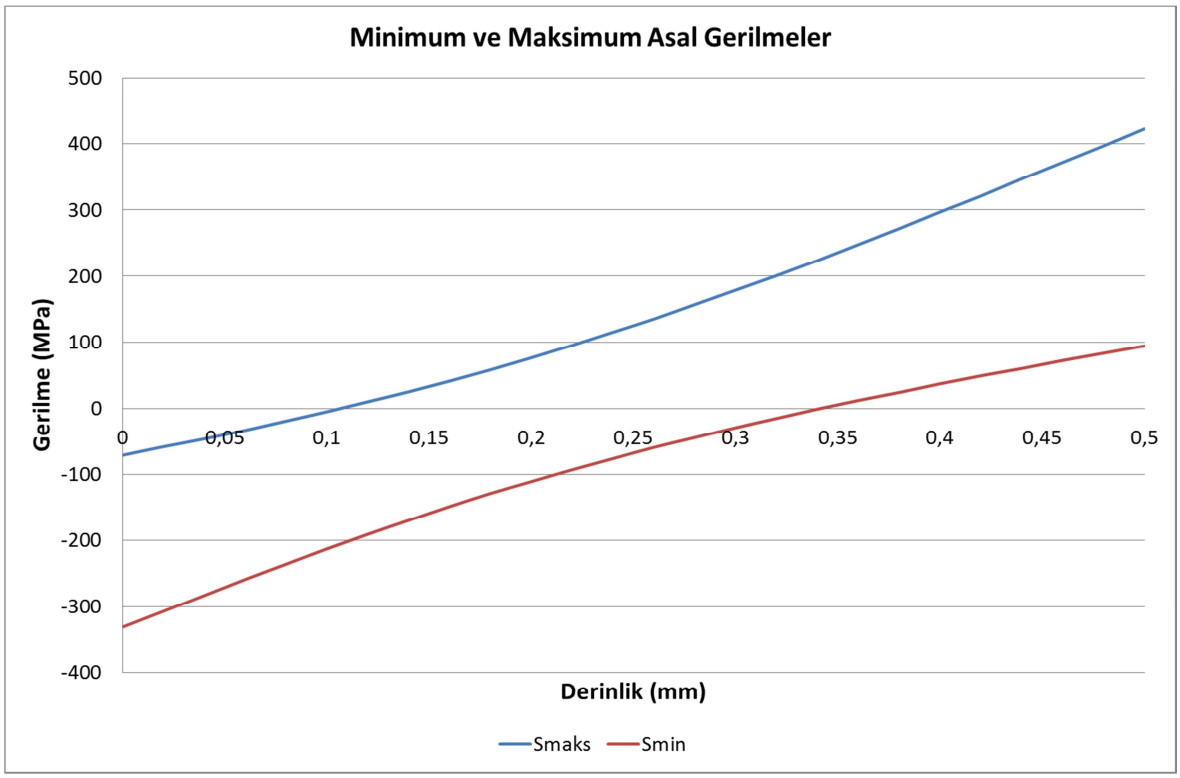


Şekil 5.32 : Gerinim ölçer kullanılarak kademeli delik delme işlemi süresince ölçülen şekil değişimleri.

Ölçülenε_a, $\varepsilon_b$ve ε_cşekil değişimleri denklem 5.14'de kullanılarak hesaplanan asal ve x-y gerilmeleri Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'te görülebilir.Taşlama sonrası oluşan kalıntı gerilmeler genellikle gerçekleşen plastik şekil değişimi ve taşlama ile oluşan sıcaklıkla ilgilidir. Yüksek sıcaklıklar çekme kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olurken, plastik şekil değişimleri ise basma kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Her iki kalıntı gerilme tipinin oluşumuna sebep olan parametreler ise taşlama parametreleri, taşlama taşının topoğrafyası, taşlama taşının özellikleri ve soğutma koşullarıdır.

Bu çalışma kapsamında 10 mm çapındaki Zr-esaslı çubuk şeklindeki kalın camsı metal malzeme 2000 dev/dak anamil hızı, 1000 mm/dak ilerleme hızı ve 0.01 mm

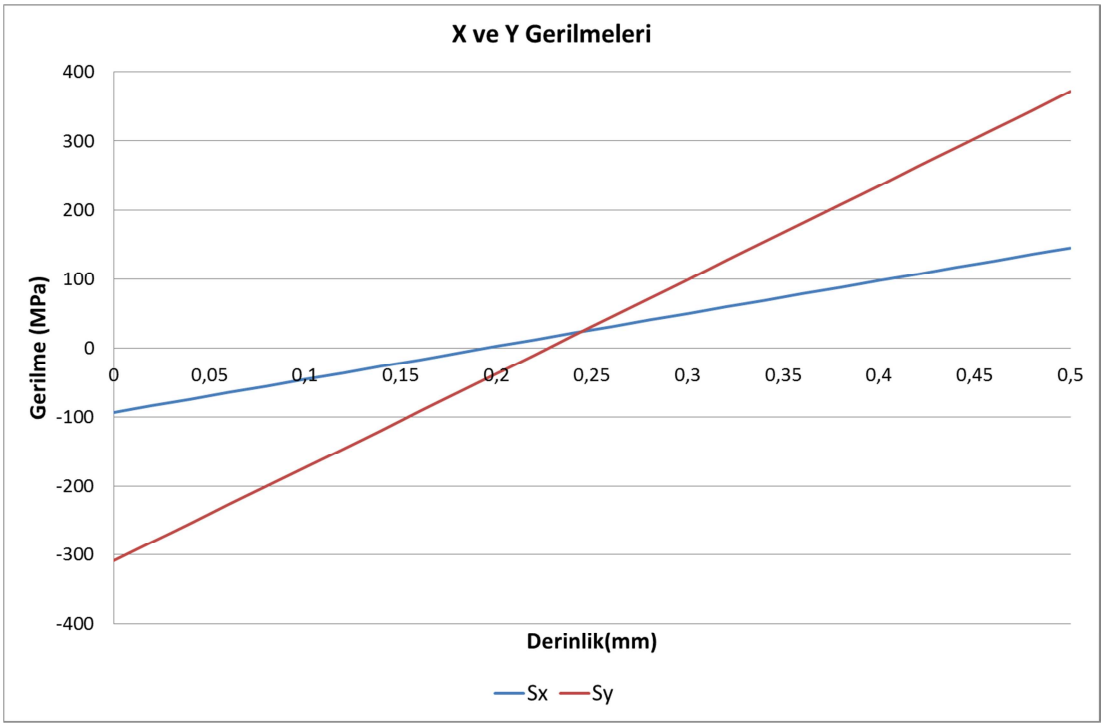
paso kalınlığı ile CBN taş kullanılarak kuru olarak işlendikten sonra işleme yapılan parça yüzeyinde kalıntı gerilme ölçümleri Şekil 5.34'te görüleceği gibi hesaplanan kalıntı gerilmelere X yönündeki kalıntı gerilme için yüzeyden 0.2 mm derinliğe kadar Y yönündeki kalıntı gerilme için 0.22 mm derinliğe kadar basma kalıntı gerilmesi şeklindedir. Bu derinliklerin üzerinde kalıntı gerilme çekme şeklindedir.



Şekil 5.33 : Delik derinliği boyunca minimum ve maksimum asal gerilmelerin değişimi.

Kalıntı gerilmenin basma olarak başlayıp sonradan çekmeye dönmesinin sebebi, işleme sırasındaki taşın parça yüzeyinde meydana getirdiği plastik şekil değişimi kaynaklıdır. Parça yüzeyindeki plastik şekil değişimi yüzeyden 0.22 mm derinliğe kadar etkisini azaltarak devam etmiştir. Bu derinlikten sonra sıcaklık plastik şekil değişimine göre daha baskın hale gelerek kalıntı gerilmenin çekme şeklinde olmasını sağlamıştır. Diğer bir deyişle plastik şekil değişimi kaynaklı mekanik gerilmeler 0.22 mm derinliğe kadar sıcaklık artışı kaynaklı ısıl gerilmelerden daha büyük olduğu için kalıntı gerilme basma karakterli oluşmuş, 0.22 mm üzeri derinlikte ise ısıl gerilmeler plastik şekil değişimi kaynaklı mekanik gerilmelerden daha büyük olduğundan kalıntı gerilme çekme karakterli oluşmuştur. Bu durum parçanın kalınlığı boyunca sahip olduğu sıcaklık gradyanıyla açıklanabilir. Literatürde Zr-esaslı kalın camsı

metalin aynı işleme koşullarında yapılan sıcaklık ölçümleri parça yüzeyinde 400°C üzeri sonuçlar vermiştir [1].

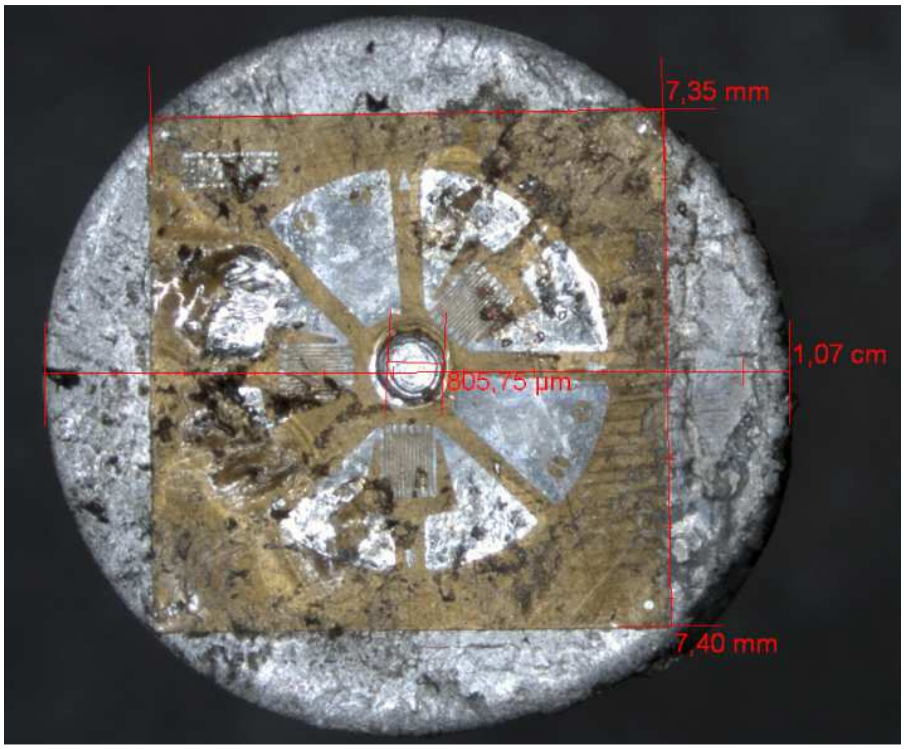


Şekil 5.34 : Delik derinliği boyunca X ve Y gerilmeleri.

Benzer kalıntı gerilme davranışı Şekil 3.11'de de sertleştirilmiş mil şeklindeki iş parçasının taşlanmasında da görülmüştür. Aradaki farklılık ise değişimin spesifik işleme kuvvetine göre verilmesidir. Eğer benzer çalışma Zr-esaslı kalın camsı metal için yapılmış olsaydı, seçilen işleme parametrelerinin sonucu ortaya çıkan spesifik taşlama kuvvetinin yüzeyde basma şekilde kalıntı gerilmeler oluşturacağını söylemek mümkün olurdu. Çatlak başlangıcı genellikle yüzeyden olduğu için yüzeyde basma kalıntı gerilmelerine sahip olmak istenen bir durumdur, bu bakımdan bu çalışmanın yapıldığı 2000 dev/dak anamil hızı, 1000 mm/dak ilerleme hızı ve 0.01 mm paso kalınlığının yüzey tamlığı açısından uygun seçilmiş parametreler olduğunu söylemek mümkündür.

Delik delme ile kalıntı gerilme ölçümünde malzemenin akma dayanımının enfazla % 60'ı ölçülebilmektedir. Ölçülen değerler Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin akma dayanımının % 60'ının altında kalmaktadır. Bu nedenle delik delme yöntemi bu parametrelerde işlenen parçanın yüzeyinden kalıntı gerilme ölçülmesi için uygundur ancak bu limitin geçilmesi farklı ölçüm yöntemlerinin kullanılmasını gerektirir.

Şekil 5.35’de görüleceği gibi Nikon SMZ 800 kullanılarak ölçüm sonrası delinen deliğin eş merkezliliğine bakılmış ve delik çapı ölçülmüşür. Delinen deliğin eş merkezliliği ölçüm sonuçlarının doğruluğu açısından çok önemlidir. Şekil 5.35’de görüleceği gibi delik delme işlemi başarı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.35 : Optik mikroskop kullanılarak delik delme sonrası numunenin incelenmesi.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Zr-esaslı 10 mm çapındaki çubuk şeklindeki kalın camsı metal malzemenin yüzeyinde 2000 dev/dak anamil hızı, 1000 mm/dak ilerleme hızı ve 0.01 mm paso kalınlığı olacak şekilde CBN taş kullanılarak kuru olarak taşlama yapıldıktan sonra taşlanan yüzeye gerinim ölçer yapıştırılıp, Vishay RS-200 cihazı kullanılarak delik delinip ölçülen şekil değişimleri kullanılarak delik derinliği boyunca kalıntı gerilmeler hesaplanmıştır.

Yapılan kalıntı gerilme ölçümünde delik delme yönteminin kullanılmasının nedeni Zr-esaslı kalın camsı metalin amorf yapıya sahip olması ve deney numunesi boyutlarıdır. Deney numunesi boyutları ayrıca delik delme yöntemi için üretilen mevcut en küçük gerinim ölçer olan Vishay EA-XX-031RE-120'nin kullanılmasını gerekli kılmış ve bu durum beraberinde gerinim ölçer üzerine kablo lehimlemede problemler yaşanmasına sebep olmuştur. Bu problemler lehimleme işlemini daha kontrollü kılan kablo yerine ince tel ve özel sıcaklık kontrollü ince uçlu havya kullanılarak giderilmiştir. Ayrıca kullanılan numunenin 10 mm çapında çubuk şeklinde olması gerinim ölçer yapıştırma, kablo lehimleme ve delik delme sırasında deney numunesinin sabitlenmesi için tutucu tasarlanmasını gerekli kılmıştır.

Yapılan delik delme işlemi ile şekil değişimleri ölçüldükten sonra en son olarak optik mikroskopta delinen deliğin eşmerkezliliği incelenmiş ve delinen deliğin başarılı olduğu görülmüştür.

Taşlama makine elemanlarının son işlemelerinde yaygın kullanıldığı için bu işlem sonrası oluşan kalıntı gerilmelerin kontrol edilmesi çok önemlidir. Taşlama sonrası oluşan kalıntı gerilmeler genellikle gerçekleşen plastik şekil değişimi ve taşlama ile oluşan sıcaklıkla ilgili olduğu literatürden bilinmektedir [54]. Yüksek sıcaklıklar çekme kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olurken, plastik şekil değişimleri ise basma kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olur.

Delik derinliği boyunca yapılan kalıntı gerilme hesaplamaları 0.22 mm delik derinliğine kadar kalıntı gerilmelerin basma 0.22 mm'den sonra çekme şeklinde olduğunu göstermiştir. Kalıntı gerilmenin basma olarak başlayıp sonradan çekmeye dönmesinin sebebi, işleme sırasındaki taşın parça yüzeyinde meydana getirdiği plastik şekil değişimi kaynaklıdır. Parça yüzeyindeki plastik şekil değişimi yüzeyden 0.22 mm derinliğe kadar etkisini azaltarak devam etmiştir. Bu derinlikten sonra sıcaklık plastik şekil değişimine göre daha baskın hale gelerek kalıntı gerilmenin çekme şeklinde olmasını sağlamıştır. Diğer bir deyişle plastik şekil değişimi kaynaklı mekanik gerilmeler 0.22 mm derinliğe kadar sıcaklık artışı kaynaklı ısıl gerilmelerden daha büyük olduğu için kalıntı gerilme basma karakterli oluşmuş, 0.22 mm üzeri derinlikte ise ısıl gerilmeler plastik şekil değişimi kaynaklı mekanik gerilmelerden daha büyük olduğundan kalıntı gerilme çekme karakterli oluşmuştur. Bu durum parçanın kalınlığı boyunca sahip olduğu sıcaklık gradyanıyla açıklanabilir.Literatürde Zr-esaslı kalın camsı metalin aynı işleme koşullarında yapılan sıcaklık ölçümleri parça yüzeyinde 400°C üzeri sonuçlar vermiştir [1].

Çatlak başlangıcı genellikle yüzeyden olduğu için yüzeyde basma kalıntı gerilmelerine sahip olmak istenen bir durumdur, bu bakımdan bu çalışmanın yapıldığı 2000 dev/dak anamil hızı, 1000 mm/dak ilerleme hızı ve 0.01 mm paso kalınlığının yüzey tamlığı açısından uygun seçilmiş parametreler olduğunu söylemek mümkündür.

Delik delme ile kalıntı gerilme ölçümünde malzemenin akma dayanımının enfazla % 60'ı ölçülebilmektedir. Ölçülen değerler Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin akma dayanımının % 60'ının altında kalmaktadır. Bu nedenle delik delme yöntemi bu parametrelerde işlenen parçanın yüzeyinden kalıntı gerilme ölçülmesi için uygundur ancak bu limitin geçilmesi farklı ölçüm yöntemlerinin kullanılmasını gerektirir.

Sonuç olarak delik delme yöntemi 10 mm çapındaki Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin 2000 dev/dak anamil hızı, 1000 mm/dak ilerleme hızı ve 0.01 mm paso kalınlığında işlendikten sonra kalıntı gerilme ölçülmesi için uygun bir yöntemdir. Numune genişliğinin gerinim ölçerin nominal çapının üç katından, numune kalındığı 1.2 katından büyük olduğu durumlarda ve delinen delik etrafındaki gerilme yığılması faktöründen dolayı kalıntı gerilmelerin malzemenin akma dayanımını %60'ından küçük olduğu durumlarda kullanılabilir. Ölçülen kalıntı gerilmelerin kalıntı metalin

akma dayanımının % 60'ına yakın olması durumunda ölçüm 4. bölümde bahsedilen halka çekirdeği ile yapılabilir ancak bu yöntem daha büyük numune boyutlarını gerekli kılar ve ASTM tarafından standartlaştırılmış bir yöntem değildir.

Ölçüm sonrasında optik mikroskop altında delinen deliğin çapı ve eşmerkezliliği kontrol edilmiştir. Bu açıdan kullanılan Vishay RS-200 yüksek hızda delik delme yönteminin gerinim ölçer ile eş merkezli delik delinmesini başarıyla sağladığı söylenebilir.

Kalın camsı metal malzeme amorf yapıya sahip olduğundan dolayı kristal yapıdaki atomik düzlemler arasındaki mesafenin değişimi ile kalıntı gerilmenin hesaplanmasını sağlayan x-ışını kırınımı ve nötron ışınımı kırınımı gibi tahribatsız yöntemler kalın camsı metal malzemelerde kalıntı gerilmenin ölçümü için uygun değildir.

Bu çalışmadan çıkarılan bir diğer sonuçta 2000 dev/dak anamil hızı, 1000 mm/dak ilerleme hızı, 0.01 mm paso ve CBN taş kullanılarak yapılan kuru taşlama işleminin parçanın yüzeyinde basma kalıntı gerilmeler oluşturması bu parametrelerin parçanın yüzey tamlığı açısından uygun parametreler olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Karipçin, İ.** (2010). Zirkonyum esaslı kalın camsı metalin taşlanabilirliğinin ısıl açıdan incelenmesi,Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul.

[2] **Duwez, R., Willens, R. H. ve Klement, W.** (1960).Continious series of metastable solid solutions in silver-copper alloys, *Journal of Applied Physics*, **31**, 1136-1137.

[3] **Kavesh, S., Gillman, J. J. veLeamy, H. L.** (1978).Metallic Glasses, *Metals Park*, ASM International, OH.

[4] **Cohen, M.H. veTurnball, D.,** (1961).Composition requirements for glass formation in metallic and ionic systems, *Nature*, **189**, 131.

[5] **Chen, H.S.,** (1974).Thermodynamic considerations on the formation and stability of metallic glasses, *ActaMetall*, **22**, 1505.

[6] **Kui, H.W., Greer, A.L., veTurnbull,D.,** (1984).Formation of bulk metallic glass by fluxing, *Appl.Phys.Lett*, **45**, 615.

[7] **Inoue, A.,** (1989).Mg-Ni-La amorphous alloys with a wide super, *Mater.Trans.JIM*, **30**, 378.

[8] **Zhang, T., Inoue, A., ve Masumoto, T.,** (1991). Amorphous Zr-Al-TM alloys with a significant supercooled liquid region of over 100K, *Mater.Trans.JIM*, **32**, 10005.

[9] **Surtanarayana, C.,** (1991).Rapid Solidification, *Materials Science and Technology*, Weinheim, Germany.

[10] **Hagiwara, M., ve Inoue A.,** (1993).Production techniques of alloy wires by rapid solidification, *Rapidly Solidified Alloys; Processes, Structures, Properties, Applications*, 139-155, New York.

[11] **Liebermann, H.H.,** (1983).Sample preparation methods and process characterization, *Amorphous Metallic Alloys*, 26-41, London.

[12] **Anantharaman, T.R. veSuryamarayana C.,** (1987). Rapidly solidified metals; A technological overview, 25-97, Zurich.

[13] **Drehman A.J., Greer A.L. ve Turnbull D.,** (1982), Bulk formation of a metallic glass: $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$, *Appl. Phys.Lett*, **41**, 716-717.

[14] **Inoue, A., Kita, K., ve Zhang, T.,** (1989).An amorphous $La_{55}Al_{25}Ni_{20}$ alloy prepared by water quenching, *Mater.Trans*, **30**, 722-725.

[15] **Inoue, A., Zhang, T., Nishiyama, N., Ohba, K., ve Masumoto, T.,** (1993). Preparation of 16 mm diameter rod of amorphous $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{17.5}$ alloy, *Mater.Trans*, **34**, 1234-1237.

[16] **Peker, A., ve Johnson, W.L.,**(1993).A highly processable metallic glass: $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10.0}Be_{22.5}$, *Appl.Phys.Lett*, **63**, 2342-2344.

[17] **Inoue, A., Nishiyama, N., ve Matsuda, T.,** (1996).Preparation of bulk glassy $Pd_{40}Ni_{10}Cu_{30}P_{20}$ alloy of 40 mm in diameter by water quenching, *Mater.Trans*, **37**, 181-184.

[18] **Inoue, A., Nishiyama, N., ve Kimura, H.M.,** (1997). Preparation and thermal stability of bulk amorphous $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ alloy cylinder of 72 mm in diameter, *Mater.Trans*, **38**, 179-183.

[19] **Shen, T.D., He, Y., ve Schwarz, R.B.,** (1999). Bulk amorphous Pd-Ni-Fe-P alloys; Preparation and characterization, *J.Mater.Res*, **14**, 2107-2115.

[20] **Amiya,K., ve Inoue, A.,** (2001). Preperation of bulk glassy $Mg_{65}Y_{10}Cu_{15}Ag_5Pd_5$ alloy of 12 mm in diameter by water quenching, *Mater.Trans*, **42**, 543-545.

[21] **Guo, F., Poon, S.J., veShiflet, G.J.,** (2003). Metallic glass ingots based on yttrium. *Appl.Phys.Lett*, **83**, 2575-2577.

[22] **Schroers, J., ve Johnson, W.L.,** (2004). Highly processable bulk metallic glass-forming alloys in the Pt-Co-Ni-Cu-P system, *Appl.Phys.Lett*, **84**, 3666-3668.

[23] **Suryanarayana, C., ve Inoue, A.,** (2010). Bulk Metallic Glasses, CRC Press, Boca Raton.

[24] **Inoue,A., Nakamura, T., Nishiyama, N., ve Masumoto, T.,** (1992). Mg-Cu-Y bulk amorphous alloys with high tensile strength produced by a high-pressure die casting method, *Mater.Trans*, **33**, 937-945.

[25] **Inoue, A., Nakamura, T., Sugita, T., Zhang, T., ve Masumoto, T.,** (1993). Bulky La-Al-TM (TM= Transition Metal) amorphous alloys with high tensile strength produced by a high-pressure die casting method, *Mater.Trans*, **34**, 351-358.

[26] **Inoue, A., Nakamura, T., Nishiyama, N., Sugita, T., ve Masumoto, T.,** (1993). Bulky amorphous alloys produced by a high pressure die casting process, *Key.Eng.Mater*, **83**, 147-152.

[27] **Nishiyama, N., ve Inoue, A.,** (1996). Glass-forming ability of bulk $Pd_{40}Ni_{10}Cu_{30}P_{20}$ alloy, *Mater.Trans*, **37**, 1531-1539.

[28] **Park, E.S., ve Kim, D.H.,** (2004). Formation of Ca-Mg-Zn bulk glassy alloy by casting into cone-shaped copper mold, *J.Mater.Res*, **19**, 685-688.

[29] **Inoue, A., Shinohara,Y., Yokoyama, Y., ve Masumoto, T.,** (1995). Solidification analyses of bulky $Zr_{60}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}Pd_5$ glass produced by casting into wedge-shape copper mold, *Mater.Trans*, **36**, 1276-1281.

[30] **Yokoyama,Y., Mund, E., Inoue, A., ve Schultz, L.,** (2007). Production of $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ glassy alloy rod of 30 mm in diameter by cap-cast technique, *Mater.Trans*, **48**, 3190-3192.

[31] **Inoue, A., ve Zhang, T.,** (1995).Fabrication of bulky Zr-based glassy alloys by suction casting into copper mold, *Mater.Trans*, **36**, 1184-1187.

[32] **Figueroa, I.A., Carroll, P.A., Davies, H.A., Jones, H., ve Todd, I.,** (2007). Preparation of Cu-based bulk metallic glasses by suction casting, *Proceedings of the Fifth Decennial International Conference on Solidification Processing*, Sheffield,U.K., 479-482.

[33] **Gu, X., Xing, L.Q., veHufnagel, T.C.,** (2002). Glass-forming ability and crystallization of bulk metallic glass $(Hf_xZr_{1-x})_{52.5}Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}Ti_5$, *Non-Cryst.Solids*,**311**, 77-82.

[34] **Wall, J.J., Fan, C., Liaw, P.K., Liu, C.T., veChoo, H.,** (2006).A combined drop/suction-casting machine for the manufacture of bulk-metallic-glass materials, *Rev.Sci.Instrum*, **77**, 1-4.

[35] **Shen, J., Chen, Q., Sun, J., Fan, H., ve Wang, G.,** (2005). Exceptionally high glass forming ability of an FeCoCrMoCBY alloy, *Appl.Phys.Lett*,**86**, 1-3.

[36] **Lynch, R.F., Olley, R.P., ve Gallagher, P.C.J.,** (1975). Squeeze casting of brass and bronze, *Mater.Trans*, **83**, 561-568.

[37] **Zhang,T., veInoue,A.,** (1998). Mechanical properties of Zr-Ti-Al-Ni-Cu bulk amorphous sheets prepared by squeeze casting, *Mater.Trans*, **39**, 1230-1237.

[38] **Inoue, A., Yokoyama, Y., Shinohara, Y., ve Masumoto, T.,** (1994).Preparation of bulky Zr-based amorphous alloys by a zone melting method, *Mater.Trans*, **35**, 923-926.

[39] **Inoue, A.,** (1995).Slowly-cooled bulk amorphous alloys, *Mater.Sci.Forum*, **179**, 691-700.

[40] **Tamura, T., Amiya, K., Rachmat, R.S., Mizutani, Y., ve Miwa, K.,** (2005).Electronic vibration process for producing bulk metallic glasses, *Nat.Mater*, **4**, 289-292.

[41] **Spaepen, F.,** (1977).A microscopic mechanism for steady state inhomogeneous flow in metallic glasses, *Acta.Metall*, **25**, 407-415.

[42] **Argon, A.S.,** (1979).Plastic deformation in metallic glasses, *Acta.Metall*, **27**, 47-58.

[43] **Steif, P.S., Spaepen, F., ve Hutchinson, J.W.,** (1982). Strain localization in amorphous metals, *Acta.Metall*, **30**, 447-455.

[44] **Leamy, H.J., Chen, H.S., ve Wang, T.T.,** (1972). Plastic flow and fracture of metallic glass, *Metall.Trans*, **3**, 699-708.

[45] **Wright, W.J., Saha, R., ve Nix, W.D.,** (2001). Deformation mechanisms of $Zr_{40}Ti_{14}Ni_{10}Cu_{12}Be_{24}$ bulk metallic glass, *Mater.Trans*, **42**, 642-649.

[46] **Kawamura, T., Shibata, T., Inoue, A., ve Masumoto, T.,** (1998).Workability of the supercooled liquid in the $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ bulk metallic glasses, *Acta Mater*, **46**, 253-263.

[47] **Wang, G., Fang, S.S., Xiao, X.S., Hua, Q., Gu, H.Z., ve Dong, Y.D.,** (2004). Microstructure and properties of $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ amorphous plates rolled in the supercooled liquid region, *Mater.Sci.Eng*, **373**, 217-220.

[48] **Lewandowski, J.J., Shazly, M., veShamimiNouri, A.,** (2006).Intrinsic and extrinsic toughening of metallic glasses, *Scr.Mater*, **54**, 337-341.

[49] **Schroers, J., ve Paton, N.,** (2006). Amorphous metal alloys form like plastics, *Adv.Mater.Proc*, **164**, 61-63.

[50] **Argon, A.S.,** (1979).Plastic deformation in metallic glasses, *ActaMetall*, **27**, 47-58.

[51] **Spaepen, F.,** (1977).A microscopic mechanism for steady state inhomogeneous flow in metallic glasses, *ActaMetall*, **25**, 407-415.

[52] **Inoue,A.,** (2000). Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys, Acta.Mater, **48**, 279-306.

[53] **Courtney, T.H.,** (2000).Mechanical Behavior of Materials, New York, McGraw-Hill.

[54] **Malkin, S., veGuo, C.,** (2008). Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, Industrial Press, Newyork.

[55] **Samala, P.R.,** (2007).*Hole drilling residual stress measurement using 3D-digital speckle pattern interferometry*(doktoratezi),Oakland University, Michigan.

[56] **Rossini, N.S.,Dassisti, M., Benyounis, K.Y., veOlabi, A.G.,** (2011).Methods of measuring residual stresses in components, *Materials and Design*, **35**, 572-588.

[57] **Lamda Diffraction Notes.,**(2005). Measurement of residual stresses using ring-core technique, Cincinnati, OH.

[58] **Hacini, L., Van, N.,Bocher, P.,** (2009). Evaluation of residual stresses induced by robotized hammer peening by the contour method, *Experimental Mechanics*, **49**, 775-783.

[59] **Vishay Micro-Measurements,** (2007). ,Measurement of residual stresses by the hole drilling strain gage method, Tech note 503-6.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad:	**Yüksel AKDENİZ**
Doğum Yeri ve Tarihi:	**Çorlu 17/07/1985**
Adres:	**Çorlu / Tekirdağ**
E-Posta:	**yukselakdeniz@gmail.com**
Lisans:	**İstanbul Teknik Üniversitesi MakinaMühendisliği**