İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KALIN CAMSI METAL MALZEME ÜZERİNDE FREZELEME KAYNAKLI OLUŞAN KALINTI GERİLMELERİN DELİK DELME YÖNTEMİ İLE ÖLÇÜMÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre ÜNLÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KALIN CAMSI METAL MALZEME ÜZERİNDE FREZELEME KAYNAKLI OLUŞAN KALINTI GERİLMELERİN DELİK DELME YÖNTEMİ İLE ÖLÇÜMÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre ÜNLÜ
(503081305)

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa BAKKAL

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503081305 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Emre ÜNLÜ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"KALIN CAMSI METAL MALZEME ÜZERİNDE FREZELEME KAYNAKLI OLUŞAN KALINTI GERİLMELERİN DELİK DELME YÖNTEMİ İLE ÖLÇÜMÜ"** 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 bana yol gösteren değerli danışmanım Doç. Dr. Mustafa Bakkal'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının deneysel çalışmalarında birlikte çalıştığım ve bu yorucu süreçte bana destek veren değerli dostum Yüksel Akdeniz'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmalar sırasında her türlü konuda yardımcı olan Ar. Gör. Umut Karagüzel'e, Ar. Gör. Ali Taner Kuzu'ya ve İTÜ Makina Fakültesi'nin değerli teknisyenlerine teşekkür ederim.

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

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

Son olarak benim bugünlere gelmemde sonsuz emeği geçen ve benden hiçbir zaman desteğini eksik etmeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2012

Emre Ünlü
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
2. CAMSI METAL **5**
2.1 Camsı Metalin Tarihçesi 5
2.2 Camsı Metal Üretim Teknikleri 6
2.2.1 Gaz yoğuşturma yöntemi 6
2.2.2 Şapırtılı suverme ve eriyik savurma 7
2.2.3 Bakır kalıba döküm ve enjeksiyon döküm 8
2.3 Camsı Metalin Yapısal Özellikleri 8
2.4 Camsı Metalin Mekanik Özellikleri 11
2.5 Camsı Metal Uygulamaları 14
3. FREZELEME **17**
3.1 Çevresel Frezeleme 17
3.1.1 Yukarı frezeleme (Geleneksel frezeleme) 18
3.1.2 Aşağı frezeleme (Yokuş frezeleme) 18
3.2 Alın Frezeleme 19
3.3 Kesme Takımları 19
3.4 Çok Amaçlı Freze Tezgahları 21
3.4.1 Diz tipi frezeleme tezgahları 21
3.4.2 Dikey yatak tipi frezeleme tezgahları 23
3.4.3 Planyalı tip frezeleme tezgahları 23
3.4.4 Döner tablalı tip frezeleme tezgahları 23
3.5 Kesici Takım Malzemeleri 24
3.6 Alın Frezelemenin Mekaniği 25
4. KALINTI GERİLME **29**
4.1 Kalıntı Gerilme Oluşumunun Sebepleri 32
4.1.1 Mekanik yükler 32
4.1.2 Termal yükler 34
4.1.3 Katı hal dönüşümü 34
4.1.4 Termal genleşme katsayısı uyumsuzluğu 35
4.1.5 Malzeme giderme 36
5. KALINTI GERİLME ÖLÇÜMÜ **39**
5.1 Kalıntı Gerilme Ölçümünün Gerekliliği 39
5.2 Kalıntı Gerilme Ölçüm Metodları 39
5.2.1 Hasarlı ölçüm prosedürleri (Gerilme rahatlatma teknikleri) 41

5.2.1.1 Kesit alma ve malzeme giderme metodları 42
5.2.1.2 Kimyasal metodlar 43
5.2.2 Yarı hasarlı ölçüm prosedürleri 44
5.2.2.1 Kör delik delme ve halka çıkarma metodu 44
5.2.2.2 İz bırakma metodu 46
5.2.3 Hasarsız ölçüm prosedürleri 47
5.2.3.1 X-ışını kırınımı 47
5.2.3.2 Nötron kırınımı 50
5.2.3.3 Ultrasonik yöntem 52
5.2.3.4 Manyetik barkhausen gürültü yöntemi 54
6. DENEYSEL ÇALIŞMA 55
6.1 İş Parçası Malzemesi 55
6.2 Alın Frezeleme Deney Düzeneği 56
6.3 Deney Tasarımı 58
6.4 Kalıntı Gerilme Ölçüm Deney Düzeneği 59
6.5 Kalıntı Gerilme Ölçümü 64
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 79
KAYNAKLAR 83
ÖZGEÇMİŞ 87

KISALTMALAR

KCM **:** Kalın Camsı Metal
CNC **:** Computer Numerical Control
CAM **:** Computer Aided Manufacturing
PVD **:** Physical Vapour Deposition
TiCN **:** Titanium Carbonitrür
HRA **:** Rockwell Hardness A Scale

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Kesici takım malzemeleri için kesme ve ilerleme hızları [32]. 28
Çizelge 5.1 : Kalıntı gerilme ölçüm tekniklerinin kıyaslanması [40]..... 40
Çizelge 6.1 : Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin mekanik özellikleri. 55
Çizelge 6.2 : Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin ısıl özellikleri. 56
Çizelge 6.3 : Alın frezeleme deneysel çalışmasında kullanılan kesme ucu ölçüleri. 58
Çizelge 6.4 : Yapılan alın frezeleme deney parametreleri. 59
Çizelge 6.5 : Ölçülen uzama değerlerine göre hesaplanan kalıntı gerilmeler. 73

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Soy gaz yoğuşturma yöntemi düzeneği [8]. 6
Şekil 2.2 : (a) Şapırtılı suverme tekniği (b) Eriyik savurma tekniği. 7
Şekil 2.3 : (a) Numunelerin vakum veya basınçla enjekte edildiği döküm haznesi (b) Zr-bazlı camsı metal numunelerin döküldüğü bakır kalıp. 8
Şekil 2.4 : Normal ve camsı malzemenin spesifik (birim kütle başına) hacmin sıcaklığa göre değişimi. 9
Şekil 2.5 : Maksimum çapta KCM çubuklarının yıllara göre keşfedilişi [6]. 10
Şekil 2.6 : Camsı metaller için normalize edilmiş kayma gerilmesinin (kayma gerilmesinin kayma modülüne oranı) sıcaklığa bağlı değişimi [18]. 12
Şekil 2.7 : Çeşitli malzemeler için elastik uzama grafiği [20]. 13
Şekil 2.8 : (a) Çekme dayanımı ve (b) Vickers sertliğinin elastiklik modülüne karşı amorf ve kristal metaller için kıyaslanması [21]. 13
Şekil 2.9 : Camsı metalden yapılmış golf sopası başlığı. 15
Şekil 3.1 : Çevresel ve alın kesme takımları: (a) çevresel ve (b) alın frezeleme [25]. 17
Şekil 3.2 : (a) Yukarı ve (b) aşağı frezeleme. 18
Şekil 3.3 : Çeşitli tiplerde frezeleme için kesme takımları. 20
Şekil 3.4 : Universal yatay milli frezeleme tezgahı. 22
Şekil 3.5 : Dikey frezeleme tezgahı. 23
Şekil 3.6 : Alın frezelemede kesme kuvvetleri. 26
Şekil 4.1 : 200 Mpa akma dayanımına sahip tipik bir metalin kalıntı gerilme büyüklükleri ve dağılımları. 29
Şekil 4.2 : Üçlü çubuk düzeneğinde mekanik yüklerden kaynaklı kalıntı gerilme oluşumu. 33
Şekil 4.3 : Mekanik deformasyonun kalıntı gerilme üzerindeki etkisi. 34
Şekil 4.4 : Termal faz dönüşümünün kalıntı gerilme üzerindeki etkisi. 35
Şekil 4.5 : Birlikte kürlenen alüminyum ve kompozit şaft. 36
Şekil 4.6 : Farklı başlangıç uzunluklarında iki yaydan oluşan düzenekte kalıntı gerilmeler (a, b). 37
Şekil 4.7 : Termal ve plastik deformasyon bileşiminin kalıntı gerilme üzerindeki etkisi. 37
Şekil 5.1 : Farklı taşlama metodları ile oluşan kalıntı gerilmeler. 42
Şekil 5.2 : Silindir kafası üzerine yerleştirilmiş uzama ölçer ve kesit alma yönteminin uygulanışı [44]. 43
Şekil 5.3 : Halka çıkarma metodu. 45
Şekil 5.4 : Tek ışıklı veya tek açılı teknik (SET). 48
Şekil 5.5 : SAE 4340 çeliğinde taşlama sonucu oluşan yüzey kalıntı gerilmelerinin x-ışını kırınımı yöntemi ile bulunması [54]. 49
Şekil 5.6 : Portatif x-ışını kırınım ekipmanı [55]. 50
Şekil 5.7 : Kalıntı gerilmelerin Nötron ışın kırınımı ve X-ışın kırınımı metodları ile sonuçlarının karşılaştırılması. 51

Şekil 5.8 : Ultrasonik ölçüm için bir cihaz ve sensörleri. 53
Şekil 5.9 : Ultrasonik yöntem ile tren tekerleklerinin jantları üzerindeki kalıntı gerilmelerin ölçümü [58]. 53
Şekil 5.10 : Manyetik Barkhausen gürültü ölçüm cihazı. 54
Şekil 6.1 : Deneysel çalışmada kullanılan Zr-esaslı KCM. 55
Şekil 6.2 : Frezeleme işlemlerinde kullanılan dik işleme merkezi. 56
Şekil 6.3 : İş parçasının bağlandığı fikstür. 57
Şekil 6.4 : Kesme ucu “insert” boyutları. 57
Şekil 6.5 : Kesme ucu “insert”lerin bağlandığı tutturma takımı. 58
Şekil 6.6 : Delik delme yöntemi ile kalıntı gerilme ölçümüne uygun uzama ölçer [60]. 60
Şekil 6.7 : Model RS-200 merkezleme düzeneği [60]. 60
Şekil 6.8 : Model RS-200 parmak freze delme düzeneği [60] 61
Şekil 6.9 : Model RS-200 yüksek devirli delme düzeneği [60]. 62
Şekil 6.10 : Numuneyi sabitlemek için kullanılan fikstür. 63
Şekil 6.11 : Model P3 uzama indikatörü 63
Şekil 6.12 : Uzama ölçerin fikstüre sabitlenmiş KCM numune üzerine yapıştırıldığı ve lehimlemenin yapılması. 65
Şekil 6.13 : Fikstür üzerine RS-200 cihazının yapıştırılması ve merkezlemenin göz merceği ile gerçekleştirilmesi. 66
Şekil 6.14 : Hava türbinini istenen basınçta regüle eden vana (a) ve hava akışına izin veren pedal sistemi (b). 67
Şekil 6.15 : Hava türbini ile tahrik edilen kesici uç. 68
Şekil 6.16 : Yüzde uzamanın delik derinliğine bağlı grafiği [60]. 68
Şekil 6.17 : Delik delinmesinden önce ve sonra P (R, α) noktasındaki gerilme durumları. 69
Şekil 6.18 : Radyal ve teğetsel uzamaların asal doğrultularda delik merkezinden uzaklığına bağlı değişimi. 71
Şekil 6.19 : Kalıntı gerilmeleri belirlemek için kullanılan rozet tipi uzama ölçer dizilimi 72
Şekil 6.20 : Ölçülen uzama değerleri ile teorik değerlerin yüzeyden olan derinliğe bağlı olarak kıyaslanması. 74
Şekil 6.21 : Yüzeyden derinliğe bağlı olarak X ve Y kalıntı gerilmeleri. 75
Şekil 6.22 : Yüzeyden derinliğe bağlı olarak asal kalıntı gerilmeleri. 75
Şekil 6.23 : İşleme gerilme dağılımı tipleri [61]. 76
Şekil 6.24 : Delik delme ardından mikroskop altında büyütülmüş numune yüzey görüntüsü. 77

KALIN CAMSI METAL MALZEME ÜZERİNDE FREZELEME KAYNAKLI OLUŞAN KALINTI GERİLMELERİN DELİK DELME YÖNTEMİ İLE ÖLÇÜMÜ

ÖZET

Kalın camsı metaller, geleneksel metallerin aksine amorf yapıya sahip ve yüksek hızda soğuyarak katılaşmanın gerçekleştiği malzemelerdir. Camsı metaller ayrıca zaman zaman metalik camlar, amorf alaşımlar yada kristal olmayan alaşımlar adlarını da almaktadırlar. Atomların düzenli bir dizilişe sahip olmadığı kristal olmayan bir yapıya sahiptir. Bu yüzden diğer metallerin aksine kristal yapıdan kaynaklı tane sınırı ve diskolasyon bulunmamaktadır. Bu özellikleri sayesinde kalın camsı metaller çok üstün özellikler sunmaktadır. Amorf yapı elde etmenin en büyük zorluğu kritik soğuma hızlarının altına inilmesi gerekliliğidir. Camsı metalin ilk elde edildiği yıllarda 10^6 K/s gibi çok yüksek soğuma hızları gerekmesine rağmen sonraki yıllarda bulunan yeni alaşımlarla kritik soğuma hızları 1 K/s ve altına inmiştir. Bu sayede camsı metallerin üretimlerini kısıtlayan soğuma hızlarının makul seviyelere gelmesi ile daha kalın camsı metallerin üretimi de mümkün olmuştur. 1 mm ve daha kalın kesitteki camsı metaller kalın camsı metal ismini almakta iken günümüzde 10 mm kesit kalınlığı kalın camsı metal için daha yaygın kullanılır hale gelmiştir. Camsı metaller üstün mekanik, elastik ve manyetik özelliklerin yanında yüksek aşınma ve korozyon dirençleri de gösterirler. Diğer metallere kıyasla ortalama 2 kat daha fazla çekme dayanımı, düşük elastiklik modülü ve beraberinde %2'ye kadar çıkabilen elastiklik sınırı, dislokasyonların bulunmayışı sebebiyle pekleşmeme, birim yoğunluk başına yüksek dayanım ve çok düşük döküm çekintisi gibi özellikleri vardır. Bu özellikleri sebebiyle üretim tekniklerinin de gelişmesiyle beraber kalın camsı metaller gitgide daha geniş bir uygulama alanı bulmaktadır.

Bu çalışmada, $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ bileşime sahip Zirkonyum esaslı kalın camsı metal, talaşlı imalat yöntemlerinden frezeleme işlemine tabi tutulmuştur. Ardından frezeleme kaynaklı oluşan kalıntı gerilme yarı hasarlı delik delme yöntemi ile ölçülmüş ve incelenmiştir. Arkla ergitme yöntemiyle üretilen 10 mm çapında ve 100 mm uzunluğundaki numune su ile soğutulan bir elmas disk ile 25 mm boyunda kesilmiştir. Bu numune fikstüre bağlanarak CNC kontrollü dik işleme tezgahında 600 dev/dak kesme hızı, 20 mm/dak ilerleme hızı ve 0.3 mm paso derinliği alınacak şekilde alın frezeleme yapılmıştır.

Alın frezeleme işlemi 16 mm çapındaki tutturma takımına iki adet değiştirilebilir kesme ucu takılarak yapılmıştır. Kesme uçları PVD tekniği ile TİCN (titanyum karbonitrür) malzeme ile kaplıdır. Yüzey tek bir seferde alın boyunca frezelenmiştir. İşleme sırasında soğutma sıvısı kullanılmamıştır. Daha sonra bu yüzeye mikro uzama ölçer yapıştırılacağı için iyi bir yüzey kalitesi elde edilmiştir.

Kalıntı gerilme ölçümü için yarı hasarlı delik delme yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem tabaka kaldırma, kesit alma gibi hasarlı yöntemlere kıyasla çoğu zaman tamir edilebilir veya ihmal edilebilir bir boyutta delik delinen az hasarlı bir tekniktir.

Metod parça içerisinde mevcut bulunan kalıntı gerilmelerin parçanın yüzeyine delinen ufak bir delik ile rahatlatılması ve bu rahatlamadan kaynaklı uzamaların ölçülmesi esasına dayanır. X-ışını kırınımı, nötron kırınımı, ultrasonik hız ve manyetik Barkhausen gürültü yöntemi gibi hasarsız yöntemlere kıyasla ise daha düşük ekipman maliyeti gerektiren ve daha yüksek doğruluk sağlayan aynı zamanda basit ve hızlı bir yöntemdir. Ayrıca kristal düzlemler arasındaki mesafenin ölçümü esasına dayanan kırınım yöntemleri kalın camsı metallerin amorf yapısı sebebiyle uygun değildir. Delik delme yöntemi ASTM E837 ile standartlaştırılmış ve diğer yöntemlere kıyasla belirsizliği daha az ve geniş çapta kabül edilmiş bir tekniktir.

Alın frezeleme ardından kalıntı gerilme ölçümü için delik delme yöntemini gerçekleştirmek üzere Vishay marka model RS-200 cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 400,000 rpm'e kadar yüksek devirlere çıkabilen bir hava türbini ve ona bağla kesme ucu içermektedir. Yüksek devirde kesme, delik delmeden kaynaklı ilave kalıntı gerilmelerin minimize edilmesini sağlamaktadır. 10 mm çapındaki Zr-esaslı kalın camsı metal numunenin kısıtlı yüzey alanı sebebiyle 7.4 mm uzunluğunda ve 7.04 mm genişliğinde ve ortasında 0.8-1.0 mm çapında delik delmeye uygun bir mikro uzama ölçer kullanılmıştır. Rozet tipinde ve üzerinde üç adet uzama ölçer bulunmaktadır. Bu sayede aralarında 45º bulunan üç doğrultuda uzama ölçümü alınabilmektedir. Uzama ölçer numune yüzeyine yapıştırılmadan önce iyi bir yapışmanın sağlanması için yüzey hazırlanmıştır. Bunun için bir takım şartlandırıcı ve nötrleştirici kimyasallar kullanılmıştır. Uzama ölçer numune yüzeyine yapıştırıldıktan sonra kabloların lehimlenmesi gerçekleştirilmiştir. Rozet tipi uzama ölçerin oldukça ufak boyutları sebebiyle ince kablolar ile terminal kullanılmıştır. Terminalden çıkan kablolar model P3 uzama indikatörüne bağlanmıştır. Lehimlemenin doğru bir şekilde yapıldığının kontrolü için ohmmetre kullanılmıştır ve 120 Ω ölçüldüğü durumda lehimleme işlemi tamamlanır. Delik delme için kullanılan kesme ucu, uzama ölçerle uyumlu olacak şekilde 0.8 mm çapında karbür malzemeden seçilmiştir. Model RS-200 cihazı üç ayaklı bir tasarıma sahip olup geniş plakalar üzerinde ölçüm yapmaya uygundur. Bu çalışmada kullanılan kalın camsı metal numune küçük çapta silindirik bir parça olduğu için numuneyi sabitlemek ve üzerine cihazı monte edebilmek için özel bir fikstür tasarlanmıştır. Fikstür üstten cihazın ayaklarının yapıştırıldığı ve alt kısımdan iki çene arasına numunenin sıkılabileceği bir tasarımdadır. Fikstürün orta bölgesindeki delikten ise numune monte edilebilmektedir. Delik delme işlemine geçmeden önce matkap ucu ile uzama ölçer merkezinin hassas bir şekilde hizalanması gerekmektedir. Bu sebeple cihaz üzerinde hava türbini aksamı ile değiştirilebilen bir mikroskop tüp bulunmaktadır. Göz merceği yardımıyla ışık altında cihaz üzerinde bulunan ayarlama vidaları ile X-Y doğrultusunda hizalama yapılmıştır. Uzama ölçerin merkezinde hedef şeklinde gösterilen delik delinecek bölge ile mikroskop üzerindeki merkezleme çizgileri üst üste getirilmiştir. Merkezleme tamamlandıktan sonra mikroskop tüp ile hava türbini aksamı yer değiştirilmektedir. İyi bir merkezleme deneysel ölçüm hatalarının minimize edilmesi için oldukça kritiktir. Hava türbini 3 bar basınçta çalışmaktadır. Bu sebeple hava besleme kaynağı bir hava kompresörüne bağlanmıştır. 3 bar basıncı sabit tutmak ve hava türbinini aktive etmek için sistemde bir vana ve pedal sistemi bulunmaktadır. Matkabın Z ekseninde hareketi cihaz üzerindeki bir mikrometre yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Matkap ucu mikrometre sıfır konumunda iken numune yüzeyine getirilerek sabitlenmiştir. Matkap ucu numune yüzeyinden 0.2 mm yukarıda bir konumda iken dönmeye başlatılmıştır. Ardından matkap ucu numune yüzeyinde sıfır konumundan başlayarak mikrometre yardımıyla 20 mikron derinlik yönünde ilerletilmiştir. Düzenek içerisinde uzama ölçer kablolarının bağlandığı

model P3 uzama indikatörü ile rozet üzerindeki her üç uzama ölçerden okuma yapılmıştır. Bu şekilde her bir seferde 20 mikron derine gidilerek ölçümlere devam edilmiştir.

Delik delme yöntemi ile kalıntı gerilme ölçümünde genellikle delik derinliği, delik çapı ile aynı olmaktadır. Bu çalışmada kalıntı gerilme kaynaklı rahatlamanın %100 olduğu derinliğin 1 mm olduğu görülmüştür. Bu sebeple uzama ölçümleri 1 mm derinliğe gelindiğinde tamamlanmıştır.

Elde edilen uzama ölçümleri kullanılarak delik delme yöntemi için verilen ilgili formüllerle kalıntı gerilmeler büyüklük ve doğrultuları ile birlikte hesaplanmıştır. Yüzeyde frezeleme kaynaklı oluşan plastik deformasyonların kesme ucu ile iş parçası yüzeyi arasında oluşan sürtünme kaynaklı ısıl etkiye karşı baskın olması sebebiyle basma gerilmeleri görülmüştür. Yüzeyden derine gidildikçe ve 0.22 mm derinlikten sonra gerilme eğrisi çekme kalıntı gerilmesi yönüne kaymış ve iç denge sağlanmıştır. Yüzeyde görülen basma gerilmeleri çatlak oluşumu ve ilerlemesine karşı direnç oluşturması açısından istenen bir durumdur.

Bu çalışma sonucunda kalın camsı metal malzemede alın frezeleme sonucu oluşan kalıntı gerilmelerin delik delme yöntemi ile başarılı bir şekilde ölçülebildiği görülmüştür. Elde edilen yüzeyden derinliğe bağlı kalıntı gerilme eğrisi ile alın frezelemenin camsı metal malzeme üzerindeki kalıntı gerilme oluşumu ortaya konmuştur. Seçilen alın frezeleme kesme parametrelerinin yüzeyde basma gerilmeleri yaratması sebebiyle uygun olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlarla, kalıntı gerilmeler tasarım ve analiz ortamında dahil edilerek erken yorulma hasarı, stok ve servis esnasında parçanın çarpılması gibi sıkıntıların önüne geçilebilir.

RESIDUAL STRESS MEASUREMENT BY HOLE DRILLING METHOD INDUCED BY MILLING ON BULK METALLIC GLASS

SUMMARY

Metallic glasses are amorphous alloys which are obtained by rapid cooling. By rapidly solidifying the liquid at higher rates, the glassy state remains in which constituent atoms are not arranged in a regular and periodic manner. Unlike traditional metals, they do not crystallize as they cool. Metallic glasses do not have grain boundaries and dislocations due to absence of the crystalline structure. This lets metallic glasses show unique mechanical, thermal and magnetic properties. On the other hand, the cooling rates are very high which requires specific manufacturing techniques. In recent years, bulk metallic glasses are getting popular due to their superior mechanical properties, good corrosion resistance, reasonable toughness, low internal friction and good processability.

In the early years when first bulk metallic glasses were discovered, critical cooling rates were required up to 10^6 K/s. The difficulty of achieving such high cooling rates led to limited thickness in the region of only tens of microns. With the newly developed alloys which showed improved glass forming ability, rapid cooling rates could be reduced to 1 K/s or even less. Thus, production of thicker metallic glasses could be available. Metallic glasses having section thickness or diameter of 1 mm or higher are generally called bulk metallic glasses. In recent years, the tendency of the most researchers have become to call bulk metallic glass to the materials with section thickness or diameter of 10 mm. Apart from their superior mechanical, elastical and magnetic properties of the bulk metallic glasses, they also show high abrasion and corrosion resistance. Compared to most of the traditional metals, bulk metallic glasses have much higher tensile strengths and much lower elasticity modulus with % 2 elongation at break, no strain hardening due to missing dislocations, higher specific strength and low shrinkage during casting. With these outstanding properties, the scope of applications of bulk metallic glasses is getting wider.

In this study, first a face milling operation was conducted on Zr-based bulk metallic glass ($Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$) and secondly to investigate residual stress formation due to face milling, semi destructive hole drilling method was used. Resulting residual stresses were examined at various depths from the machined surface of the sample. During the experiments, a bulk metallic glass having diameter of 10 mm cast by arc melting method was cut into 25 mm length with a water cooled diamond disk. The sample was fixed onto a CNC controlled vertical milling machine and face milling was conducted as per machining parameters of 600 rpm cutting speed, 20 mm/min feed rate and 0.3 mm cutting depth.

During face milling operation, a cutter holder with 16 mm diameter having 2 replacable inserts was used. Inserts were coated with TiCN (titanium carbonitride) by PVD (physical vapour deposition) technique. The surface of the sample was milled in a single operation. During the face milling, no cooling liquid was used. A good

surface quality was aimed to have due to implementation of a strain gage on this surface.

Hole drilling method was selected for measuring residual stress on the bulk metallic glass. It is based on measuring the relieved strains resulting from a small drilled hole onto surface of the part induced by existing residual stresses. Hole drilling method is one of the semi destructive residual stress measurement techniques which creates a small drilled hole that can be mostly repaired or ignored. When compared to non destructive methods such as X-ray diffraction, neutron diffraction, ultrasonic velocity and magnetic Barkhausen noise, it requires lower equipment costs and provides higher accuracy with simplicity and speed. Besides, diffraction methods rely on measuring an actual crystal dimension and this dimension can be related to magnitude and direction of the stress that the metal is subject to, whether that stress is residual or applied. However, due to amorphous structure of the bulk metallic glasses, these techniques are not applicable. Hole drilling method is a standardized method with ASTM E837. Hence, it has wider acceptance and well established method.

During the implementation of hole drilling method, a model RS-200 device from Vishay was used. This residual stress measurement device is capable of rotation speeds up to 400,000 rpm by having an air turbine and a small carbide cutter connected to air turbine shaft. High speed cutting provides less susceptibility to additional residual stresses resulting from hole drilling. Due to limited surface area of the Zr-based bulk metallic glass having diameter of 10 mm, smallest available micro strain gage having dimensions of 7.4 mm in length and 7.04 mm in width and a special region for hole drilling with diameter of 0.8-1.0 mm was used. The common procedure for measuring the relieved strains is to mount three resistance strain gages in the form of a rosette around the site of the hole before drilling. In order to provide good adhering effect of the strain gage, surface preparation was required. Because of that, a couple of conditioners and neutralizers were used on the surface. After implementation of the strain gage onto surface of the bulk metallic glass sample, cables were soldered on the strain gage. Due to very small size of the strain gage, a terminal connection was added to use thinner cables between strain gage and terminal. The cables coming from the terminal were connected to a model P3 strain indicator. Cable connections were checked with an ohmmeter to ensure that they are showing 120 Ω as given by strain gage specification sheet. The carbide cutter having 0.8 mm diameter was selected for the hole drilling according to strain gage size. Model RS-200 equipment has 3 pads which is mostly applicable for plates. Therefore, a fixture was designed and manufactured to support cylindrical bulk metallic glass sample and mount the equipment onto the fixture from its pads. Model RS-200 equipment was bonded onto fixture top surface and the sample was constrained between 2 mounts below the fixture. There is also a hole in the middle of the fixture for the tool access to the sample surface. Prior to proceeding to the hole drilling, alignment of the cutter to the strain gage center is required. There is a replacable microscope tube used for this alignment. From the eyepiece with the help of illuminator, alignment was conducted by the X-Y adjustments. After the alignment of the cutter to the strain gage center, microscope tube was replaced with the air turbine assembly. Proper alignment is critically required to minimize measurement errors resulting from eccentricity. The air turbine is working with 3 bar air pressure. Air supply of the device was connected to an air compressor. In order to keep 3 bar air pressure constant and activate the air turbine, there is a valve and a

pedal in the setup. A micrometer in the device was used to control the cutter position in the vertical axis. After alignment of the cutter tip to the sample surface, cutter was fixed to the shaft and then cutter is raised 0.2 mm above the sample surface. After then, air turbine was fed with air pressure and the cutter was started to rotate. Cutter was lifted down by 20 microns from the surface of the sample for the first measurement. Readings were taken from model P3 strain indicator for all 3 resistances on the rosette type strain gage. This was repeated for the next depths with feed amount of 20 microns. The total depth of measurement with the hole drilling method is generally the same with hole diameter. In order to have % 100 strain relief, hole was drilled up to 1 mm and measurements were completed.

Residual stresses with their magnitudes and directions were calculated from the obtained strain measurements with the corresponding formulas. Compressive residual stresses were observed at the surface of the bulk metallic glass sample due to dominating plastic deformations resulted from face milling over the heat effect originated from the friction between the cutter and workpiece. With the increasing depth from the surface, and especially after depth of 0.22 mm, tensile residual stresses are getting dominant. Thus, the residual stress curve per depth moved to tensile residual stresses and internal equilibrium state is achieved. Compressive residual stresses on the sample surface were preferred due to providing resistance to crack formation and propogation.

As a result of this study, residual stresses originated from face milling on the bulk metallic glass can be successfully measured with semi destructive hole drilling method. Residual stress formation induced by face milling on bulk metallic glass is obtained and examined. Cutting parameters selected for face milling were proved to be appropriate due to compressive residual stresses on the workpiece surface. With these results, residual stresses can be incorporated into design and analysis works in order to prevent early fatigue failures and distortions during store and service of the parts.

1. GİRİŞ

Kalın camsı metaller kristal yapılı geleneksel metallerin aksine kritik soğuma hızlarının altında oluşan amorf yapıya sahiptirler. Amorf metaller düzensiz bir atom dizilişine sahip ve tane sınırı olmayan malzemelerdir. Bu yüzden kalın camsı metaller camsı alaşımlar, amorf alaşımlar yada kristal olmayan alaşımlar adını da almaktadırlar. Kritik soğuma hızlarının altına inmek çok yüksek soğuma hızları gerektirir. Bu yüzden kalın camsı metallere özgü imalat yöntemleri gelişmiştir. Elde edilen bu amorf yapı yarı kararlıdır ve ısıl aktivasyon ile daha kararlı bir yapı olan kristal yapıya geçme eğilimindedirler.

Son yıllarda uygulama alanları gitgide gelişen ve ilgi gören kalın camsı metallerin nihai boyut ve geometrilerine getirilmesi için talaşlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Talaşlı imalat işleme parametrelerinin geleneksel metaller üzerine etkileri konusunda çok sayıda çalışma bulunsa da literatürde kalın camsı metaller için sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Geleneksel metaller için işleme proseslerinden kaynaklı kalıntı gerilmelerin parça yüzeyinde çatlak oluşumu ve ilerlemesi, parçanın stok edilmesi yada serviste kullanılma sürecinde çarpılması, beklenenden erken hasara uğraması gibi sıkıntılara yol açması sebebiyle kalıntı gerilme ölçümü çalışmaları yapılmaktadır. Ancak kalın camsı metaller için işleme proseslerinden kaynaklı kalıntı gerilmelerin ölçümü için herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Kalın camsı metal malzemeler başta çelikler olmak üzere diğer metallere kıyasla ortalama 2 kattan fazla dayanıma ve daha düşük elastiklik modülüne sahiptirler. Bu sebeple yaklaşık olarak %2'ye kadar elastik uzama gösterirler. Bunun yanında oldukça düşük ısıl iletkenlik gösterirler. Bu sebeple talaşlı imalatı sırasında yüksek sıcaklıklar görülebilir. Sıcaklığın kristalleşme sıcaklığını geçtiği durumda ise amorf yapı yerini kristal yapıya bırakmaktadır. Kristal yapı kusurlarının bulunmadığı ve bu sayede yüksek korozyon direnci, yüksek mekanik dayanım gibi özelliklere sahip amorf yapının muhafaza edilmesi için talaşlı imalat parametrelerinin seçimi kritiktir. Kalın camsı metallerin bu özellikleri sebebiyle talaşlı imalat sonucu oluşan kalıntı gerilmeler merak konusudur.

Kalıntı gerilme ölçümleri geleneksel metaller üzerinde hasarlı, hasarsız ve yarı hasarlı olmak üzere çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerden hasarlı ve yarı hasarlı olan tekniklerde tabaka kaldırma, kesme, delik delme gibi proseslerle parça üzerinde gerilme rahatlaması gerçekleştirilmekte ve bu rahatlamadan kaynaklı uzama ölçülerek kalıntı gerilmeler hesaplanmaktadır. Ancak özellikle hasarlı yöntemlerde bu ölçümden sonra parça kullanılamaz hale gelmekte bu sebeple de seri üretimde ancak sınırlı sayıda numune test edilebilmektedir. Eğer kalıntı gerilme imalat prosesine göre uniform değilse bu durumda alınan ölçüm tüm üretilen partiyi temsil etmemektedir. Hasarsız yöntemlerde ise en büyük avantaj olarak parça üzerinde herhangi bir deformasyon oluşturulmamakta ancak genellikle yüksek ekipman yatırımlarıyla laboratuar koşullarında uzun süre gerektiren ölçümlerle gerçekleşmektedir. Ayrıca en yaygın kullanılan hasarsız yöntemler olan X-ışını kırınımı ve nötron kırınımı yöntemleri malzemenin kristal yapısına dayanmaktadır. Kalın camsı metallerin amorf yapısı sebebiyle bu yöntemler uygulanamamaktadır. Ultrasonik yöntem ise kalıntı gerilmenin ses hızına olan değişim etkisine dayalı olmasına karşın ses hızına etkiyen diğer mekanik özellikler sebebiyle bu yöntemin hassasiyeti düşük olmaktadır. Bir diğer manyetik yöntemin uygulama alanı ise ferromanyetik malzemelerle sınırlı kalmaktadır. Bunun yanında yarı hasarlı yöntemler çoğunlukla parça üzerinde tamir edilebilir yada ihmal edilebilir hasarlara yol açar. Daha basit ekipmanlarla, daha hızlı ve yerinde ölçüme imkan sağlayan bu yöntemler aynı zamanda yüksek doğruluk sağlamaktadırlar. Yarı hasarlı yöntemlerin başında gelen delik delme yöntemi ASTM E837 ile standart hale getirilmiş ve belirli bir olgunluk seviyesine ulaşmış bir yöntemdir.

Talaşlı imalat prosesleri içerisinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri frezeleme işlemidir. Bu çalışmada $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ bileşimine sahip Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin 600 dev/dak kesme hızı, 20 mm/dak ilerleme hızı ve 0.3 mm paso ile alın frezelemesi yapılmıştır. Elde edilen işleme yüzeyinde delik delme yöntemi ile kalıntı gerilme ölçümleri alınmıştır. Yüzeyden olan derinlik doğrultusunda her kademede uzama ölçerler üzerinden okumalar gerçekleştirilmiştir. İlgili alın frezeleme parametrelerinin yüzeyde ve yüzey altında oluşturduğu kalıntı gerilmelerin büyüklüğü ve yönü incelenmiştir. Delme sonrası yüzey mikroskop altında incelenmiş ve elde edilen delik çapı ve yüzey durumu kontrol edilmiştir. Kalıntı gerilmenin yüzeyden olan derinlik boyunca değişimi grafiksel olarak

çizilmiştir. Kalın camsı metal malzemenin alın frezelemesi sonucu oluşan kalıntı gerilmelerin yarı hasarlı delik delme yöntemi ile başarılı bir şekilde ölçülebildiği ve ilerleyen çalışmalarda kullanılabileceği görülmüştür. Alın frezeleme sonucu oluşan kalıntı gerilmelerin büyüklük ve basma yada çekme yönünde oluşumunun elde edilmesiyle kalın camsı metal malzemelerinin kullanımı konusunda çıkarımlar yapılmıştır. Bu sayede erken yorulma hasarları, parçanın çarpılması gibi sıkıntıların tasarım ve analiz sürecine önceden dahil edilebilmesi mümkün olmaktadır.

2. CAMSI METAL

2.1 Camsı Metalin Tarihçesi

Yaklaşık iki bin yıldır metallerin su içerisinde hızlı bir şekilde soğutulması bilinen bir prosestir. Günümüzde hızlı suverme malzeme üretimi için halen önemli bir teknik olup soğuma hızları büyük ölçüde malzemenin boyutuna ve kullanılan yönteme bağlıdır.

Sıvı halden hızlı suverme ile üretilen amorf malzemelere cam ismi verilmektedir. İlk camsı metal (ötektik bir Au-Si alaşımı) 1960 yılında P. Duwez ve çalışma arkadaşları tarafından CalTech, Pasaneda'da tesadüfi bir şekilde bulunmuştur [1-2]. Araştırma projesinin asıl amacı denge durumunda olmayan katı çözelti üretmek olmasına rağmen, Duwez başarılı bir şekilde tek fazda katı bir çözelti elde etmiştir [3].

Duwez tarafından keşfedilen camsı Au-Si alaşımı 50 mikrondan daha küçük ölçülerde ve bu sayede yaklaşık 10^6 K/s gibi çok yüksek soğuma hızlarına çıkılabilmiştir.

İlk camsı metalin keşfedilmesinin ardından, araştırmacılar camsı formun elde edilebilirliğini iyileştirmeye yoğunlaşmışlardır. Hızlı katılaşmayı sağlamak için numune boyutları ile soğuma hızı arasında kuvvetli bir bağ bulunmaktadır. Camsı metal elde edebilmek için minimum bir soğuma hızına ulaşmak veya maksimum bir et kalınlığına sahip bir numune gerekmektedir. Duwez'in keşfinin ardından birkaç yıl sonra Chen ve Turnbull, 0.5 mm çapında bir alaşımı cam haline getirebilmişlerdir [4]. Bu alaşım ayrıca belirgin bir camsı geçiş göstermiştir. İyi bir camsı form elde edilebilirliğe sahip alaşımların daha "düşük camsı geçiş sıcaklığına" T_{rg} (~2/3) sahip olduğu görülmüştür [5].

$$T_{rg} = \frac{T_g}{T_{liq}} \qquad \textbf{(2.1)}$$

Burada T_g camsı geçiş sıcaklığı ve T_{liq} erime sıcaklığıdır. Sonraki yıllarda camsı form elde edilebilirliğinin iyileşmesi ile birlikte Inoue ve arkadaşları tarafından , Sendai, Japonya'da yapılan çalışmalarda bulunan kompleks dörtlü ve beşli camsı metaller ile

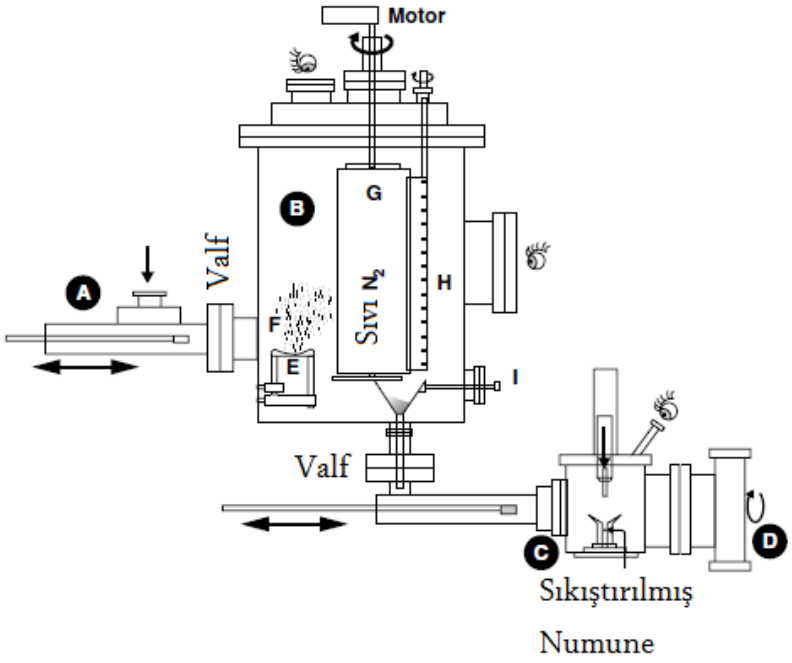
yeni alaşımlar ortaya çıkmış ve soğuma hızları 10^5-10^6 K/s mertebelerinden 100 K/s'ye düşebilmiştir [6].

Camsı metal keşiflerine paralel olarak camsı metallere olan ilginin de artmasıyla birlikte yeni üretim teknikleri de geliştirilmiştir.

2.2 Camsı Metal Üretim Teknikleri

2.2.1 Gaz yoğuşturma yöntemi

Gaz yoğuşturma yöntemi önceleri araştırma amaçlarıyla kullanılan ve bir buharlaştırma kaynağından sıvı helyumla soğutulan bir alt katman üzerine metal filminin biriktirildiği bir tekniktir. Böylece katı çözünürlüğü artırılıp bazı durumlarda metal filmin amorf hale geldiği yapı elde edilebilmiştir. Gleiter ve arkadaşlarının uygulamış olduğu soy gaz yoğuşturma tekniğinde metal önce toz şeklinde katılaşmakta ve ikinci aşamada katı numuneler şeklinde sıkıştırılmaktadır [7]. Şekil 2.1'te gösterilen bu sistem dört parçadan meydana gelmektedir: yükleme ünitesi, ana vakum haznesi, sıkıştırma ünitesi ve özel bir besleme aygıtı.



Şekil 2.1 : Soy gaz yoğuşturma yöntemi düzeneği [8].

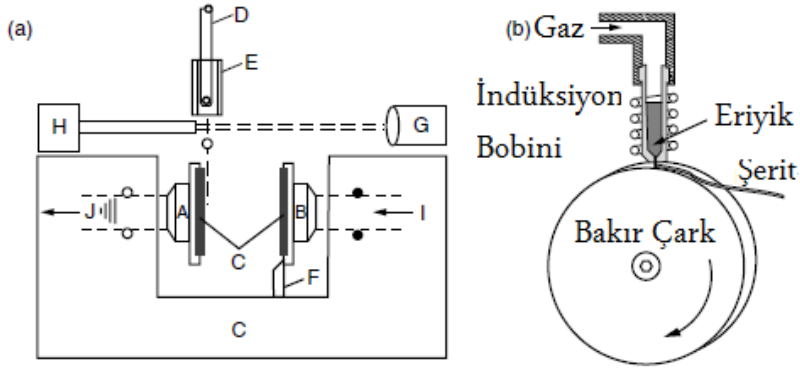
Bu proseste buhar fazındaki atomlar nano boyutta kristaller halinde yoğuşturularak sıvı nitrojen ile soğutulan dönen bir silindir üzerinde toplanır. Toz kazınıp çıkarıldıktan sonra bir huniye yönlendirilip sıkıştırma ünitesine transfer edilir. Bu

teknik 1 cm çapında ve 1 mm yüksekliğinde kalın nanokristal malzemeler üretimine olanak tanır [9].

2.2.2 Şapırtılı suverme ve eriyik savurma

İlk camsı metal alaşımları Duwez ve arkadaşları tarafından bulunan püskürtmeli suverme adı verilen bir teknikle hazırlanmıştır ve 10^6 K/s soğuma hızları elde edilebilmiştir [10]. Daha büyük numunelerin üretimi ise sonraları geliştirilen şapırtılı suverme tekniği ile mümkün olmuştur. Bu teknikle çapları 1 ila 4 cm arasında değişen, 50 mikron kalınlığında diskler üretilmiştir. İndüksiyon bobini ile yüksek frekanslı akım ile eritilen ufak bir kütlenin akım kapatıldığında düşürülür ve lazer sinyali vasıtasıyla pnömatik veya elektromanyetik olarak hareket ettirilen düz yüzeyli iki piston tarafından yüksek hızda kapatılarak soğutulur. Böylece eriyik malzeme yaklaşık 10^6 K/s soğuma hızında ince folyo haline getirilir [11]. Şekil 2.2a'te gösterilen bu yöntem günümüzde buradan adapte edilmiş bir şekilde kullanılmaktadır.

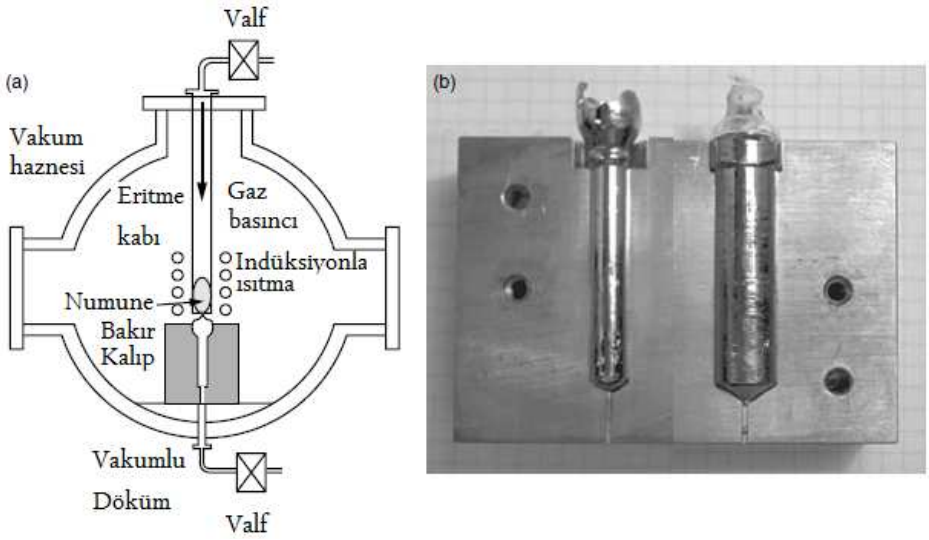
İlerleyen çalışmalar camsı metali oluşturan alaşım elementlerinin de artmasıyla birlikte kritik soğuma hızının düşmesine yol açmıştır. 1970'lerde araştırmacılar sürekli döküm veya eriyik savurma metodlarını geliştirmişler ve Şekil 2.2b'de gösterilen dönen bir bakır çark üzerine dökümle elde edilen metalik şeritlerin üretimi mümkün kılınmıştır. Bu metod sayesinde birkaç metre uzunluğunda ve birkaç cm genişliğinde camsı metaller elde edilebilmiştir [12]. Bu teknikte eriyik, bir soygaz yardımıyla bir nozuldan itilir ve metal sıvı akışı dönen bir bakır çark üzerine düşürülerek soğutulur. Katı haldeki metal tepeden beslenir ve indüksiyon bobini yardımıyla ısıtılarak eriyik haline getirilir.



Şekil 2.2 : (a) Şapırtılı suverme tekniği (b) Eriyik savurma tekniği.

2.2.3 Bakır kalıba döküm ve enjeksiyon döküm

1990'ların başında çok düşük kritik soğuma hızları (1 K/s) ile kompleks ve çok bileşenli camsı metallerin geliştirilmesi araştırmalara yeni bir boyut getirmiş ve büyük bakır kalıplar içerisinde camsı metallerin soğutulması mümkün olmuştur [13]. Eriyik genellikle indüksiyonla veya soygaz plazma arkıyla ısıtma ile elde edilir. Metal eriyiği kalıba doldurmak için iki temel teknik kullanılmaktadır. Bu teknikler bir soygaz yardımıyla basınç farkı yaratarak kalıba doldurma ve bir piston yardımıyla eriyiği kalıba enjekte etme şeklindedir. Şekil 2.3'da indüksiyonla ısıtılan ve eriyiğin vakumla kalıba doldurulduğu yöntem ve dökümle elde edilmiş 5 ve 10 mm çaplı Zr-bazlı camsı metalin bakır kalıbı gösterilmektedir.



Şekil 2.3 : (a) Numunelerin vakum veya basınçla enjekte edildiği döküm haznesi (b) Zr-bazlı camsı metal numunelerin döküldüğü bakır kalıp.

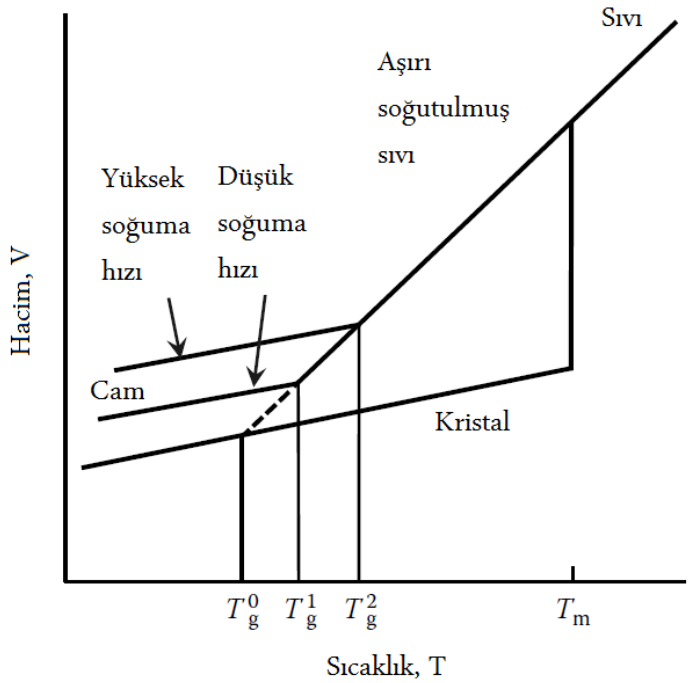
2.3 Camsı Metalin Yapısal Özellikleri

Metaller ve alaşımlar doğada geleneksel olarak kristal durumda bulunur. Yapıyı oluşturan atomlar üç boyutta peryodik şekilde düzenlenmiştir. Örgü uzayı konseptinde, kristal içerisindeki her atom özdeş şekilde çevrelenmiştir. Komşu atoma en yakın mesafe ve bunların sayısı her bir atom için eşit olup atomun konumundan bağımsızdır. Bu tanım ancak kristal yapının mükemmel olduğu durum için geçerlidir ve boşluk, dislokasyon ve tane sınırı gibi herhangi bir kristal yapı kusuru olmadığı durumdur. Bu tip kusurların olduğu durumda ise kristal yapı çarpılır [6].

Atomların düzenli bir dizilişe sahip olmadığı bir katı, kristal olmayan yapıya sahiptir ve amorf veya camsı adını alır. Camsı ile amorf terimleri arasında bir fark

bulunmaktadır. Camsı sıvı halden sürekli bir soğuma ile kristal olmayan bir yapının elde edildiği durum iken amorf bunun dışındaki herhangi bir yöntemle elde edilen kristal olmayan bir yapıdır.

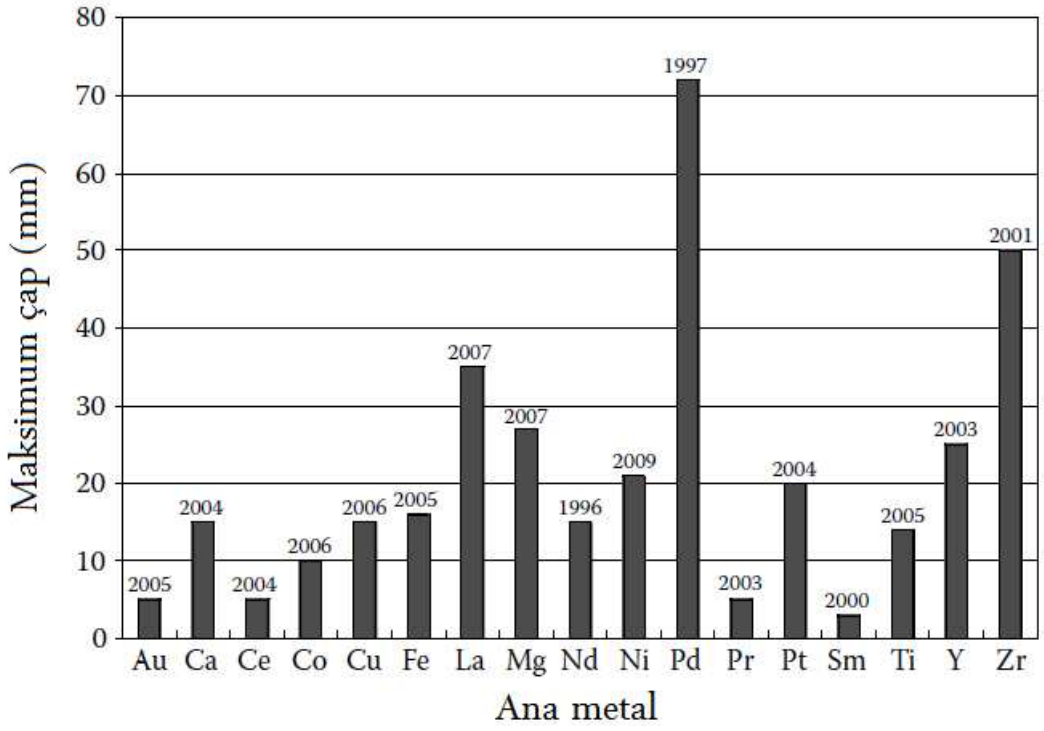
Bir sıvı metalin sıcaklığı düşürüldükçe, katılaşma anında kristale dönüşürken hacminde ani bir düşüş görülür. Aşırı bir soğuma gerçekleştiğinde ise katılaşma sıcaklığının altında dahi kristalleşmenin başlamadığı ve sıvı yapının muhafaza edildiği bir durum görülmektedir. Bunun sebebi katı bir çekirdeğin oluşması için gereken aktivasyon enerji bariyerinin aşılması gerektiğidir ve bu seviye aşırı soğuma arttıkça yükselir. Aşırı soğuma sıvı metalin viskozitesine, düşen sıcaklıkla birlikte viskozite artış hızına, eriyik ve kristal arasındaki arayüzey enerjisine, aşırı soğuyan eriyik ve kristal fazların arasındaki serbest enerji farkının sıcaklığa bağlılığı, uygulanan soğuma hızı ve heterojen çekirdeklenme ajanlarının verimliliği gibi faktörlere bağlıdır. Aşırı soğuma değerleri metalden metale farklı olmakla birlikte en fazla bir kaç onluk derece mertebesindendir. Ancak heterojen çekirdeklenme bölgeleri yok edilebilirse, bir kaç yüz dereceyi bulabilmektedir. Aşırı soğumayı artırabilecek en etkili bir diğer yöntem de daha yüksek soğuma hızlarıdır. Camsı yapı oluşturan sıvıda ise durum daha farklıdır. Şekil 2.4'de gösterilen, normal bir metal ile camsı form oluşturan metal arasındaki fark katılaşma sıcaklığının altında dahi hacmin düşmeye devam etmesi ve viskozitenin artmasıdır.



Şekil 2.4 : Normal ve camsı malzemenin spesifik (birim kütle başına) hacmin sıcaklığa göre değişimi.

Katılaşma sıcaklığının altında belirli bir sıcaklıkta viskozite öyle büyük bir değer almaktadır ki artık sıvı adeta donmuştur ve katıya benzer bu yapıya cam denmektedir. Viskozitenin kritik bir değere ulaştığı bu sıcaklığa da camsı geçiş sıcaklığı adı verilmektedir. Fakat gerçekte keskin hatlarla belirli bir sıcaklıktan ziyade bu bir sıcaklık aralığıdır ve bu da camsı geçiş aralığı olarak anılmaktadır [14].

Kesit kalınlığı veya çapı en az 1 milimetreyi bulan camsı metallere kalın camsı metal denilmektedir. Günümüzde ise artık araştırmacılar minimum çapı ve kesit kalınlığı 10 mm'yi bulan camsı metallere kalın camsı metal adını verme eğilimindedirler. Kalın camsı metaller en az 3 malzemeden oluşan alaşımlardır. Çift bileşenli kalın camsı metaller bulunsa da bunların kalınlığı 1-2 mm'yi geçememekte ve nano ölçüde kristal çökeltiler camsı matris içinde gözlemlenmektedir. Kalın camsı metaller tipik olarak 10^3 K/s yada daha düşük katılaşma hızlarında üretilebilmektedir. Kalın camsı metal elde edilebilen en düşük katılaşma hızı 0.067 K/s gibi çok düşük bir hız olarak literatürde yer almaktadır [15]. Şekil 2.5'de gösterilen en büyük çapta üretilen kalın camsı metal ise 72 mm çapında ve $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$ alaşımındadır [16].



Şekil 2.5 : Maksimum çapta KCM çubuklarının yıllara göre keşfedilişi [6].

Kalın camsı metaller geniş bir aşırı soğutulmuş sıvı bölge gösterirler. Camsı geçiş sıcaklığı ile kristalleşme sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı geniştir ve genellikle

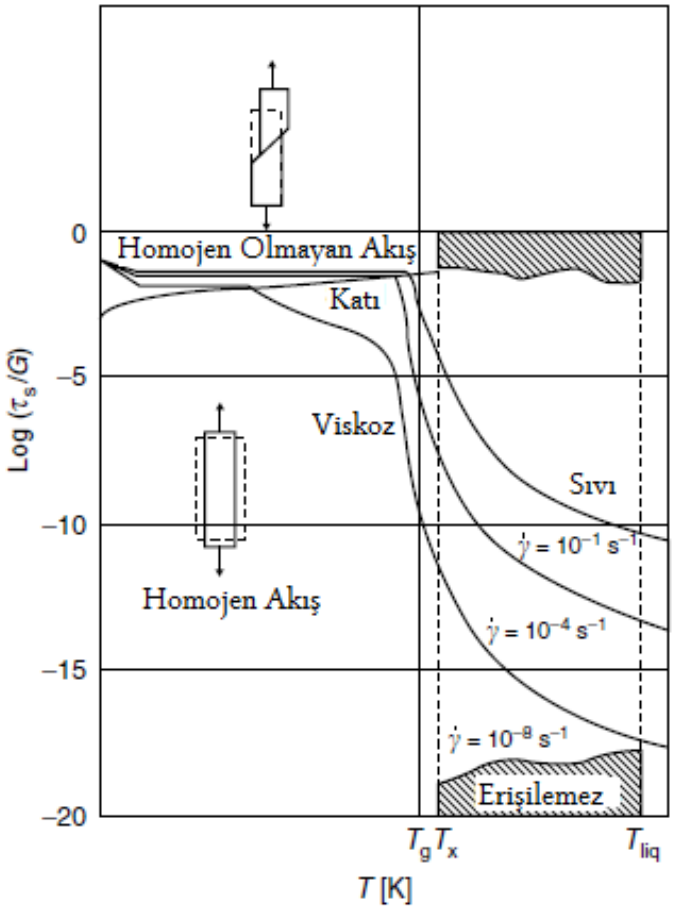
birkaç onluk derece mertebesindedir, ancak literatürde yer alan en yüksek fark $Pd_{43}Ni_{10}Cu_{27}P_{20}$ alaşımında 131K'dir [17].

Kalın camsı metal tanımında literatürde zaman zaman farklılıklar görülmektedir. Örneğin, 50 mikron kalınlığında olmasına rağmen çoklu malzemeden oluşan bir alaşım yapısına sahip olması sebebiyle kalın camsı metal olarak nitelendirilebilmektedir. Ayrıca camsı metal matrisi içerisinde nano ölçekte dahi kristal çökeltiler bulunmamalıdır. Bulunduğu durumda ise bu yapı kalın camsı metal kompozitini oluşturmaktadır. Camsı metal matrisinin incelenmesi için X-ışını kırınım yöntemi kullanılabilmekte ve genellikle geniş ve dağınık bir tepe noktası içeren bir yapı gözlemlendiğinde camsı fazın bulunduğu olarak yorumlanmaktadır. Nano ölçekte kristal çökeltiler bulunduğu durumda ise benzer yapı görülebilmekte ve yanılgıya düşülebilmektedir. Bu açıdan, kristal bir yapının olmadığını doğrulamak için yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu ile incelenmesinde fayda vardır.

2.4 Camsı Metalin Mekanik Özellikleri

Camsı metallere ilişkin ilk araştırmalarda elde edilebilen kalınlıklar sınırlı olduğu için çekme dayanımı, plastik deformasyon, kırılma tokluğu gibi mekanik özelliklere olan ilgi az duyulmuştur. 1990'lı yıllarda ise kalın camsı metallerin yapısal ve fonksiyonel malzeme olarak kullanılma konusundaki ilerleme mekanik özellikleri önemli bir noktaya taşımıştır.

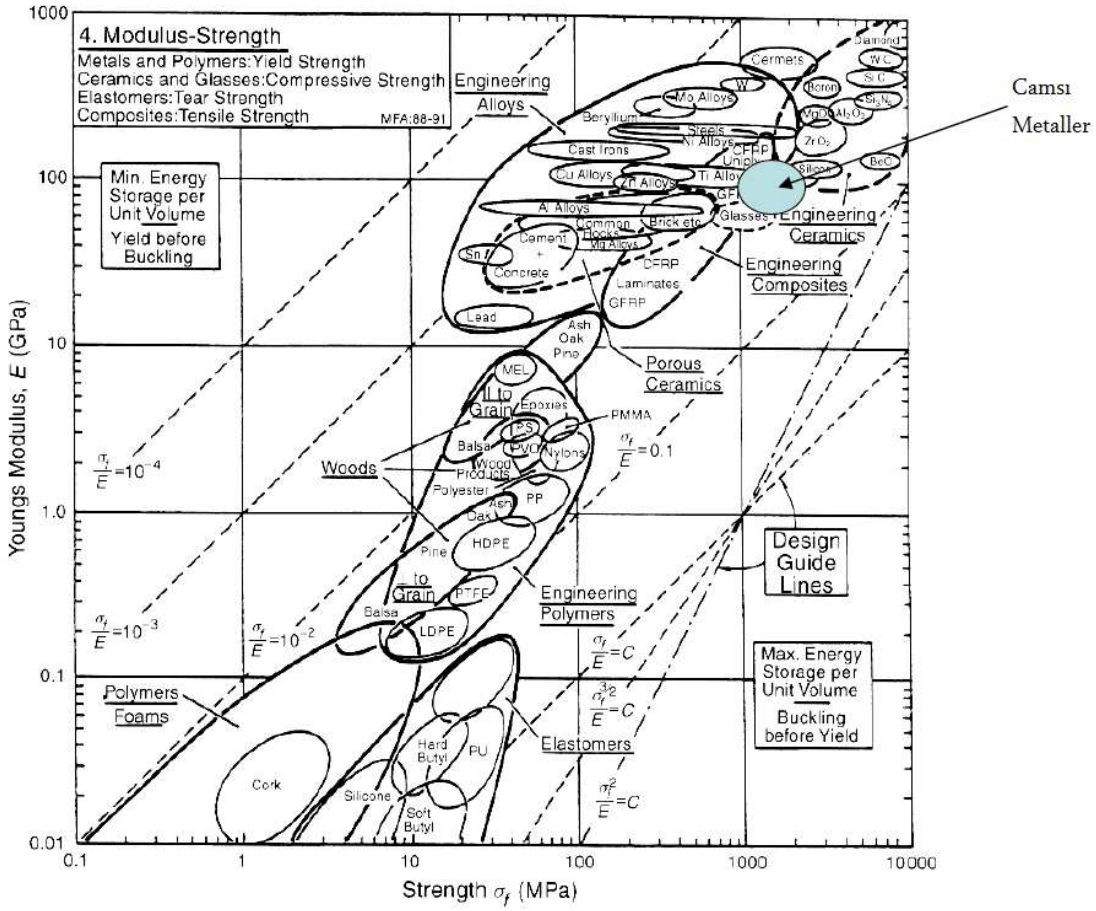
Camsı geçiş sıcaklığının özellikle çok altındaki sıcaklıklarda plastik deformasyon homojen değildir ve lokalleşmiş birkaç kayma bantlarının ilerlemesi yoluyla gerçekleşir. Kristal yapıya kıyasla, dislokasyonlardan kaynaklı plastik deformasyona karşı direnç oldukça azdır. Düzensiz atom dizilişi ise plastik deformasyona karşı büyük bir direnç gösterir. Şekil 2.6'te gösterildiği gibi kayma gerilmesi artan sıcaklığa bağlı olarak düşüş gösterir. Camsı geçiş sıcaklığına yakın sıcaklıklarda, plastik deformasyon homojen hale gelir ve daha düşük sıcaklıklara göre çok daha düşük gerilmeye ihtiyaç duyar. Düşük uzama oranlarında Newtonian viskoz akış geçerlidir ve kayma gerilmesi, kayma uzama hızına orantılıdır.



Şekil 2.6 : Camsı metaller için normalize edilmiş kayma gerilmesinin (kayma gerilmesinin kayma modülüne oranı) sıcaklığa bağlı değişimi [18].

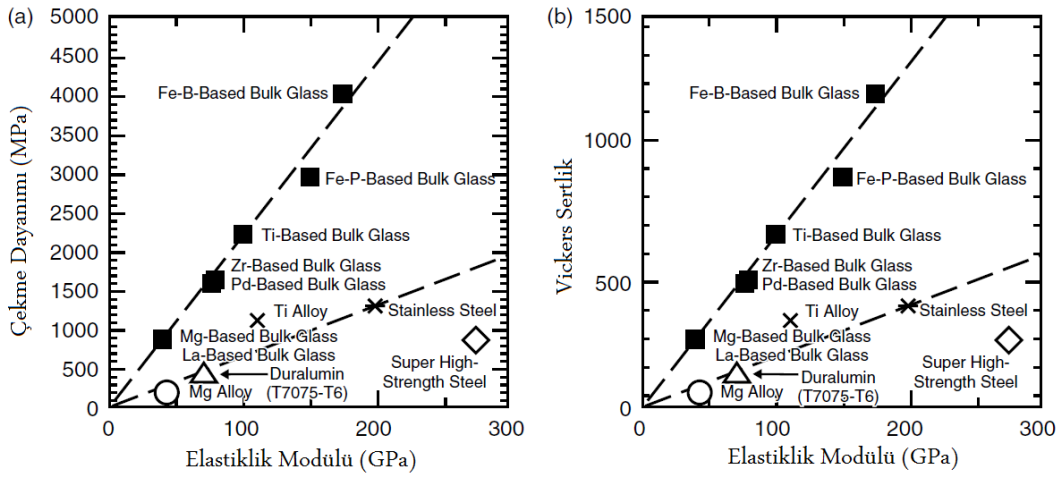
Kristalleşme sıcaklığı T_x, katılaşma sıcaklığı T_g'ye ne kadar yakın olursa camsı form elde edilebilirliği o kadar iyileşmektedir.

Homojen olmayan deformasyonun üstün geldiği düşük sıcaklıklarda, camsı metaller aynı yoğunluktaki kristal yapıdaki metallere göre daha yüksek dayanım gösterirler [19]. Amorf alaşımlar genellikle kristal alaşımlara göre ortalama olarak iki kattan daha fazla dayanıma sahiptirler. Camsı metallerin yüksek dayanıma sahip olması neticesiyle elastik uzama sınırı yaklaşık olarak %2'yi bulmaktadır ve kristal yapıdakilere göre üç ila dört kat daha fazladır. Şekil 2.7'te camsı metallerin diğer metal ve alaşımlara kıyasla daha yüksek dayanıma ve daha düşük elastiklik modülüne sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple, Hooke kanunu uygulandığında daha yüksek elastik uzama değerleri elde edilmektedir.



Şekil 2.7 : Çeşitli malzemeler için elastik uzama grafiği [20].

Şekil 2.8'te çekme dayanımı ve Vickers sertliğinin elastiklik modülüne bağlı olarak çeşitli camsı metaller ve kristal metaller için değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.8 : (a) Çekme dayanımı ve (b) Vickers sertliğinin elastiklik modülüne karşı amorf ve kristal metaller için kıyaslanması [21].

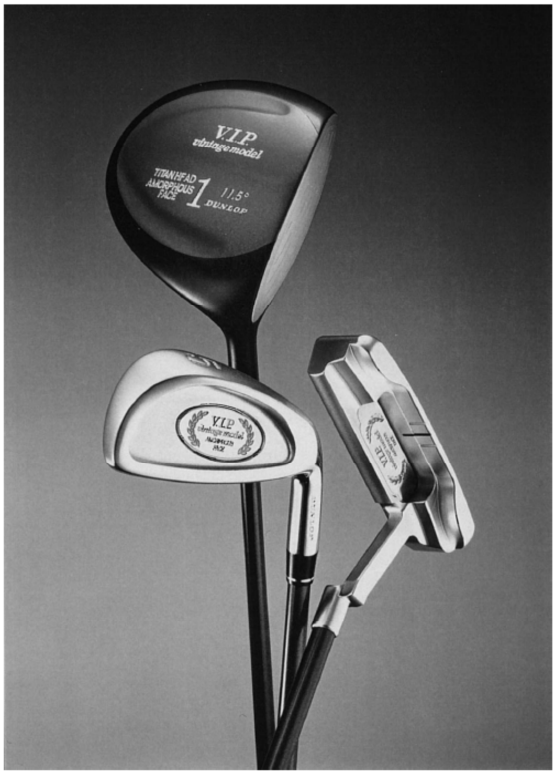
Camsı metaller göreceli olarak kayma yönünde daha zayıftırlar, bu yüzden daha yüksek Poisson oranlarına (0.35-0.37) sahiptirler [22]. Plastik bölgede, testere dişi şeklinde bir akma görülmektedir. Kayma bandı hareketinden dolayı yükte ani bir düşüş meydana gelmektedir. Bu durum kristal yapıda görülmemektedir. Buna rağmen camsı metal yüksek bir düzlem uzama kırılma tokluğuna sahiptir. Kristalliğin oluşumu ise darbe mukavemetini düşürdüğü görülmüştür [23].

Camsı metallerin deformasyon davranışı lokal bir yapıda olduğu için pekleşme göstermezler. Kayma bantlarının lokal deformasyonu esnasında pekleşmenin aksine yumuşama ve adyabatik ısınma gözlemlenmektedir. Camsı metallerin işlenebilirliği oldukça iyidir. Kristalleşme sıcaklığının altında viskoz akışla deforme oldukları için şekil verme prosesleri için uygundur.

Kristal yapı kusurlarının bulunmayışı sebebiyle korozyon dirençleri çok yüksektir.

2.5 Camsı Metal Uygulamaları

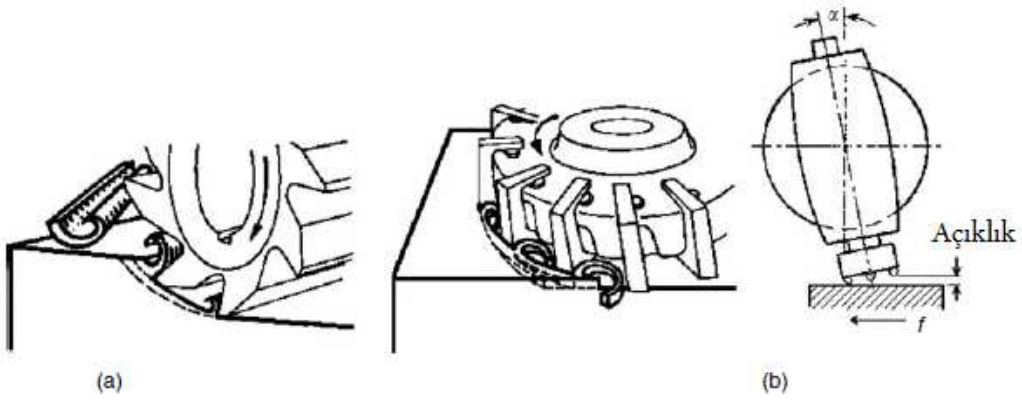
Kalın camsı metaller bir çok ilgi çekici özelliğe sahiptirler. Dayanım ve tokluğu bir arada sunabilen ender malzemelerdir. Yüksek seviyede elastik enerji muhafaza edebilme yeteneğine sahip camsı metaller potansiyel bir yay malzemesi haline gelmiştir. Biraraya gelen bu arzu edilen özellikler ilk ve en çok dikkat çeken uygulaması olan golf sopası başlıklarında kullanımını mümkün kılmıştır (Şekil 2.9). Uçaklarda, otomobillerde ve tıbbi implantlarda yapısal malzeme olarak uygulaması mümkündür. Aşırı soğutulmuş sıvı bölgede camsı metallerin işlenebilirliği çok yüksektir ve bu özelliğinden faydalanıldığı bir çalışmada, Pd-bazlı kalın camsı metalin sürtünme kaynağında kristalleşme olmadan kaynak bölgesi elde edilebilmiş ve bu sayede kaynak bölgesi dayanımı ile diğer bölgelerdeki dayanımın kıyaslanabilir mertebede olduğu görülmüştür [24]. Camsı metaller geleneksel çelikler veya titanyuma kıyasla organizma içerisinde ayda 1 mm’ye yaklaşan çözünme hızıyla tıbbi implantlarda kullanım alanı bulmaktadır. Camsı metallerin yüksek dayanım ve düşük ağırlık avantajları sebebiyle sertleştirilmiş köpük olarak uzay araçlarında kullanımı araştırılmaktadır.



Şekil 2.9 : Camsı metalden yapılmış golf sopası başlığı.

3. FREZELEME

Frezeleme, dönen bir çoklu dişe sahip kesme takımı ile iş parçasının ilerleme hareketini yaptığı bir yöntemle talaşın kaldırılmasıdır. Bu operasyonda kesme hızı kesme takımının yüksek hızda dönüşü ile artırılır. Kesme takımının çoklu kesme uçları yüzey kalitesinin iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır. Frezelemenin, tornalama ve delme işlemlerine kıyasla en önemli farkı bu iki yöntemde kesme takımı ile işlenen malzemenin sürekli bir halde temasta bulunurken frezelemede kesintili bir kesme işleminin olmasıdır. Frezeleme operasyonunda her bir diş değişken kalınlıkta talaş üretir. Frezeleme operasyonları çevresel ve alın frezeleme olarak sınıflara ayrılmaktadır (Şekil 3.1).



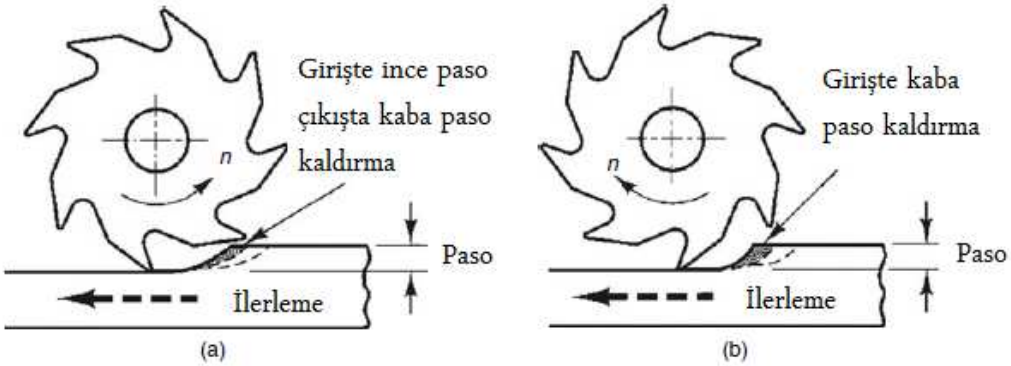
Şekil 3.1 : Çevresel ve alın kesme takımları: (a) çevresel ve (b) alın frezeleme [25].

3.1 Çevresel Frezeleme

Çevresel frezelemede kesme, kesici dişlerin takımın çevresi boyunca yer aldığı şekilde gerçekleşir ve işleme yüzeyi düzlemi ile kesici takımın ekseni birbirine paralel durumdadır. Çevresel frezeleme genellikle yatay freze tezgahlarında yapılır. Bu sebeple, yatay işleme olarak da anılır. Yüzeyin görünümü ve talaş formu tipi, kesme takımının iş parçasının hareketine göre olan dönüş yönünden etkilenir. Bu bakımdan çevresel frezeleme iki tip olarak ayrılabilir : yukarı frezeleme ve aşağı frezeleme.

3.1.1 Yukarı frezeleme (Geleneksel frezeleme)

Yukarı frezeleme, kesme takımının dönüş yönünün iş parçasının ilerleme yönüne zıt olduğu durumdur. Kesici diş malzemeden talaşı kademeli olarak kaldırır ve talaş kesici uç ilerledikçe sıfır kalınlığından artarak büyür. Böylece talaşı kaldıran operasyon çevrimi başlangıçta önce kayma hareketiyle sonra ise çarpma hareketiyle gerçekleşir ve asıl kesme hareketiyle takip edilir (Şekil 3.2a). Bazı metallerde yukarı frezeleme işlenmiş yüzeyin pekleşmesine ve hatta gürültüye ve dişlerde aşırı körleşmeye sebep olmaktadır. Yukarı frezelemenin avantajları diş boşluğunun giderilmesine ihtiyaç duymaması, operasyonun daha güvenli olması (kesme takımının iş parçası üzerinde tırmanmaması), dişlere gelen yüklerin kademeli olarak artması, yığma kenar parçacıklarının işlenmiş yüzeyden uzak olması ve kesme takımının iş parçasının pullu yüzeyinden etkilenmemesi olarak bilinmektedir.



Şekil 3.2 : (a) Yukarı ve (b) aşağı frezeleme.

3.1.2 Aşağı frezeleme (Yokuş frezeleme)

Aşağı frezeleme, kesme takımının dönüş yönünün iş parçasının ilerleme yönünde olduğu durumdur. Yokuş frezeleme olarak da isimlendirilen bu yöntemde kesme takımı iş parçası üzerinde tırmanmaya çalışır. Kesici dişlerin iş parçası ile ilk teması esnasında talaş maksimum kalınlıkta kaldırılır ve temasın bittiği noktada kalınlık sıfıra gider (Şekil 3.2b). Aşağı frezelemede kesme kuvvetleri aşağı yöndedir. Bu sebeple yeterli rijitliğe sahip olmayan tezgahlarda ve diş boşluğunun giderilmediği durumlarda, kesme takımı iş parçası üzerinde tırmanma hareketi yaparak tezgaha zarar verebilir. Aşağı frezelemenin avantajları fikstürlerinin basit ve daha az maliyetli oluşu (kesme kuvvetlerinin aşağı yönde olmasından kaynaklı), bu sayede de sabitlenmesi zor plaka şeklindeki parçalarda işleme kolaylığı, daha az güç gereksinimi getiren talaş açısı büyük olan kesme takımları kullanılabilmesi, daha az

takım körlenmesi ve gürültü ve titreşimin daha az meydana gelmesi sebebiyle daha yüksek bir yüzey kalitesi elde edilebilmesidir.

3.2 Alın Frezeleme

Alın frezelemede kesici takım ekseni işlenmiş yüzeye diktir. Büyük çapta kesme takımlarının kullanıldığı durumlarda, takım milini hafifçe birkaç derece eğerek belirli bir miktar açıklık bırakılarak daha iyi bir yüzey kalitesi edilebilmekte ve takım körlenmesi azaltılabilmektedir. Alın frezeleme genellikle dik frezeleme tezgahlarında yapılır ve bu sebeple de dik frezeleme olarak anılmaktadır. Alın frezeleme, çevresel frezelemeye kıyasla daha üretken bir işlemdir.

3.3 Kesme Takımları

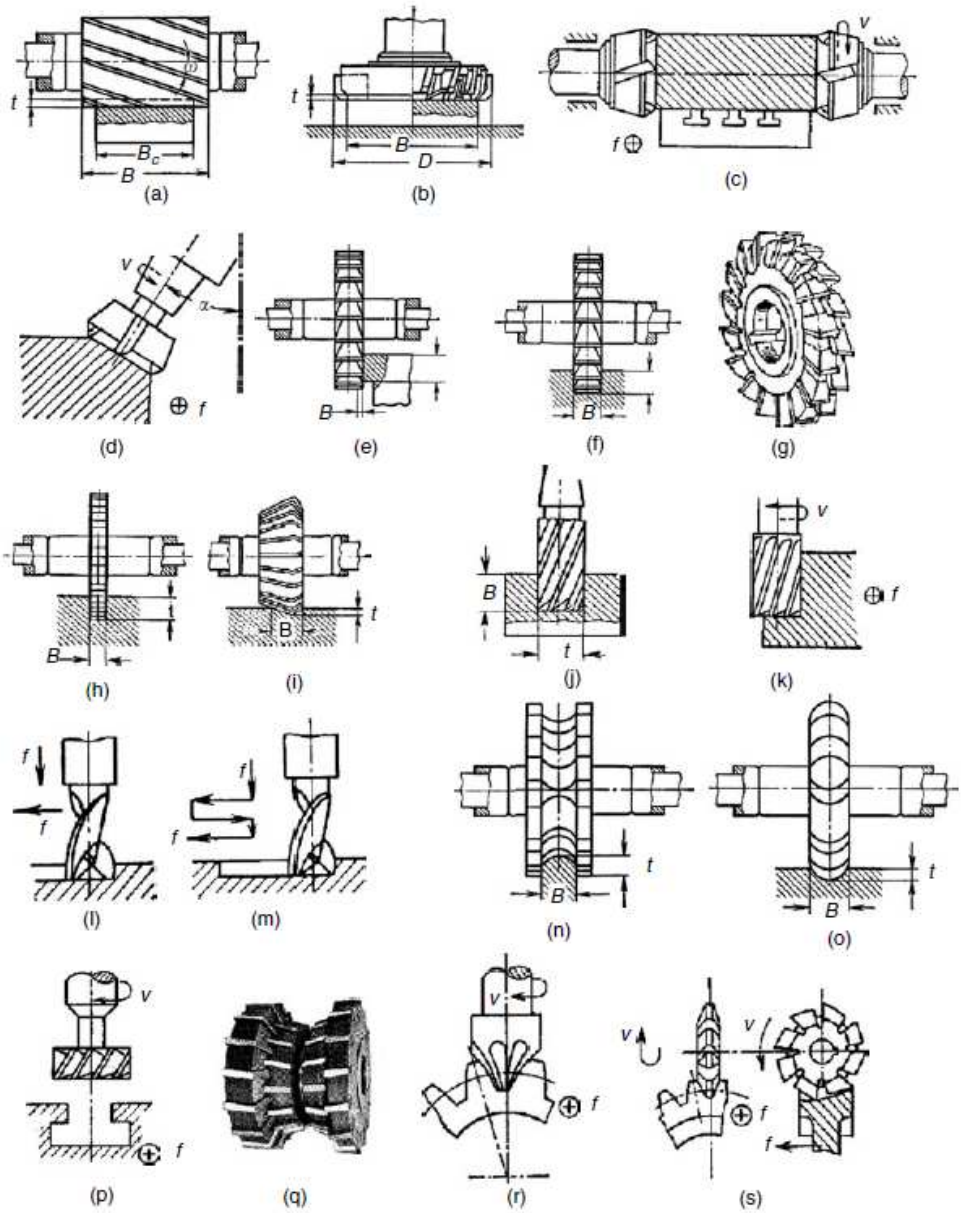
Kesme takımları her bir özel işleme için ayrı olarak seçilmektedir. Kesme takımları yatay frezeleme tezgahları için malafa üzerine monte edilebilmesi amacıyla delikli olabilir veya düz yada konik bir mafsal ile bağlanarak dikey yada yatay freze tezgahlarında kullanılabilirler. Şekil 3.3'te çeşitli kesme takımları gösterilmektedir.

Çevresel kesme takımları düz veya helisel olmaktadır. Helisel kesme takımları geniş kesme genişliklerinde pürüzsüz bir kesme ve yüksek yüzey kalitesi sağlamak için tercih edilmektedir (Şekil 3.3a). Çevresel kesme takımları genellikle yatay frezeleme tezgahlarında kullanılmaktadır.

Alın kesme takımları yatay (Şekil 3.3b), dikey (Şekil 3.3c) ve eğimli (Şekil 3.3d) düz yüzeylerin işlemesinde kullanılmaktadır. Dik frezeleme tezgahlarında, planya tipi frezeleme tezgahlarında ve herhangi bir açıda işlemek için döner milli frezeleme tezgahlarında kullanılmaktadırlar.

Yan yüzey kesme takımları yatay frezeleme tezgahlarında malafaya bağlanarak bir desteğin dik yüzeyini (Şekil 3.3e) veya kama yuvasını işlemede (Şekil 3.3f) kullanılırlar.

Birbirine kilitli yan yüzey kesme takımları yatay frezeleme tezgahlarının malafa üzerine bağlanarak geniş kama yuvalarını ve çukurlarını işlemede kullanılırlar (Şekil 3.3g).



Şekil 3.3 : Çeşitli tiplerde frezeleme için kesme takımları.

Dilme testeresi (Şekil 3.3h) ve boyuna kanalların veya kenar pahlarının üretiminde tercih edilen açılı kesme takımları (Şekil 3.3i) yatay frezeleme tezgahlarında kullanılmaktadır.

Parmak frezeler şaft tipindeki takımlar olup dik frezeleme tezgahlarında kullanılabilirler. Kama yuvalarının (Şekil 3.3j) veya dik yüzeylerin (Şekil 3.3k) işlenmesinde tercih edilmektedirler.

Anahtar kesiciler yine şaft tipinde dik frezeleme tezgahlarında kullanılabilen takımlardır. Tek paso işlemelerinde (Şekil 3.3l) veya çoklu paso işlemelerinde (Şekil 3.3m) kullanılabilirler.

Modül freze bıçakları yatay frezeleme tezgahlarında içbükey (Şekil 3.3n) veya dışbükey (Şekil 3.3o) profilleri işlemede kullanılmaktadır.

T-oluk kesme takımları T şeklindeki olukların işlenmesinde kullanılmaktadır. Dik frezeleme tezgahlarında iki aşamada işlenirler. İlk aşamada parmak freze ile oluk açılmakta, ikinci aşamada ise T-oluk kesme takımı ile son şekli verilmektedir (Şekil 3.3p).

Bileşik kesme takımları çoğunlukla bileşik yüzeylerin işlenmesinde yüksek üretkenlik ve doğrulukla işlenebilmektedir (Şekil 3.3q).

Gömme parçalı kesme takımları tok ve az maliyetli çelik gövdeden yapılmış, alaşımlı takım çeliği, HSS, karbür, seramik veya CBN malzemeden dişlere sahip ve bu dişlerin mekanik olarak vida ve bazı durumlarda sert lehimleme ile gövdeye bağlandığı takımlardır. Bu tip kesme takımları çoğunlukla büyük çapta alın frezeleme takımlarına veya yatay frezeleme takımlarına bağlanarak kullanılmaktadır.

Dişli kesme takımları dik (Şekil 3.3r) veya yatay (Şekil 3.3s) frezeleme tezgahlarında düz ve helisel dişlilerin üretiminde kullanılır. Diş yüzeyinde keskinleştirilirler. Seri üretim ve yüksek doğruluk istenen durumlarda ise azdırma veya dişli açma tezgahları kullanılmaktadır.

3.4 Çok Amaçlı Freze Tezgahları

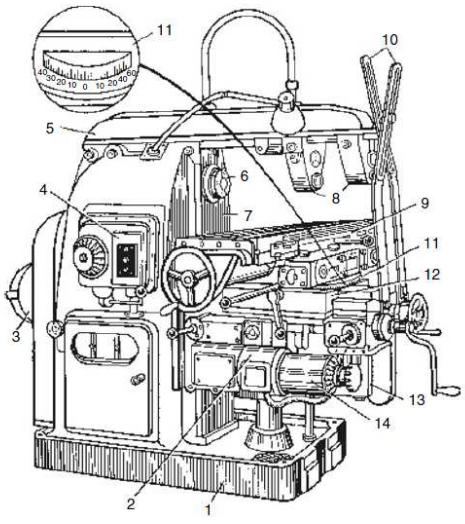
Freze tezgahları düz yüzeylerin, dış hatlı yüzeylerin, kompeks ve düzensiz alanların, olukların, dişlerin, dişlilerin, helisel yivlerin, helezon deliklerin ve eğri millerin işlenmesinde kullanılır. Frezeleme tezgahları uygulamaya göre sınıflandırılabilir. Çok amaçlı freezeleme tezgahları tekli ve az sayıda parça üretiminde kullanılırken özel amaçlı frezeleme tezgahları belirli iş parçalarında tek veya birçok ayrık freze operasyonunun seri üretim olarak gerçekleştirilmesinde kullanılır. Çok amaçlı freze tezgahları bir çok işe oldukça uygundur ve diz tipi, dikey yatak tipi, planyalı tip ve döner tablalı tipler olarak alt kategorilere bölünebilir.

3.4.1 Diz tipi frezeleme tezgahları

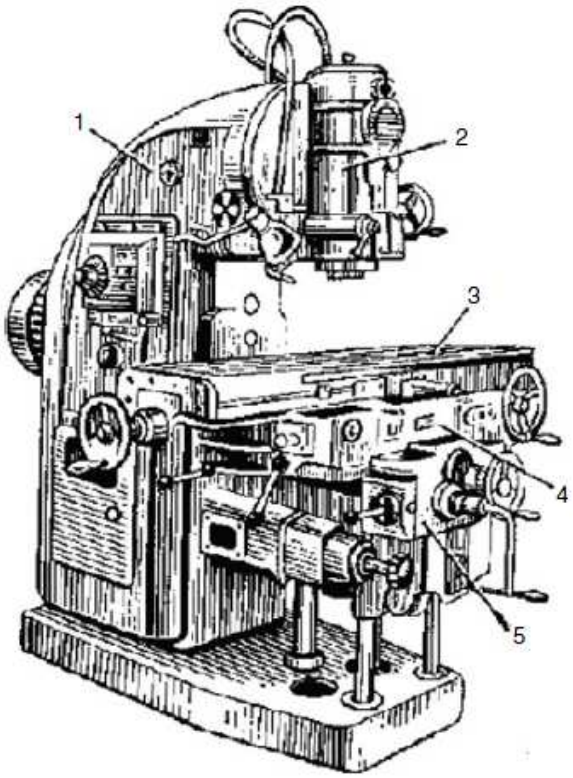
Diz tipi freze tezgahlarının en önemli özelliği tablanın 3 kartezyen doğrultuda harekete izin vermesidir. Bu tip tezgahlar yatay, universal yatay, dik ve koç başlı diz tipi freze tezgahları olarak bir alt gruba ayrılırlar. Tablanın bağlandığı ve dikeyde bir

kızak boyunca gezmesini sağlayan bir özellikte olduğu için diz tipi tezgah adını almaktadır.

Yatay frezeleme tezgahlarında mil yatay konumdadır ve tabla birbirine karşılıklı olarak dik olan üç yönde hareket etmektedir. Universal yatay frezeleme tezgahları ise genel olarak yatay frezeleme tezgahlarına benzer düzendedir. Temel fark ise tablanın dik eksen etrafında ±45º dönebilmesidir ki bu sayede helisel kanalları ve helisel dişlileri işlemeye imkan verir. Şekil 3.4'te universal yatay milli frezeleme tezgahı gösterilmektedir. Dik frezeleme tezgahları ise yatay frezeleme tezgahlarının aksine dik bir mile sahiptirler ve üst kol kısmı bulunmaktadır. Üst kol yatay frezeleme tezgahlarında yataklama braketini tutarak takım malafasının uç kısmını destekler. Şekil 3.5'te universal yatay milli frezeleme tezgahı gösterilmektedir. Koç başlı frezeleme tezgahları dikey ve yatay eksenler etrafında dönebilen ek bir mile sahip olmaları itibariyle universal tiptekilerden ayrılır. Ayrıca mil işlenen iş parçasına göre herhangi bir açıya ayarlanabilir. Modern tezgahlarda esas kesme hareketi, iş parçasının ilerleme hareketi, iş tablasının tüm yönleri için ani gezinme için ayrı bir tahrik ve hızı değiştirmek için tekli manivela kontrolü sağlanmaktadır. Frezeleme tezgahlarının birim ve komponentleri geniş ölçüde birleştirilmiştir. Yatay diz tipi frezeleme tezgahlarının özellikleri tablanın çalışma yüzeyinin boyutları, üç kartezyen doğrultuda maksimum tabla hareketi, tablanın dönebileceği maksimum açı, malafa çapı, malafa ekseni ile üst kol arasındaki maksimum mesafe, mil hız kademelerinin sayısı, üç doğrultuda ilerleme sayısı, ana motor ve ilerleme motorunun gücü ve hızı ile tezgahın genel boyutları ve ağırlığıdır.



Şekil 3.4 : Universal yatay milli frezeleme tezgahı.



Şekil 3.5 : Dikey frezeleme tezgahı.

3.4.2 Dikey yatak tipi frezeleme tezgahları

Rijit ve güçlü yapıları sayesinde bu tezgahlar ağır iş yükü gerektiren büyük iş parçalarının işlenmesinde kullanılmaktadır. Mil üzerinde dik yönde hareket edebilen bir dişli kutusu ve ayrı bir tahrik motoru vardır. Bazı tezgahlarda mil de dönme hareketi yapabilmektedir. Yatayda her iki eksende hareketi tabla yapmakta ve dik eksendeki hareket mil tarafından yapılmaktadır.

3.4.3 Planyalı tip frezeleme tezgahları

Yatay, dikey ve eğimli yüzeylerin işlenmesinde kullanılabilen bu tezgahlar tekli ve ikili gövdeden oluşmakta ve tek yada daha çok mille birlikte ayrı tahriklere sahiptirler.

3.4.4 Döner tablalı tip frezeleme tezgahları

Döner tablalı tipteki tezgahlar aynı zamanda sürekli frezeleme tezgahları olarak da isimlendirilmektedir. İş parçası operasyon durdurulmadan da yüklenebilmektedir. Yüksek üretilebilirliğe sahip oldukları için seri üretimde de kullanılmaktadırlar.

3.5 Kesici Takım Malzemeleri

Frezeleme tezgahlarında kesici takımların malzemesi işlenecek olan malzemenin cinsine ve talaş kaldırma işleminin türüne göre belirlenmektedir. İş parçasının malzemesinin sertliği, ısıl işlem görüp görmediği gibi özelliklerine bağlı olarak kesici takım seçilmektedir. Yaygın olarak kullanılan kesici takım malzemeleri takım çelikleri, yüksek hız çelikleri, sert metal kesici uçlar (karbürler), kaplamalı kesici uçlar, seramikler, CBN uçlar ve elmas kesicilerdir.

Takım çelikleri metal, plastik, ahşap gibi bir çok malzemenin ekonomik olarak işlenmesinde kullanılırlar. Şekil verilebilirliği kolay olan bu malzemeler ile elde edilen yüzey kalitesi nispeten düşük olup 400ºC kesme sıcaklıklarına dek kullanılabilmektedirler.

Yüksek hız çelikleri, konvansiyonel takım tezgahlarında en yaygın olarak kullanılan ve takım çelik malzemesine kıyasla krom, tungsten, molibden, vanadyum, kobalt, silisyum, manganez, fosfor ve sülfür gibi alaşım elementleri içeren malzemelerdir. Bu sayede elde edilen yüzey kalitesi de daha yüksektir. HSS olarak da adlandırılan bu malzemeler 600ºC kesme sıcaklıklarına çıkılmasına izin vermektedir.

Sert metal kesici uçlar, toz metalürjisi yardımıyla sert karbür parçacıkları ile bağlayıcı maddenin bir araya getirilerek yüksek basınç altında sıkıştırılması ile elde edilirler. Genellikle bağlayıcı olarak kullanılan kobalt ile tungsten karbür, titanyum karbür gibi karbür tozları bir araya getirilmektedir.

Kaplamalı kesiciler, yüksek dayanım özelliklerinin yanında yüksek aşınma direnci sağlayan takımlardır. Kaplama malzemesi olarak titanyum nitrür, titanyum karbür ve seramikler tercih edilmektedir. Titanyum nitrür (TiN) yüksek sertlik, yüksek sıcaklıkara dayanım, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek nüfuziyet özelliklerini bir arada sunmaktadır.

Seramikler, yüksek basınç altında soğuk olarak sıkıştırılıp yüksek sıcaklıkta sinterlenen alüminyum oksitten oluşur. Sertleştirilmiş çelik ve dökme demirin kesikli talaş kaldırma proseslerinde tercih edilirler.

CBN uçlar, elmasa yakın sertlikleri ile yüksek aşınma direnci gerektiren yüksek hızlarda sert dökme demir ve sertleştirilmiş çeliğin işlemesinde kullanılırlar. Karbür gövdeye kübik boron nitrürün sinterlenmesi ile elde edilir.

Elmas kesiciler, çok yüksek sertlik ve düşük genleşme sıcaklıkları özellikleri ile yüksek yüzey kalitesi gerektiren durumlarda kullanılırlar.

3.6 Alın Frezelemenin Mekaniği

Alın frezeleme geniş yüzeyli metal parçaların kaba ve ince paso kaldırılan işlemelerinde en efektif ve üretken işleme metodudur. Yüzey pürüzlülüğü, deforme olmayan talaş boyutları, kesme hızı bileşenleri ve dinamik kesme davranışı frezelemenin mekaniğini oluşturmaktadır. Alın frezeleme prosesinin kinematiğini takımın dönüşü ve yer değiştirmesi meydana getirir. Dönme Z eksenine paralel bir eksen etrafında oluşurken, ilerleme X ekseninde gerçekleşir ve diş başına ilerlemeye (f_z) bağlıdır. Her bir paso belirli bir derinlikte (t_z) malzeme kaldırır. İşleme prosesi birtakım parametrelere bağlı gerçekleşir ve bu parametreler kesme takımının geometrik karakteristiği ve kesme prosesi parametreleri olarak iki başlık altında toplanabilir. Bu parametrelerden bazıları kesme takım çapı (D), kesme takımındaki diş sayısı (z), diş başına ilerleme (f_z), kesme hızı (v_c), kesmenin eksenel derinliği (t_z), kesmenin radyal derinliği (t_{xy}), eksenel talaş açısı (γ_a), radyal talaş açısı (γ_r) ve kesme ucunun değişmesidir (s) [26].

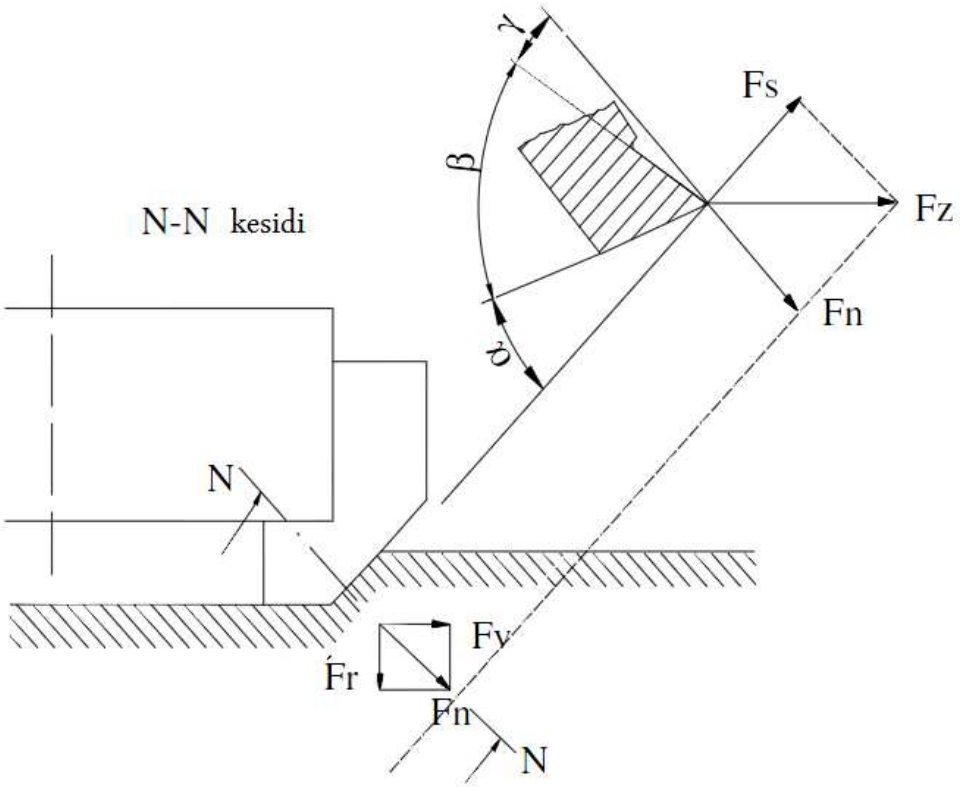
Kesme prosesinin tahmin ve simule edilebilmesi için araştırmacılar bir çok analitik model kurarak işleme proseslerini ve fikstür tasarımlarını kontrol ve optimize etmeye çalışmaktadırlar. Bu sayede takım kırılması, takım aşınması, tezgah titreşimleri ve yüzey kalitesi gibi mekanizmaların temel anlamda anlaşılması sağlanmaktadır [27]. Bu alanda büyük bir ilgiyi kesme parametrelerinin optimizasyonu görmektedir. Antonio ve Castro yaptıkları çalışmada genetik algoritmalara dayanarak çok pasolu alın frezeleme için optimum kesme parametrelerini seçmek için optimizasyon modelleri geliştirmiştir [28]. Yine bu alanda bir diğer yaklaşımı Lin, Taguchi metodunu kullanarak alın frezeleme ile işlenen paslanmaz çeliğin karakteristiğini optimize etmeye çalışmıştır [29]. Bunun dışında çapak oluşumu ve minimize edilmesi, kesme kuvvetleri ölçülerek kesme takımının aşınmasının belirlenmesi, kesme gürültüleri yine ilgi çeken araştırma konularındandır.

Alın frezelemede kesme hızı ve ilerleme hızı, kesme kuvvetlerini ve yığma kenar oluşumunu etkilemektedir. İşlenebilirlik genellikle bir iş parçası malzemesinin istenen forma kesilebilme yeteneği olarak tanımlanabilir. İşlenebilirlik açısından en önemli kriterler yüzey pürüzlülüğü, yığma kenar oluşumuna yatkınlık, takım ömrü,

talaş formu ve miktarı ve kesme kuvvetleridir [30]. Yığma kenar oluşumunun en önemli etkisi yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkilemesidir.

Dinamik frezelemede yüzey oluşum mekanizması kesme kuvvetlerini belirlemektedir. Kesme kuvvetleri ile takım aşınması arasındaki ilişkiyi analiz etmek için kesme kuvvetlerinin ölçümü gereklidir. Kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini belirlemek için bu ölçümün hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Metal kesmede, paso derinliği, ilerleme hızı ve kesme hızı ana kontrol parametreleridir.

Frezeleme operasyonu esnasında oluşan kesme kuvvetleri değişkendir. Bu sebeple pratikte hesaplamaları basitleştirmek için, kesme kuvvetleri talaş kesidinin ortalamasına göre hesaplanır. Frezelemede birden fazla kesme ucu talaşı aynı anda iş parçasından kaldırmaktadır. Böylece, tek bir kenara etki eden ortalama kesme kuvveti (F_{zz}) ve bileşenleri ortalama kesme kuvveti (F_{sz}), ortalama radyal kuvvet (F_{rz}) ve ortalama ilerleme kuvveti (F_{vz}) olur (Şekil3.6).



Şekil 3.6 : Alın frezelemede kesme kuvvetleri.

Kesme takımı üzerindeki ortalama kesme kuvvetleri (kesme kuvveti F_s, ilerleme kuvveti F_v, radyal kuvvet F_r ve kesme ucu sayısı (Z_c) :

$$F_s = Z_c * F_{sz} \quad \textbf{(3.1)}$$

$$F_v = Z_c * F_{vz} \quad \textbf{(3.2)}$$

$$F_r = Z_c * F_{rz} \quad \textbf{(3.3)}$$

denklemleri ile hesaplanarak bulunur. Kesme kuvvetleri şematik olarak Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Ana kesme kuvvetinin (F_z) bileşenleri N-N kesidinde kesme ucuna dik kesme kuvveti (F_s) ve normal kuvvet (F_n)'dir. Normal kuvvetin (F_n) bileşenleri ise ilerleme kuvveti (F_v) ve radyal kuvvettir (F_r) [31].

Kesme parametrelerini belirlemek için kesme hızı ve bir dişin ilerleme değerinin bilinmesi gereklidir. Kesme hızı, freze takımı üzerindeki bir noktanın bir dakikada metre cinsinden aldığı yoldur. Devir sayısı (n), kesme hızına (V_c) ve kesme takımı çapına (d) bağlıdır :

$$n = \frac{V_c}{\pi * d} \quad \textbf{(3.4)}$$

Kesme hızına etki eden faktörler; kesici takım malzemesinin cinsi, iş parçasının malzemesinin cinsi, elde edilecek yüzey kalitesi, talaş derinliği, tezgahın gücü ve kesme sıvısının kullanılıp kullanılmamasıdır.

İlerleme (v_f), freze takımının iş parçası üzerinde doğrusal olarak bir dakikada mm cinsinden aldığı yoldur. Freze tezgahlarında kullanılan kesici takımlar genellikle çok uçlu takımlar olduğu için ilerleme değeri verilirken tek bir uç için (f_z) verilir. Bir devirdeki ilerlemeyi elde etmek için bu değer uç sayısı (z) ile çarpılır. Tezgahın bir dakikadaki ilerleme hızını bulmak için ise bir devirdeki ilerleme ile devir sayısı (n) çarpılır. Çizelge 3.1'de kesici takım ve iş parçası malzemelerine göre tavsiye edilen kesme hızları ve ilerleme hızları verilmektedir.

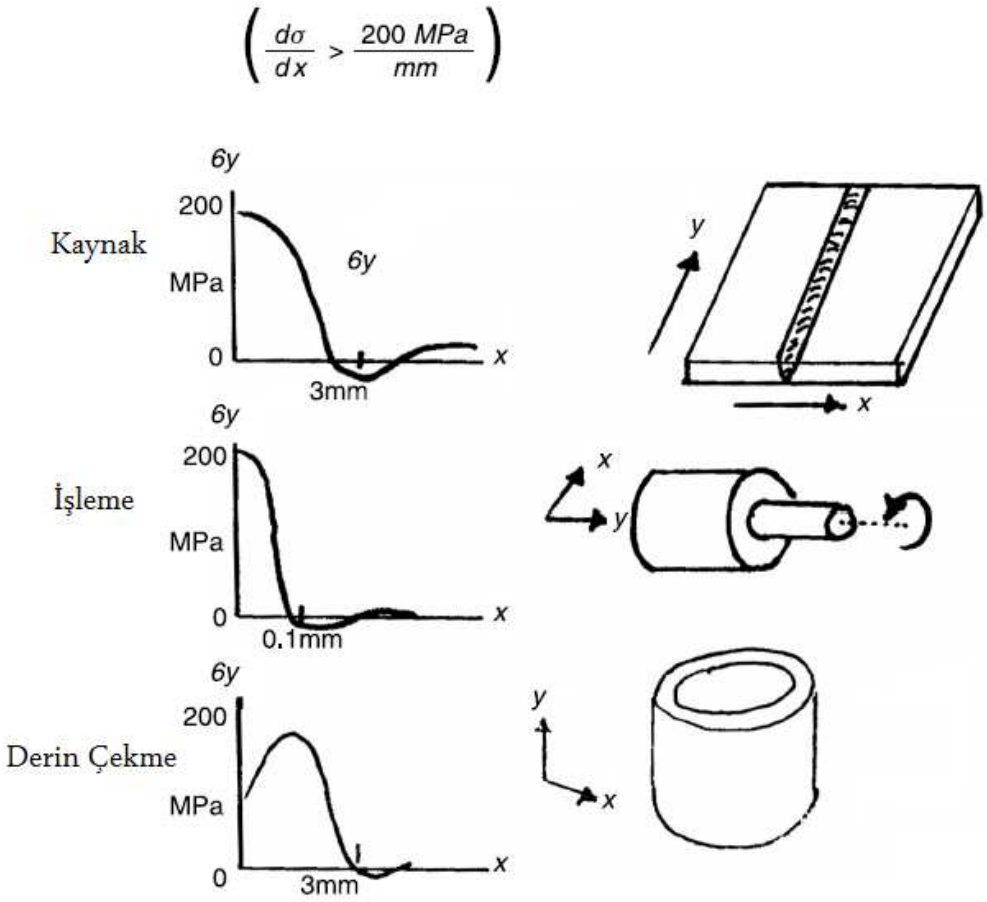
$$v_f = n * f_z * z \quad \textbf{(3.5)}$$

Çizelge 3.1 : Kesici takım malzemeleri için kesme ve ilerleme hızları [32].

İş Parçasının Malzemesi	**Kesme hızı (m/dak)**		**İlerleme hızı (mm/dev)**	
	Yüksek Hız Çeliği	Sert Metal Kesici Uç	Yüksek Hız Çeliği	Sert Metal Kesici Uç
Alaşımsız Çelik	30-40	80-150	0,1-0,2	0,1-0,3
Alaşımlı Çelik R_m 750 N/mm^2	25-30	80-150	0,1-0,2	0,1-0,3
Alaşımlı Çelik R_m 1000 N/mm^2	15-20	60-120	0,1-0,15	0,1-0,3
Dökme Demir	20-25	70-120	0,15-0,3	0,1-0,3
Bakır Alaşımı	60-150	150-400	0,2-0,3	0,08-0,15
Hafif Metalller	150-250	350-800	0,2-0,3	0,1-0,2

4. KALINTI GERİLME

Kalıntı gerilmeler metallerin termal-mekanik işlemlere maruz kaldığı durumun kaçınılmaz sonucudur. Kalıntı gerilme alanları genellikle uniform değildir ve yüksek gerilme değişkenlikleri gösterir. Şekil 4.1'de 200 Mpa akma dayanımına sahip tipik bir metalin kalıntı gerilme büyüklükleri ve dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 4.1 : 200 Mpa akma dayanımına sahip tipik bir metalin kalıntı gerilme büyüklükleri ve dağılımları.

Yüksek gerilme değişkenlikleri sebebiyle maksimum gerilmeyi ve lokasyonunu eksiksiz bir biçimde belirlemek için onlarca yada yüzlerce kez yapılacak ve 1 mm mertebesinde çözünürlükle alınacak kalıntı gerilme ölçümleri gerekebilir [33].

Kalıntı gerilmeler tüm dış yükler kaldırıldığı durumda elastik bir yapı içerisinde mevcut bulunan gerilmeler olarak tanımlanır. Tüm kalıntı gerilme sistemlerin

ürettikleri bileşke kuvvetler ve moment sıfırdır ve kendi içinde dengeleyicidir. Kalıntı gerilmeler boy skalasına göre üç gruba ayrılabilirler. Birinci grup gerilmeler milimetreler mesafesinde etkiyen ve makroskopik ismini de alabilen tiptedir. İkinci grup 1-100 mikron mertebesinde farklı fazlar veya gömülmüş partiküller arasında olan tiptir. Üçüncü grup ise atomik ölçüde ve her bir tane üzerinde değişim gösterebilen gerilme tipidir. İkinci ve üçüncü grup mikro uzama etkileri ile bağdaştırılırken birinci grup makro uzama etkisi olarak anılır [34].

Kalıntı gerilmeler çoğunlukla şekil verme prosesleri ile ilişkilendirilir ve dövme, sac metal şekil verme, kaynak, ısıl işlem, kompozit üretimi ve diğer imalat prosesleri ile tetiklenir. Kalıntı gerilmelerin çoğu etkileri doğada zarar vericidir. Örneğin, bir parçanın dış yüzeyindeki çekme yönündeki kalıntı gerilmeler, parçanın yorulmaya maruz kaldığı durumda ürünün erken hasara uğramasına yol açmaktadır. Kalıntı gerilmeler ayrıca sac metalin esnek gerinim toparlanması arzu edilmeyen ölçüsel değişimlere, döküm parçalarda sıcak yırtılma sakat oranlarının artmasına, metal matrisli kompozitlerde matris ve takviyenin arayüzeyinde hasara, kaynak edilmiş parçanın çarpılmasına veya boyutsal kararsızlığa uğramasına neden olarak ana malzemenin kalıcı hasara uğramasına ve gerilmeli korozyon çatlağının hızlı bir şekilde ilerlemesine yol açabilir. Zarar verici etkilerinin yanı sıra kalıntı gerilmelerden yararlanılan birkaç uygulama da mevcuttur. Örneğin, bilyalı püskürtme ile parçanın dış yüzeyinde basma yönünde kalıntı gerilmeler oluşturularak yorulma ömrü artırılabilmektedir.

Çoğu zaman parça içerisindeki kalıcı çarpılmalar ve deformasyonlar kalıntı gerilmeleri beraberinde getirmektedir. Parçalar içerisindeki tekil çarpılmalar ürünlerin montajı esnasında birçok zorluğa sebep olabilmektedir. Örneğin, uçak ve otomobil endüstrilerinde son ürün çok sayıda daha ufak parçaların montajı ile elde edilmektedir. Düşük miktarda çarpılma olması durumunda dahi her bir tekil parçanın montajı için ek yük uygulanması ihtiyacı doğarak son üründe ciddi çarpılma ve kalıntı gerilme oluşabilmektedir. Böylelikle, küçük parçalar içerisindeki çarpılmalar domino etkisi yaratarak son ürünün hasara uğramasına yol açabilmektedir.

Çarpılmalar ve kalıntı gerilmeler, imalat proseslerinin çıktıları oldukları için tamamiyle kaçınılamaz. Fakat gerilme oluşumu prosesinin doğru bir şekilde yorumlanması ile proses planlama ve çeşitli metodlarla gerilme gevşemesi uygulanarak kalıntı gerilmenin azaltılması mümkün olmaktadır. Bir ürün içerisindeki

kalıntı gerilmeleri ve çarpılmaların makul şekilde kontrolü çeşitli aşamalardan oluşur. Bunlar oluşumlarının temel kaynaklarının anlaşılması, kalıntı gerilmeleri yaratan her bir proses ile ilgili kritik parametrelerin belirlenmesi, bu parametrelerin bir diğerine kıyasla önem derecesinin kavranması ve en önemli parametreler ile yapılan deneysel çalışmalar ile uygun bir kombinasyonun ortaya çıkarılmasıdır. Kalıntı gerilmeler kontrol edilemeyip izin verilen değerden yüksek çıkması durumunda ise başvurulacak yöntem gerilme gevşeme tekniklerinden birini kullanmak veya gerilme biçimini orjinal duruma göre daha çok tercih edilen bir şekle doğru yönlendirmektir.

Bir çok imalat prosesi ısı transferi, mekanik deformasyon ve metalurjik değişimlerin karmaşık kombinasyonlarından oluşur. Böylelikle, kalıntı gerilmelerin kökenine inmek bu üç boyutun ve aralarındaki karmaşık etkileşimin doğru bir şekilde anlaşılması ihtiyacını doğurur. Birkaç idealleştirilmiş durum dışında kalıntı gerilmelerin analitik çözümü mümkün olmamaktadır. Böylece, yaygın yaklaşımlar deneysel çalışmalar ve numerik modellemelerdir. Atölyelerde yapılan denemeler kalıntı gerilmeleri ve etkilerini anlamak için uygulanan geleneksel yaklaşım olmuştur. Yapılan birkaç deneme yeterli bilgi toplamada yetersiz kalırken ileri seviye deneysel çalışmalar maliyetli ve zaman alıcıdır. Bu yüzden pratik amaçlar için bu yaklaşım geniş kapsamlı ve nicel anlayıştan ziyade genel ve nitel anlayışın gelişmesinde yardımcı olmaktadır. Son yıllarda imalat proseslerinin numerik modellenmesi oldukça popüler hale gelmiştir. Özellikle iyi bilinen imalat proseslerinin modellenmesi konusunda girişimlerde bulunulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi en yaygın kullanılan teknik olmakla birlikte sonlu fark ve hacim kontrol metodları da özellikle sıvı akışkan içeren durumlarda kullanılmaktadır. Bilgisayar modellerinin en önemli avantajı maliyet açısındandır. İlk prototip yapmanın dahi öncesinde prosesler modelleme ile geniş detayda çalışılmaktadır. Arzu edilen çıktılar için proses parametrelerinin etkisi kontrol edilip ilk parça yapılmadan önce optimize edilebilmektedir. Modellemenin bir çok avantajı olmasına rağmen, tüm bilgisayar modelleri gerçek dünyanın yaklaşımlarıdır ve çıktıları malzeme özellikleri gibi girdi parametrelerin doğruluğuna ve yaklaşımın kalitesine bağlıdır. Bu açıdan kalıntı gerilme ve çarpılmaların incelenmesi için en makul yöntem modelleme ve deneysel çalışmaların birlikte kullanılmasıdır.

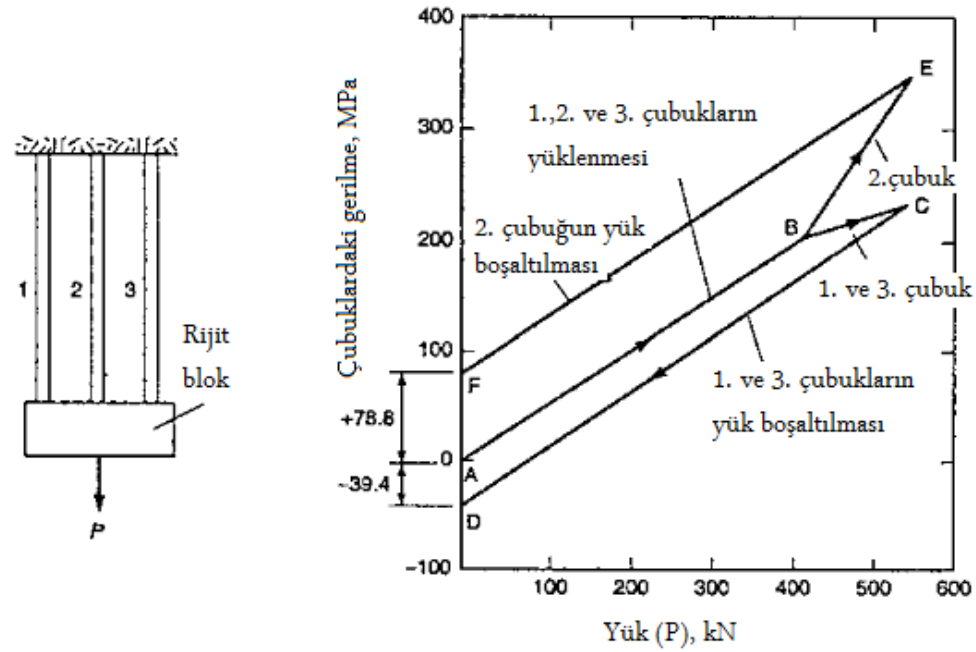
Günümüzde tüm ürünlerin değerinin 10-15%'i direk yada endirek olarak talaşlı imalata atfedilmektedir. Bu açıdan talaşlı imalat temel bir imalat prosesi haline gelmiştir. İşlenmiş bir parça içerisindeki kalıntı gerilme parçanın aşınma ve yorulma karakteristiğinin belirlenmesinde kritik bir öneme sahiptir. Gerilmenin yalnızca büyüklüğü değil aynı zamanda çekme yada basma yönünde olması da kritiktir. İşlenmiş bir yüzey, üzerinde meydana gelen çekme yönündeki kalıntı gerilme sebebiyle yorulma çatlağının çekirdeklenmesine yatkın olabilirken basma yönündeki kalıntı gerilme sebebiyle ise aksine dirençli olabilmektedir. Bu yüzden parçalar tasarlanırken ve imalat proses planları yapılırken kalıntı gerilmeler önemli etmenlerdir. Her bir operasyon bir önceki operasyonun neden olduğu kalıntı gerilmelere eklenti yapabilir yada azaltılmasına yardımcı olabilir.

4.1 Kalıntı Gerilme Oluşumunun Sebepleri

İmalat proseslerinde kalıntı gerilme, mekanik yük ve kısıtlamalar sebebiyle parçanın farklı bölgelerinde meydana gelen eşit olmayan yada düzensiz plastik deformasyon, termal yükler sebebiyle meydana gelen eşit olmayan yada düzensiz plastik deformasyon, katı hal faz dönüşümü esnasında meydana gelen hacimsel değişim ve plastisite dönüşümü ve termal genleşme katsayılarındaki uyumsuzluk gibi faktörlerin bazı yada tümünün bir araya gelmesinden kaynaklanmaktadır. Döküm, dövme ve talaşlı imalat gibi malzeme giderme yöntemlerinin iş parçası üzerinde kalıntı gerilmelerin büyüklük ve dağılımına etkisi vardır.

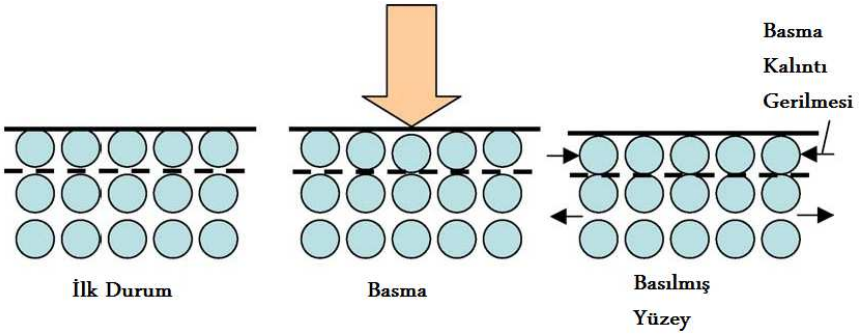
4.1.1 Mekanik yükler

Mekanik yüklerden kaynaklı kalıntı gerilme oluşumuna verilen bir örnek Şekil 4.2'de bulunmaktadır. Üç adet çubuktan oluşan bu düzenekte çubuk boyları 254 mm ve kesitleri 25.4 mm^2'dir. Merkezleri arasındaki mesafe 25.4 mm bırakılan çubuklardan en dıştaki iki çubuk elastiklik modülü 206.84 GPa ve akma dayanımı 206.84 MPa ve plastiklik modülü 41.37 GPa olan aynı malzemelerden yapılmıştır. Ortadaki çubuk ise 413.7 MPa olan daha yüksek akma dayanımına sahip ancak aynı elastiklik ve plastiklik modülüne sahip malzemeden yapılmıştır. Bütün çubuklar üst uçlarından sabitlenerek tüm serbestlik dereceleri kırılmıştır. Alt uçlarından ise ağırlığı olmayan ancak rijit bir bloğa bağlanmıştır. Ayrıca düzenek merkezine uygulanan bir P yükünü taşımaktadır [35].



Şekil 4.2 : Üçlü çubuk düzeneğinde mekanik yüklerden kaynaklı kalıntı gerilme oluşumu.

İlk yükleme durumunda P yükü sıfırdan 400.3 kN'a kadar kademeli bir şekilde artırılmaktadır ve tekrar sıfıra geri düşürülmektedir. Yük 400.3 kN değerinde iken her bir çubuk 133.45 kN yükü taşımakta ve hiçbirinde gerilme akma dayanımını geçmemektedir. Yük boşaltma sırasında ise her bir çubuktaki ilk durum olan sıfır gerilme durumuna geri dönülmekte ve kalıntı gerilme oluşmamaktadır. İkinci yükleme durumunda P yükü sıfırdan 533.8 kN'a kadar artırılmakta ve tekrar sıfıra indirilmektedir. Yük 400.3 kN'u geçtiği durumda en dıştaki iki çubuk plastik deformasyona uğramakta ve düşen modül sebebiyle daha az yükü taşımaktadırlar. En dıştaki iki çubuk üzerindeki gerilme ABCD yolunu izlerken ortadaki çubuk ABEF yolunu izlemektedir. Yük boşaltma esnasında P yükünün sıfıra inmesi halinde, çubuklardaki gerilmeler ilk durumdaki gibi sıfıra gitmemektedir. Aksine ortadaki çubuk 78.8 MPa çekme yönünde kalıntı gerilmeye ve en dıştaki çubuklar 39.4 MPa basma yönünde kalıntı gerilmeye sahip olmaktadır. Düzenek üzerinde herhangi bir dış yük etkimediği için üç çubuk içerisindeki kalıntı gerilmeler iç denge içerisindedir. Her iki yükleme durumu kıyaslandığında çubuklardaki eşit olmayan plastik deformasyonun mevcut bulunması kalıntı gerilme oluşumunun kaynağı olarak görülmektedir. Benzer şekilde bilyalı püskürtme kaynaklı oluşan yüzey deformasyonu gibi malzeme içerisindeki homojen olmayan plastik deformasyon dağılımı olması durumunda mekanik kalıntı gerilme meydana gelmektedir. Şekil 4.3'te bilyalı püskürtme sonucu oluşan kalıntı gerilme gösterilmektedir [36].



Şekil 4.3 : Mekanik deformasyonun kalıntı gerilme üzerindeki etkisi.

4.1.2 Termal yükler

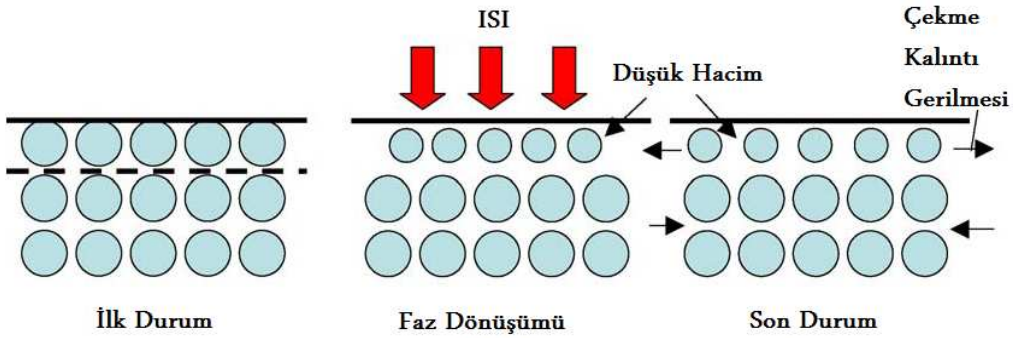
Termal yüklerden kaynaklı eşit olmayan plastik deformasyon sonucu oluşan kalıntı gerilemelerin oluşumu için üçlü çubuk modeline benzer şekilde bir açıklamayı Masubuchi tarafından yapılmıştır [37]. Bu modelde, eşit boy ve kesitte üç adet karbon çeliğinden yapılmış çubuk uçlarından iki adet rijit bloklara bağlanmıştır. Ortadaki çubuk 593ºC'ye ısıtılıp ardından oda sıcaklığına soğutulurken dıştaki çubuklar oda sıcaklığında muhafaza edilmektedir. Ortadaki çubuğun sıcaklığı arttığı durumda iç dengeyi sağlamak için orta çubukta basma yönünde kalıntı gerilme oluşurken dıştaki çubuklarda ortadaki çubukta oluşan gerilmenin yarısı değerinde çekme yönünde kalıntı gerilme oluşmaktadır. Sıcaklığın ortadaki çubukta akma dayanımını aşacak şekilde yüksek olması ancak dıştaki çubuklarda gerilmenin halen akma dayanımının altında kalması ve orta çubuğun sıcaklığının oda koşullarına döndürüldüğü durumda tüm çubuklarda kalıntı gerilmeler oluşmaktadır. Aynı şekilde tüm çubuklardaki gerilmelerin farklı miktarlarda akma dayanımını geçtiği durumda da kalıntı gerilme meydana gelmektedir. Bu durum bir silindirin dik olarak bir banyoya daldırıldığı suverme işleminde maruz kaldığı dış katmandaki sıcaklığın iç katmana göre daha düşük olduğu hale benzerdir.

4.1.3 Katı hal dönüşümü

Suverme, kaynak ve döküm proseslerinde soğuma esnasında bir çok metal bir yada daha çok kez katı hal dönüşümü geçirmektedir. Saklı ısının açığa çıkması, boyutlarda ve hacimde değişme ve dönüşüm plastisitesi etkisi bu dönüşümleri beraberinde getirmektedir. Tümü parça içerisindeki kalıntı gerilmelerin halini etkilemektedir. Katı hal dönüşümü esnasındaki saklı ısının açığa çıkması daha az miktarda gerçekleşen sıvıdan katıya dönüşümdeki ısının salınımına benzemektedir. Çoğu analizde bu saklı ısının salınımı ihmal edilmekte fakat hacimdeki değişim ciddi bir

etki yaratmaktadır. Boyutsal değişimin sebebi yeralan katı eriyik oluşturan alaşım elementlerinin sınırlı ve sıcaklığa bağlı çözünürlük göstererek katı halde atomik kafesin genleşme veya büzülmesine sebep olmalarıdır.

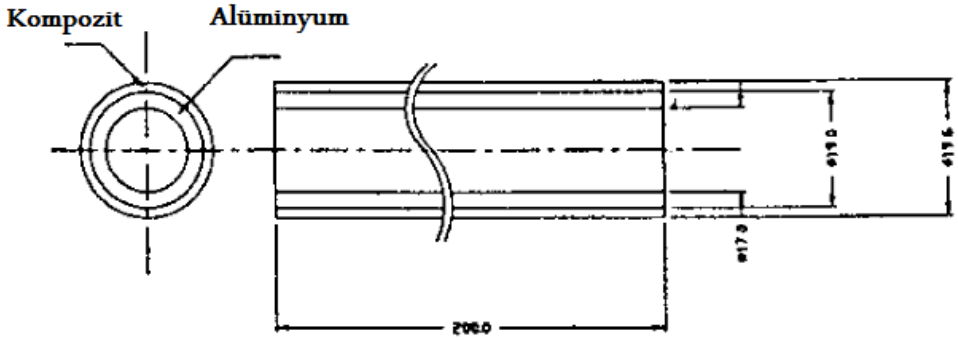
Termal yük kaynaklı kalıntı gerilmelerde malzemenin yüzey katmanları içerisinde hacimde değişim gerçekleşmektedir. Fakat yüzey katmanlarının hacmini azaltan etken eğer bir faz dönüşümü ise, yüzey katmanları büzülme eğilimindedir. Ancak parçanın geri kalanı bu büzülmeye karşı direnç göstermekte ve yüzeydeki katmanın çekmeye gitmesine yol açmaktadır. Bu etki Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4 : Termal faz dönüşümünün kalıntı gerilme üzerindeki etkisi.

4.1.4 Termal genleşme katsayısı uyumsuzluğu

Termal genleşme katsayılarının uyumsuzluğu sebebiyle termal gerilmeler oluşabilmektedir. Şekil 4.5'te alüminyum malzemeden yapılmış bir mil üzerinde kompozit malzemeden yapılmış bir dış kabuk bulunan kompozit bir mil gösterilmektedir. Kompozit mil 120ºC'de kürlendikten sonra ortam koşullarına döndürülmektedir. Kompozit şaft 120ºC'de kürlenmeye başladığı için alüminyum boru kürlenme sıcaklığı 120ºC'ye çıkana kadar kompozit kabuk tarafından herhangi bir sınırlanma olmadan genleşmektedir. Kompozit dış kabuğun içteki alüminyum boruya kürlenmesinden sonra ise oda sıcaklığına döndürülmektedir. Bu özel durumda kompozit şaftın termal genleşme katsayısı alüminyum şafta kıyasla ihmal edilebilir derecede küçük olduğu için alüminyum şaft üzerinde eksenel yönde çekme gerilmesi ve kompozit kabukta eksenel yönde basma gerilmesi oluşmaktadır. Bu durumda alüminyum üzerindeki kalıntı gerilme 58.96 MPa ve kompozit üzerindeki kalıntı gerilme -183.29 MPa olmaktadır [38].

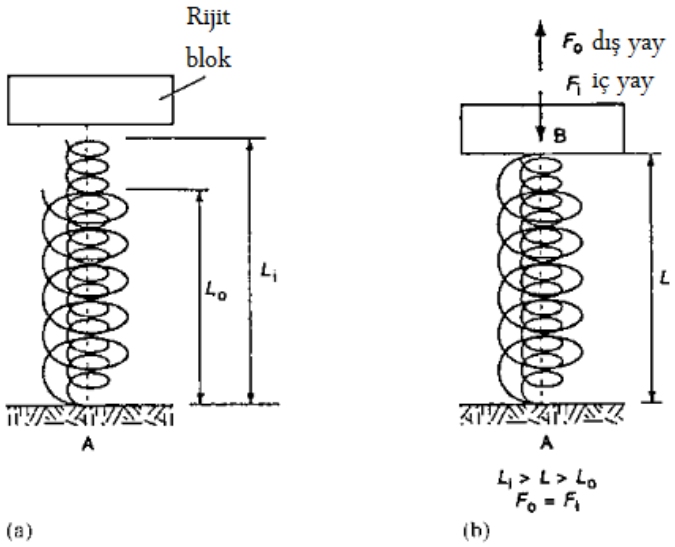


Şekil 4.5 : Birlikte kürlenen alüminyum ve kompozit şaft.

4.1.5 Malzeme giderme

Kalıntı gerilmeler üzerinde zaman zaman gözden kaçan bir etki de çeşitli imalat proseslerine bağlı oluşan malzeme gidermedir. Örneğin, döküm kalıbın bozulması, dövme kalıbının geri çekilmesi veya işlenmiş parça elde etmek için malzemenin giderilmesi gerekmektedir. Tüm bu operasyonlar parça içerisindeki gerilmenin durumunu değiştirmektedir.

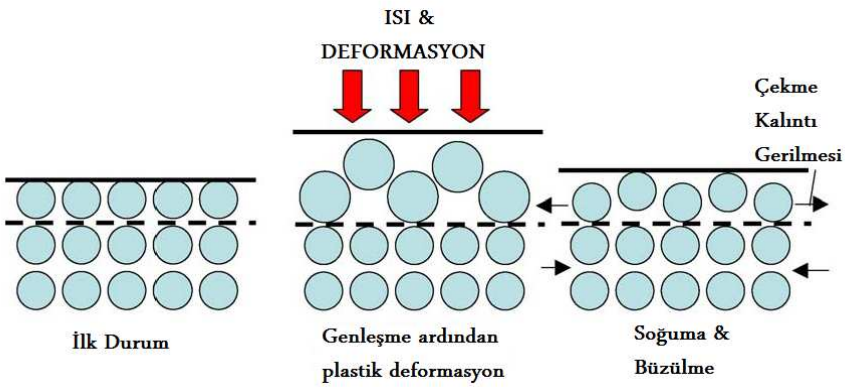
Farklı uzunluklarda içiçe iki adet yay bulunan bir düzenek Şekil 4.6'te gösterilmektedir. Her iki yayın alt uçları sabitlenmiştir. Üst uçları ise yalnızca dikey doğrultuda hareketine izin verilen rijit bir bloğa bağlanmıştır. Her iki yayın boyları serbest konumda farklı olduğundan rijit bloğa bağlandıkları konumda boyları ara bir değerde buluşmaktadır. Bu sebeple, yaylar üzerinde eşit ve ters yönde kuvvetler meydana gelmektedir. Bu kuvvetler uzun olan yayda basma ve kısa olan yayda çekme şeklindedir. İki yaydan oluşan bu düzenek döküm parça ve kalıbı, dövme parça ve kalıbı veya işlenmiş parçadan henüz bir kısım malzemenin kaldırılmadığı duruma benzemektedir. Dıştaki yayın düzenekten çıkarıldığı durum işleme sırasında malzeme kaldırıldığı, döküm kalıbın bozulduğu veya dövme kalıbın geri çekildiği durumla benzeştir. Burada iki durum düşünülebilir. İlk durumda her iki yaydaki gerilmeler elastik limitler içerisindedir. Dıştaki yay düzenekten çıkarıldığı durumda, ona etkiyen kuvvet içteki yaya transfer edilmekte ve iç dengeyi sağlamak için içteki yay orijinal uzunluğuna geri dönmektedir. İkinci durumda ise içteki yayın belirli bir miktar plastik deformasyona uğradığı düşünülmektedir. Dıştaki yay düzenekten çıkarıldığı durumda içteki yay orijinal uzunluğuna dönememektedir. Her iki durumda da kuvvetler eş merkezli olduğu için dıştaki yayın düzenekte çıkarıldığı durumda içteki yay üzerindeki kalıntı gerilmeler sıfır olmaktadır [34].



Şekil 4.6 : Farklı başlangıç uzunluklarında iki yaydan oluşan düzenekte kalıntı gerilmeler (a, b).

Buradan çıkarılan sonuç malzeme gidermenin gerilme dağılımına göre simetrik olduğu durumda parçanın geri kalan kısmındaki kalıntı gerilme çok küçük hatta sıfır olmaktadır. Malzeme gidermenin gerilme dağılımına göre simetrik olmadığı durumda ise parçanın geri kalan kısmındaki kalıntı gerilme küçük olmamakta ve malzeme giderme parçanın bazı bölgelerindeki gerilmelerin artmasına sebep olabilmektedir.

Talaşlı imalat kaynaklı kalıntı gerilmeler termal ve plastik deformasyonların birleşik etkisine bağlı oluşmaktadır. İşleme operasyonu parçanın yüzeyini ısıtmakta ve genleşmesine yol açmaktadır. Bu genleşme plastik akma ile rahatlamakta fakat bu etki yüzey katmanı ile sınırlı kalmaktadır. Isının kalktığı durumda yüzey tabakası büzülmekte ve yüzeyde çekme yönünde kalıntı gerilme oluşmasına yol açmaktadır. Şekil 4.7'te bu etki gösterilmektedir.



Şekil 4.7 : Termal ve plastik deformasyon bileşiminin kalıntı gerilme üzerindeki etkisi.

5. KALINTI GERİLME ÖLÇÜMÜ

5.1 Kalıntı Gerilme Ölçümünün Gerekliliği

Kalıntı gerilmelerin ölçüm gerekliliği temelinde bir takım olayların doğru bir şekilde anlaşılması ve yorumlanması ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Bunlar yorulma, gerilmeli korozyon veya korozyon yorulması kaynaklı olduğundan kuşkulanılan hasarlar, ömür değerlendirmesi gibi bir parçanın sürekli olarak servis edilebilirliğinin değerlendirilmesi, özellikle yorulma testlerinde tutarsız test sonuçları, parçanın işlemesi sırasında meydana gelen çarpılmalar ve parçaların saklanması süresince veya serviste meydana gelen çarpılmalardır.

Hasarın mevzu bahis olduğu durumlarda yüzey gerilmeleri genellikle büyük ilgi çekmektedir ve uzamsal çözünürlüğün en ideal şekilde sağlandığı yüzey ölçüm prosedürleri ve tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sayede hasar şartlarını tayin etmeye eğimli en yüksek çekme kalıntı gerilmesinin yeri ve büyüklüğü belirlenebilir. Çarpılmanın mevzu bahis olduğu durumlarda ise parçanın kesidi boyunca gerilme alanı sınırı, maksimum çekme kalıntı gerilmesinin yeri ve büyüklüğünden daha çok ilişkilidir. Bu gibi durumlarda kesit boyunca gerilmeler ölçümün uzamsal çözünürlüğünden daha önemlidir.

5.2 Kalıntı Gerilme Ölçüm Metodları

Metal parçalarda genellikle bir imalat prosesi sonucu oluşan kalıntı gerilmelerin belirlenmesi için birtakım prosedürler ve metodlar uygulanmaktadır. Ancak gerilme metale uygulanan bir nicelik olup sadece uygulamasının prosesi içinde ölçülebilmektedir. Kalıntı gerilmenin belirlenebilmesi için her durumda ölçülen parametre elastik uzama miktarıdır. Bu da metal içerisinde direk olarak mevcut olan kalıntı gerilmeden kaynaklı elastik uzamayı fiziksel bir metod yardımıyla veya mevcut olan kalıntı gerilmenin bir bölümünün veya tamamının rahatlamasından kaynaklı elastik uzama değişiminin mekanik bir metod yardımıyla elde edilmesiyle

gerçekleşir. Ardından uzamaya neden olan gerilme metal için uygulanabilir elastik sabitlerle hesaplanmaktadır.

Genellikle imalat esnasında ürün içerisindeki kalıntı gerilmeleri ölçmek mümkün olmamakta ve tersine imalat prosesi bittikten sonra ölçüm alınmaktadır. Ölçüm metodları ayrıca iki ana kategoride de toplanabilmektedir : mekanik ve fiziksel [39]. Mekanik kategori tabaka kaldırma, kesme, delik delme ve çevresel kesme gibi gerilme rahatlatma metodlarını içerirken, fiziksel kategori x-ışın kırınımı, nötron kırınımı, akustik ve magnetik gibi metodları içerir. Çizelge 5.1'de farklı kalıntı gerilme ölçüm tekniklerinin kıyaslaması verilmektedir.

Çizelge 5.1 : Kalıntı gerilme ölçüm tekniklerinin kıyaslanması [40].

Metod	**Delik Delme**	**Çökme**	**Kesit Alma**	**X-Işını**	**Nötron Kırınımı**	**Ultrasonik**	**Magnetik**
Analiz edilen gerilme tipi	I	I	I	I & II veya III	I & II	I & II & III	I & II & III
Minimum analiz alanı	0.5 mm^2	1000 mm^2	100 mm^2	0.5 mm^2	4 mm^2	0.1-30 mm^2	1-100 mm^2
Minimum derinlik analizi	20 µm	20 µm	1-2 mm	2-30 µm	1 mm	15-300 µm	100 µm
İlk nokta için ölçüm süresi	40 dk	30 dk	40 dk	20 dk	2 sa	2-4 dk	Anında
Gerilme alanı için ölçüm süresi	2 sa	8 sa	5-200 sa	8 sa	1 hafta	20 dk	10 dk
Ekipman maliyeti ($)	10-50 K	1 K	15 K	100-200 K	Birkaç 100 M	40-200 K	10-60 K
Çok fazlı malzeme analizi	Tüm fazlar	Tüm fazlar	Her bir faz	Her bir faz	Tüm fazlar	Tüm fazlar	Tüm fazlar
İri tane boyutu problemi	Hayır	Hayır	Hayır	Evet	Hayır	Evet	Evet
Alüminyum alaşımları	Evet	Evet	Evet	Tane sınırı problemi	Evet	Evet	Hayır
Kompozit	Evet	Hayır	Hayır	Sadece kristal matris	Sadece kristal matris	Zor	Ferromagnetik matris
Kaynaklı yapı	Evet	Hayır	Evet	Evet	Evet	Evet	Evet
İşlenmiş parçalar	Evet	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Evet	Evet
Yüzey sertleştirilmiş parçalar	Evet	Evet	Zor	Evet	Evet	Evet	Evet
Isıl işlem uygulanmış parçalar	İnce parçalar için zor	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Yüzey gerilmesi için zor	Evet

Kalıntı gerilmeleri ölçmek için bir çok metod bulunmaktadır. Bu metodlar hasarsız, hasarlı ve yarı hasarlı metodlar olarak gruplandırılabilmektedir. Hasarsız yöntemler kalıntı gerilmeye karşılık gelen metaldeki uzamayı direk veya endirek olarak

ölçerken hasarlı ve yarı hasarlı yöntemler metal içerisindeki kalıntı gerilmenin bir kısmı veya tamamının rahatlamasından kaynaklı uzama değişimini ölçmektedir.

Alüminyum alaşımları içerisindeki kalıntı gerilme ölçümü diğer çoğu alaşımlara kıyasla alüminyumun düşük elastiklik modülü sebebiyle daha iyi kesinlik ve doğrulukla sonuç vermektedir. Alüminyumun daha düşük elastiklik modülü verilen bir gerilme değeri için daha büyük elastik uzamaya neden olmaktadır. Başka bir deyişle, verilen bir gerilme değeri için alüminyum atomları çelik yada süper alaşımlar içerisindeki atomlara kıyasla üç kat daha fazla çarpılırlar. Sonuç olarak alüminyum alaşımları içerisindeki kalıntı gerilmeler 7 MPa mertebesinde bir kesinlikle ölçülebilirken bu değer çelikler için genellikle 25 MPa mertebesindedir [41].

5.2.1 Hasarlı ölçüm prosedürleri (Gerilme rahatlatma teknikleri)

Hasarlı kalıntı gerilme ölçüm metodlarından birini seçmeden önce verilmesi gereken en önemli karar kalıntı gerilmeleri belirlemek için gerçekten bir yada daha fazla parçaya zarar vermenin gerekli olup olmadığıdır. Genellikle zarar verilecek parça sayısı bir yada daha fazla olup toplam üretimin ufak bir kısmını oluşturmaktadır. Ancak bu durumda da bir diğer önemli konu kalıntı gerilme ölçümü yapılacak numunelerin diğer tüm parçaları temsil edip etmediğidir. Diğer bir deyişle, parçadan parçaya kalıntı gerilme alanında beklenen sapma miktarının büyüklüğü önemlidir. Herhangi bir durumda kalıntı gerilmeler genellikle bir yönde üniform değildir ve yüksek gerilme değişimi göstermektedirler.

Hasarlı kalıntı gerilme ölçüm metodları temel olarak gerilme rahatlatmaya dayalı tekniklerdir. Bilgi parçanın bir kısım sonlu hacim elemanında kalıntı gerilmenin rahatlatılarak ve bunun sonucunda ortaya çıkan uzama değişimi ölçülerek elde edilmektedir. Sonrasında uzama değişimi kullanılarak gerilme alanının doğası hakkında uygun kabullerle orjinal gerilme alanı tekrar inşa edilmektedir. Gerilme alanının doğası hakkındaki kabuller gerilme alanındaki büyüklük ve değişimdir. Değişimlerin tek, iki yada üç boyutlu olduğunun kabulünü de kapsar.

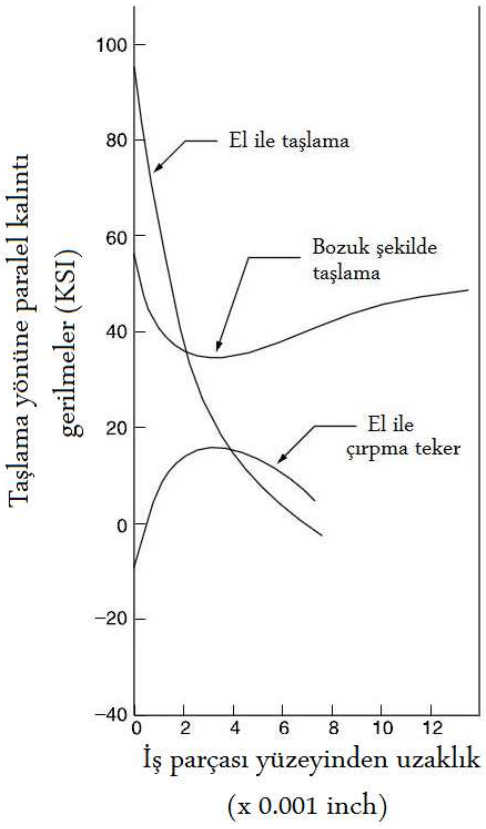
Elektrik dirençli uzama ölçer teknolojileri, hasarlı ve yarı hasarlı kalıntı gerilme ölçümleri için diğer metodlara kıyasla ekonomik, prosedürel ve hassasiyet avantajları sebebiyle en yaygın metod olarak görülmektedir. Modern x-ışın kırınım yöntemi de

bu avantajlara sahip olup kesit alma öncesi ve sonrası mevcut bulunan gerilmeleri ölçmekte kullanılabilmektedir.

5.2.1.1 Kesit alma ve malzeme giderme metodları

Bir çok kalıntı gerilme ölçüm prosedürü parçanın yada numunenin kesidinin alınmasına ve/veya bir miktar malzemenin kaldırılmasına ihtiyaç duymaktadır. Bu özellikle iç kalıntı gerilmelerin ölçülmesi durumunda iç gerilme alanlarını rahatlatmak için parçanın kesit alınmasının zorunlu olduğu durumlar için geçerlidir. Kesit alma ve malzeme gidermeye ihtiyaç duyulmayılan iki istisna metod nötron kırınım ve ultrasonik metodlardır.

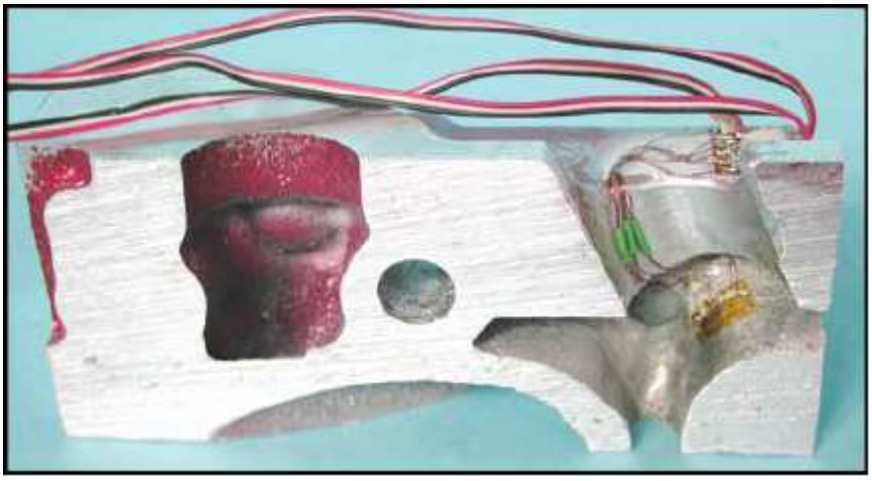
Mekanik talaş kaldırma prosesleri genellikle ekonomik ve hızlı oldukları için uygulanmaktadır. Torna, delme, frezeleme, testere ile kesme, taşlama vb. tüm talaş kaldırma prosesleri yüzey kalıntı gerilmeleri oluşturmaktadır. Bunlar pekleşmiş metalin akma dayanımı kadar yüksek değerlerde ve onlarca mikron derinlikte olabilmektedir [42]. Şekil 5.1'de yüzey merkezli kübik kristal yapıda (304 östenitik paslanmaz çelik) farklı taşlama metodları ile oluşan kalıntı gerilme grafikleri verilmektedir [33].



Şekil 5.1 : Farklı taşlama metodları ile oluşan kalıntı gerilmeler.

Eğer uzama ölçülen eleman boyutu yüzey derinlik değişimi durumunda küçük veya ince ise, mekanik talaş kaldırma kaynaklı oluşan bu yüzey kalıntı gerilmelerini ortadan kaldırmak için iki üç milimetrelik bir yüzey kimyasal veya elektrokimyasal malzeme kaldırma teknikleri ile giderilmelidir. Elektro erozyonla işleme (EDM) tekniği de diğer malzeme giderme teknikleri gibi kalıntı gerilmeye sebep olmaktadır [43]. Lazer, alev veya plazma kesim metodları ise metali ısıtma etkileri yüzünden dikkatle uygulanmalıdır çünkü ölçüm alınmadan önce tavlama etkisi yaratarak gerilme alanının azalmasına yol açabilmektedirler. Parça yüzeyinden malzeme gidermek için kullanılan metodlardan kalıntı gerilme yaratmayanları elektrolitik ve kimyasal parlatmadır.

Kesit alma ile parçaların daha uygun ufak boyutlara düşürülmesi durumunda gerilmelerin değişme durumu olabilmektedir. Bu sebeple plaka şeklindeki parçalar uç etkilerden kaçınmak için boy ve en olarak en aşağı kalınlığının üç katı olacak şekilde kesilmelidir. İnce duvarlı ve katı silindirler ise boy olarak çapın minimum üç katı olacak şekilde kesilmelidir. Şekil 5.2'de silindir kafası üzerinde kalıntı gerilme ölçmek için uygulanan uzama ölçer ve ardından gerilme rahatlamasını sağlamak için kesilen parçanın bir resmi gösterilmektedir.



Şekil 5.2 : Silindir kafası üzerine yerleştirilmiş uzama ölçer ve kesit alma yönteminin uygulanışı [44].

5.2.1.2 Kimyasal metodlar

Metallerde gerilmeli korozyon kaynaklı çatlaklara sebep olabilen kalıntı gerilmeleri tespit etmek için bir takım nitelikli metodlar uygulanmaktadır. Gerilmeli korozyon çatlağına yatkınlığı test etmek için bir takım standart uygulamalar ASTM tarafından

yayınlanmıştır [45]. Ancak bu testler kalıntı gerilmelerin ortaya çıkarılmasından çok metalin bilinen gerilmeler altında belirli korozif ortamlarda çatlağa yatkınlığının değerlendirilmesi için yapılmaktadır.

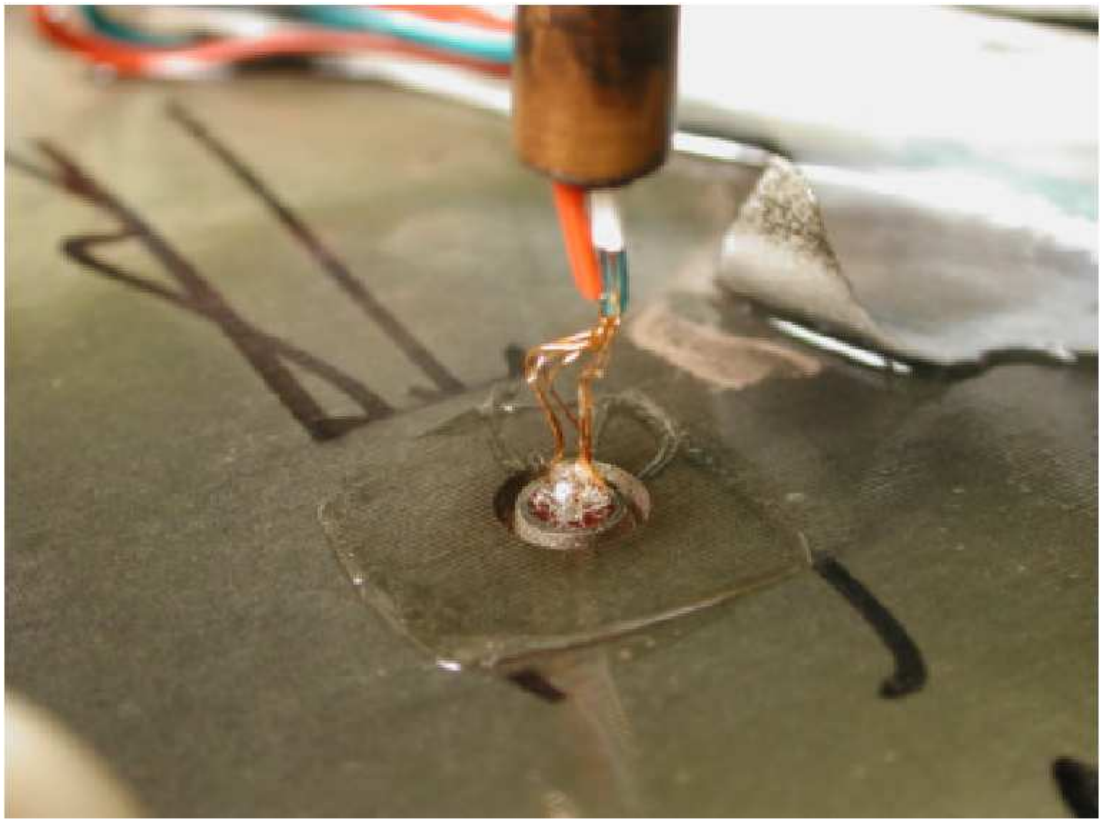
5.2.2 Yarı hasarlı ölçüm prosedürleri

Hasarsız kalıntı gerilme ölçüm metodları gerilmelerin ölçüldüğü parçalarda servis edilebilirliği veya mekanik dayanımı vb özellikleri etkilemeyen şekildedir. Hasarsız ve hasarlı metodlar arasında kalan yarı hasarlı kalıntı gerilme ölçüm metodları ise parçalar üzerinde ihmal edilebilir derecede az etki yaratan ve ölçüm ardından parçanın tamir edilebildiği yöntemlerdir.

Yarı hasarlı metodlar küçük çapta deliklerin delindiği veya halkaların çevresel olarak kesildiği yada yüzeyde izlerin bırakılmasına ihtiyaç duyulduğu yöntemlerdir. Bu metodlardan ilk ikisi nicel veri sağlarken üçüncü metod yalnızca nitel veri sağlamaktadır.

5.2.2.1 Kör delik delme ve halka çıkarma metodu

Delik delme metodu yaklaşık 70 yıl önce test numunesi üzerinde derin olmayan bir delik delerek gerilmenin rahatlatılması ve oluşan yüzey uzamasının değişiminin ölçüldüğü bir metod olarak bulunmuştur [46]. Temel olarak uzaklaştırılan gerilmeli malzeme, çevresindeki malzemenin gerilme durumunu tekrardan dengeye gelecek şekilde düzenlemesidir. Bu metod ASTM E837 ile standartlaştırılmıştır [47]. Halka çıkarma metodu da benzer şekilde gerilme alanının bozularak elde edilen uzamaya dayanmakta fakat bir uzama ölçer etrafında sığ bir halka oluşturarak nispeten izole bir gerilmesiz ada meydana getirmektedir. Bu iki metod en az hasar veren mekanik gerilme rahatlatma yöntemleridir ve diğer yöntemlere kıyasla basit ve ekonomiktirler. Tüm gerilme rahatlatma teknikleri malzeme uzaklaştırmadan kaynaklı uzama değişiminin ölçülmesi için elektrik rezistanslı uzama ölçerlere dayanmaktadır. Özellikle delik delme için rozet tipinde uzama ölçerler mevcuttur. Son yıllarda rozetlerin boyutları giderek düşmekte ve 10 mm’den daha küçük boyutlarda rozetler mevcuttur. Şekil 5.3’te halka çıkarma test lokasyonu uzama ölçer, kurşun kablolar ve EDM elektrodu gösterilmektedir.



Şekil 5.3 : Halka çıkarma metodu.

Delik delme ve halka çıkarma yöntemlerinin çoğu uygulaması düz plaka şeklinde veya silindirik parçalar üzerinde olmaktadır. Gerilmeler malzeme yüzeyinin çeşitli derinliklerine (delik veya halka çapına eşit oluncaya) kadar belirlenebilmektedir. Fakat Kelsey yaptığı çalışmalarda delik çapının yarısından büyük derinliklerde gerilmelerin doğru bir şekilde ölçülemediğini gözlemlemiştir [48].

Ölçümü gerçekleştirmek için gerekli ekipman düşük maliyetli, portatif ve imalat atölye şartlarında kullanılabilecek şekildedir. Ancak ölçümleri alan kişilerin tecrübeli kimseler olması gerekmektedir. Ölçümün alınacağı yerden yüzeyin hazırlanmasına, uzama ölçerlerin yapıştırılmasına ve verilerin okunup yorumlanmasına kadar tüm aşamalar bu tecrübeli operatörler tarafından gerçekleştirilmelidir. Delik delme veya halka çıkarma yöntemlerinden kaynaklı oluşabilecek olası kalıntı gerilmeler için şayet bu delikler aşındırıcı jet gibi özel uygulamalar ile işlenmiyorsa uygulama öncesi kalibrasyon tavsiye edilmektedir [49].

Delik delme ve halka çıkarma yöntemlerinin genel olarak limitleri vardır. Bunlar, delik veya halka çapı boyunca gerilme değişiminin sabit olması gerekliliği ve bu sebeple yüksek gerilme gradyeninin olduğu yerlerden kaçınılması gereksinimi, malzeme uzaklaştırma esnasındaki lokal plastik akma sebebiyle malzemenin akma

dayanımının üçte birinden büyük gerilmelerin olduğu alanlarda hatalı sonuçlar doğurabilmesi, parça yada numune kalınlığının delik veya halka çapının en az dört katı olması gereksinimi, delik civarındaki metalin malzeme uzaklaştırma esnasında pekleşmesi ile ciddi hatalara sebep olabilmesi, malzeme uzaklaştırma esnasında oluşabilecek ısı, delik yada halkaların birbirleri arasındaki mesafenin çaplarının en az sekiz katı olması gereksinimi, gerilme ölçülecek alanın nispeten hacimli hizalama aparatına erişilebilir olması ve uzama ölçerin tutunması için yüzey hazırlamanın bir sonraki ölçüme dikkate değer bir hata payı oluşturacak şekilde kalıntı gerilmelere sebep olmasıdır [50].

Sonuç olarak, delik delme ve halka çıkarma metodları hasarlı yöntemlere kıyasla daha basit ekipmanlar ve enstrümantasyonlar ile neredeyse hasarsız olan gerilme rahatlatma teknikleridir. Bu metodlar halen genel uygulamaya imkan verecek şekilde araştırma ve geliştirmeye ihtiyaç duyan birçok hasarsız metoda kıyasla yeterince gelişmiş ve teknolojik ilerlemelerin fazla olduğu mekanik gerilme rahatlatma tekniklerindendir.

5.2.2.2 İz bırakma metodu

Uzun yıllardır araştırmacılar sertlik ölçümlerinde kullanılan uçlara benzer şekilde yüzey kalıntı gerilmelerini ölçmek ve tespit etmek için kullanmayı önermişlerdir. 1932 yılında Kokubo haddelenmiş karbon çeliği sacların eğilme yükü altında uygulanan gerilmelerin Vickers sertliğini değiştirdiğini görmüştür [51]. Ayrıca çekme gerilmelerinin sertliği azaltma eğiliminde ve basma gerilmelerinin sertliği artırma eğiliminde olduğunu göstermiştir.

Yirmi yıl kadar sonra Sines ve Carlson çeşitli dış yükler altında zorlanan bir parçada sertlik ölçümleri alınırken kalıntı gerilme ölçümlerinin de yapılacağı bir metod önermişlerdir [52]. Yükler hem çekme hem basma gerilmeleri oluşturacak şekilde ayarlanarak sertlik ölçümünde uygulanan gerilmelerin etkileri kıyaslanarak kalıntı gerilmenin çekme yada basma yönünde olduğu ortaya çıkarılmaktadır. Yine aynı yıllarda Pomey ve diğerleri kalıntı gerilmelerin küre şeklinde bir iz bırakıcı ile ölçülebildiğini ve uygulanan artan yük ile parça arayüzeyindeki elektrik direnci arasında bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir [33]. Elektrik direncindeki düşüş malzemenin kürenin altında kalan kısmında plastik akma gerçekleştiği ve küre üzerindeki ilgili yükün mevcut kalıntı gerilmeyle ilişkili olabileceğini göstermiştir.

İz bırakma metodları genel uygulamalar için x-ışını kırınımı veya delik delme metodları kadar güven verici dereceye ulaşmadıkları için nadiren uygulanmaktadır.

5.2.3 Hasarsız ölçüm prosedürleri

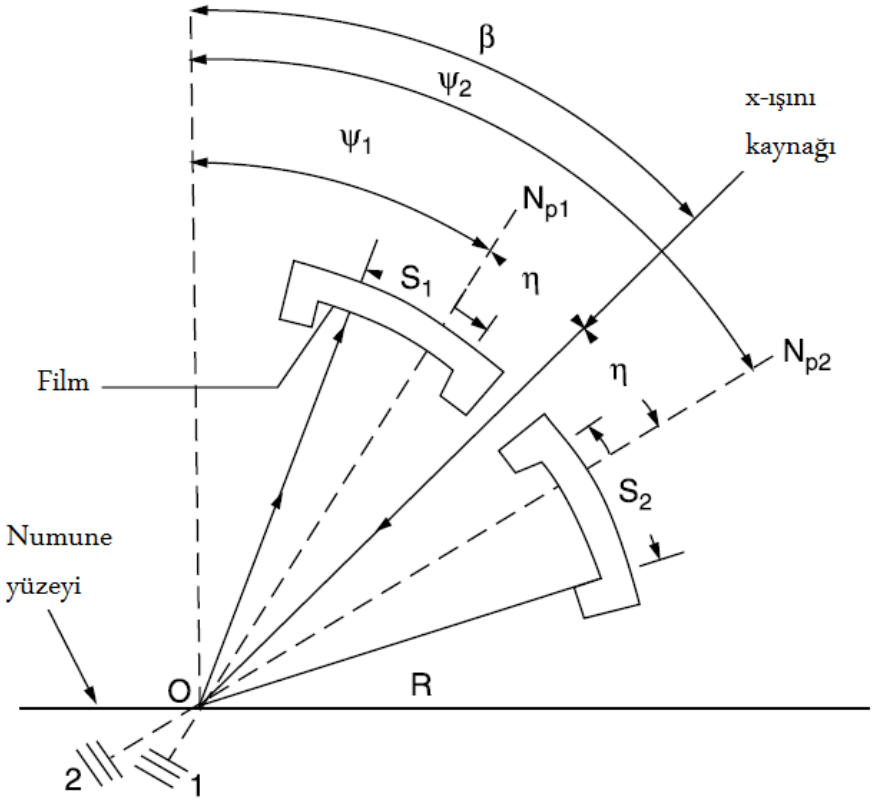
Buraya kadar bahsedilen uzama ölçüm metodlarında uzama değişimi parçadan gerilme taşıyan sonlu bir hacmin uzaklaştırılması ile ölçülmektedir. Böylece malzeme uzaklaştırılarak elde edilen uzamayı kalıntı gerilme alanını rahatsız ederek ölçülmektedir. Hasarsız ölçüm prosedürleri ise metalin kristal kafesi içerisindeki bir boyutu yada kristal kafes boyutundan etkilenen bir fiziksel parametreyi ölçmektedir. Bu yüzden bu metodlara fiziksel metodlar da denilmektedir. Akma dayanımını geçmeyen bir gerilmeye sebep olan mekanik yük katı bir metal üzerine uygulandığında parça elastik olarak çarpılmaktadır. Bu elastik uzama atomik kafes boyutlarında değişikliğe sebep olmakta ve bu boyuttaki değişim hasarsız kalıntı gerilme ölçüm teknikleri ile ölçülmektedir. X-ışını ve nötron kırınımı metodları mevcut kristal boyutunu ölçerek bu boyutu kalıntı yada uygulanan gerilmenin büyüklük ve yönü ile ilişkilendirir. X-ışını kırınımı, nötron kırınımı, ultrasonik hız ve manyetik Barkhausen gürültü metodları hasarsız kalıntı gerilme ölçüm tekniklerdir.

5.2.3.1 X-ışını kırınımı

Metal bir gerilme altında iken ister uygulanan isterse kalıntı gerilme sebebiyle olsun oluşan elastik uzama metalik kristal yapı içerisinde atomik düzlemler arasındaki boşlukların değişmesine neden olmaktadır. X-ışını kırınımı düzlemler arası atomik boşluğu direk olarak ölçebilmekte ve buradan metal üzerindeki tüm gerilme elde edilebilmektedir.

Metaller atomların düzenli bir üç boyutlu dizilişi ile oluşturdukları kristalden meydana gelmektedir. Çok kristalli bir metal gerilme altında tekil tanelerin kristal kafesi içerisinde elastik uzamalar oluşturmaktadır. Diğer bir deyişle, uygulanan bir dış yük yada malzeme içerisindeki kalıntı gerilme akma dayanımının altında iken atomlar arası uzama meydana getirmektedir. X-ışını kırınımı teknikleri elastik uzamanın göstergesi olan atomlar arası boşluğu ölçebilmektedir. Çoğu metal ve alaşım için gerilmenin uzamaya orantılı olduğu kabulü ile malzemenin elastik katsayıları kullanılarak kristaller içerisindeki elastik uzamadan gerilme değerleri elde edilebilir.

X-ışını kırınım metoduna dayalı üç temel gerilme ölçüm tekniği bulunmaktadır. Bunlar çift ışıklı veya iki açılı teknik (DET), tek ışıklı veya tek açılı teknik (SET) ve çok açılı tekniktir. Işık açısı, gelen x-ışını ile numune yüzeyi normali arasındaki açıdır. X-ışını geri yansıma aralığında doruğa ulaştığı 90º yakınlarındaki Bragg (θ) açılarında uygulanan gerilmeye yada malzeme içerisindeki kalıntı gerilmeye karşı en büyük etkiyi göstermektedir ve bu yüzden tercih edilmektedir. Şekil 5.4'te numune normali N_s, gelen ışının N_s ile yaptığı β açısı, 1 ve 2. kırınım düzlemlerinin normalleri N_{p1} ve N_{p2}, bu düzlemlerin N_s ile yaptığı ψ_1 ve ψ_2 açıları, gelen ışın ile kırınım düzlem normallerinin yaptığı η açısı, R kamera yarıçapı, gelen ışından mesafesi bilinen referans bir noktadan uzaklığı gösteren ölçüm parametreleri S_1 ve S_2 verilmektedir. S_1 ve S_2, direk olarak Bragg açıları olan θ_1 ve θ_2'ye bağlıdır.



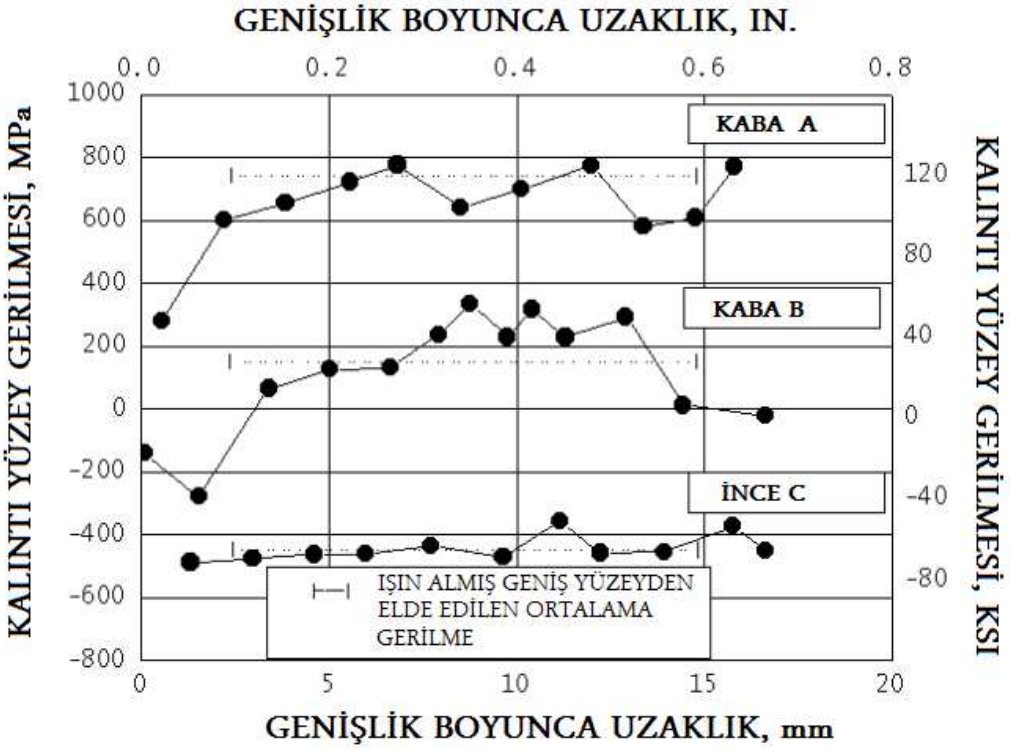
Şekil 5.4 : Tek ışıklı veya tek açılı teknik (SET).

Ölçülen gerilme numune yüzeyine paralel ve x-ışını kaynak vektörü ve numune yüzey normalini içeren (N_s) düzlem içerisindedir. Kalıntı gerilme ölçümü için atomlar arası düzlemlerin yüzey normaline göre en az iki farklı ψ açılarında kırılan açı θ'nın ölçülmesi gerekmektedir. Bu düzlemler kristalografik olarak eşit ve metalin gerilmesiz durumunda eşit atomlar arası uzaklığa sahiptir. Metal üzerinde gerilme olan durumda ise kırınım düzlemlerinin yüzeye farklı açılarda olacak şekilde iki yada

daha fazla oryantasyonu seçilir ve böylece yüzey normaline farklı ψ açılarında normalleri bulunur. Gerilme vektörü ile bu düzlemlerin arasındaki açıya bağlı olarak, düzlemler arası atomik boşluk değişken değerlerde azalmakta yada artmaktadır.

X-ışını ile alınan gerilme ölçümlerinde en yaygın hata ve uygulama yanlışlarının kaynakları gerilme sabiti seçimi, odaklayan geometri, kırılan zirve lokasyonu,soğuk işlem kristalografisi, doku, tane boyutu, mikro yapı ve yüzey şartlarıdır.

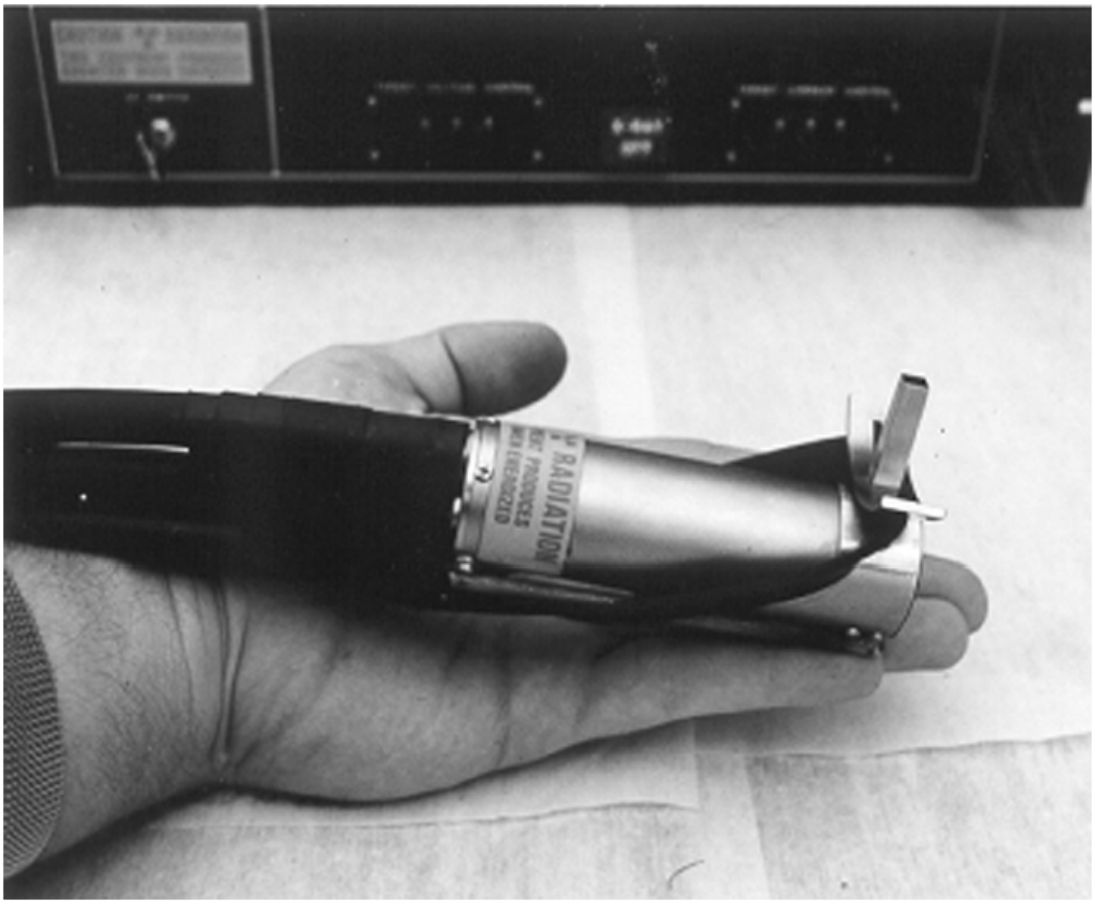
X-ışınlarının hata kaynaklarına ve okuma derinliğinin 0.025 mm ile sınırlı olmasına karşın, temassız x-ışını kırınım metodu genel olarak uygulanabilir ve tamamıyle hasarsız bir kalıntı gerilme ölçüm tekniğidir. Bu yöntemin güvenilirliği kanıtlanmış ve Bolstad'la Boeing'te x-ışını film kameralarının kullanılması ile başlamış ve son kırk yıldır binlerce araştırmacı tarafından dökümante edilmiştir [53]. SAE 4340 çeliğinde taşlama sonucu oluşan yüzey kalıntı gerilmelerinin x-ışını kırınımı yöntemi ile bulunması Şekil 5.5'te gösterilmektedir.



Şekil 5.5 : SAE 4340 çeliğinde taşlama sonucu oluşan yüzey kalıntı gerilmelerinin x-ışını kırınımı yöntemi ile bulunması [54].

X-ışını kırınımı yöntemi daha çok bilinen ve geleneksel tarama ekipmanının laboratuar şartları ile büyük ölçüde sınırlı olması, ölçümler için gerekli süre ve ekipman maliyetleri sebebiyle sahada kullanım için çok uygun olmamaktadır. Son yıllarda özellikle portatif, küçük ve hızlı çalışan ekipmanlarda gelişme

gözlemlenmektedir. Şekil 5.6'te 100 mm çapında yerinde kalıntı gerilme ölçümü alınabilen x-ışını kırınım ekipmanı gösterilmektedir.



Şekil 5.6 : Portatif x-ışını kırınım ekipmanı [55].

5.2.3.2 Nötron kırınımı

Nötron kırınım metodu kalıntı gerilmelerden kaynaklı elastik uzamaları kalın alüminyum parçalarının hacmi boyunca 1 mm^3 kadar düşük uzamsal çözünürlükle ölçme kapasitesine sahiptir. Bu sayede parçanın içerisindeki kalıntı gerilmelerin ölçümü herhangi bir kesit alma yada tabaka kaldırma metodlarına ihtiyaç duymadan yapılabilmektedir. Tıpki x-ışını metodu gibi nötron kırınım metodu da uygulanan gerilme yada malzeme içerisindeki kalıntı gerilme kaynaklı etkilenen kristalografik düzlemler arasındaki mesafeyi ölçmektedir.

Seçilen kristalografik düzlemler arasındaki mesafe (ϕ), gelen ve kırılan nötron ışınım açılarına (θ) bağlıdır. Bu açılar eşittir ve tek renkli ışınımın dalga boyu Bragg kuralına göre:

$$\lambda = 2dsin\theta \qquad \textbf{(5.1)}$$

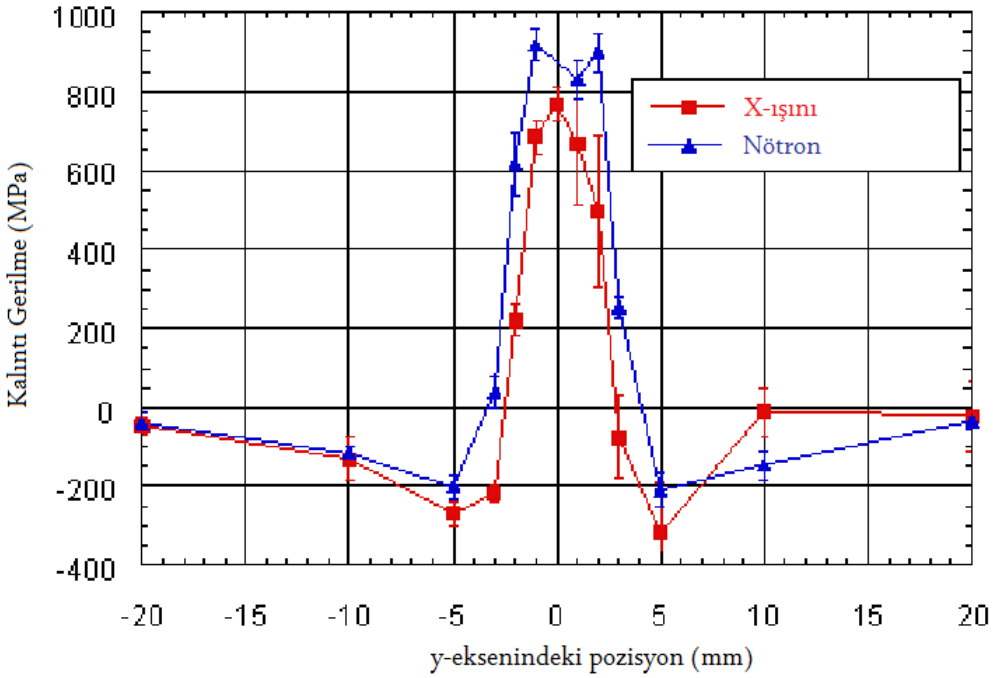
Kalıntı gerilme kaynaklı kırılan kristalografik düzleme göre dik elastik uzama (ε) bu durumda, d_o gerilmesi kristalografik düzlemler arasındaki mesafe iken:

$$\varepsilon = \frac{d-d_o}{d_o} = \frac{sin\theta_o}{sin\theta - sin\theta_o} \quad \textbf{(5.2)}$$

Parça içerisindeki asal gerilmelerin yönü bilindiği durumda, herhangi bir asal doğrultudaki gerilme şu şekilde hesaplanabilir:

$$\sigma_A = \frac{E}{(1+v)}\left[\varepsilon_A + \frac{v}{(1-2v)}(\varepsilon_A + \varepsilon_B + \varepsilon_C\right] \quad \textbf{(5.3)}$$

Bu denklemde yer alan gerilmeler asal gerilmeler, uzamalar ilgili asal gerilme doğrultularında ölçülen uzamalar, *E* elastiklik modülü ve *v* Poission oranıdır. Şekil 5.7'te kaynaklı plakalardaki kalıntı gerilmelerinin Nötron ışın kırınımı ve X-ışın kırınımı metodları ile sonuçlarının karşılaştırılması verilmektedir [56].



Şekil 5.7 : Kalıntı gerilmelerin Nötron ışın kırınımı ve X-ışın kırınımı metodları ile sonuçlarının karşılaştırılması.

Birçok alaşımda kalıntı gerilme ölçmek için uzama ölçüm noktasındaki kristalografik düzlemler arasındaki gerilmesiz mesafe (d_o) kolay bir şekilde ölçülemez ve bu sebeple nötron kırınım metodu ile kalıntı gerilme ölçerken çeşitli derecelerde hata yapılabilmektedir. Ayrıca ölçümlerin uzun süre gerektirmesi, ufak bir hacimdeki tek bir gerilme belirlenmesi için en az üç uzama ölçümü alınması gerekliliği ve ölçümlerin yüksek maliyeti nötron kırınım metodunun diğer kısıtlamalarıdır. Buna

rağmen kaynak bağlantılarında, haddelenmiş çubuklarda, plastik deformasyona uğramış plakalarda vb uygulamalarda nötron kırınım metodu ile kalıntı gerilme ölçüm uygulamaları mevcuttur. Bu yöntem laboratuar şartlarında uygulandığı için genellikle araştırma geliştirme faaliyetlerinde kullanılmaktadır. Yüksek enerjili nötronlar sayesinde ölçüm derinliği alüminyum parçalarda 250 mm'ye ve çelik için 37 mm'ye kadar ulaşabilmektedir [57].

5.2.3.3 Ultrasonik yöntem

Ultrasonik yada akustik tekniklerdeki temel prensip uygulanan gerilmeye bağlı ultrason hızındaki yaklaşık lineer değişim olgusudur. Belirli özel şartlar altında kalıntı gerilmeler bu olgudan yararlanılarak ölçülebilmektedir. Metal numuneye gönderilen birkaç megahertz frekansta ses dalgasının yolculuk süresinin ölçülmesi ile gerilme bulunmaktadır. Ancak hızı etkileyen tek parametre gerilme kaynaklı elastik uzama etkisi olmayıp metalin diğer birçok karakteristiği vardır ve bu etkilerin ayıklanması gerekmektedir. Mevcut teknoloji veya temel bilgiler bu ayıklamayı yapmak için genellikle yetersiz olmakta fakat ultrasonik tekniklerin kalıntı gerilme ölçümü için ilgi görmesi malzeme içerisinde üç boyutlu hasarsız ölçümlere imkan vermesinden kaynaklanmaktadır.

Hız ile elastik uzama arasındaki ilişki aşağıdaki formülle verilmektedir:

$$V = \sqrt{\frac{M}{\rho}\left[1 + \frac{C}{2M}\varepsilon\right]} \qquad \textbf{(5.4)}$$

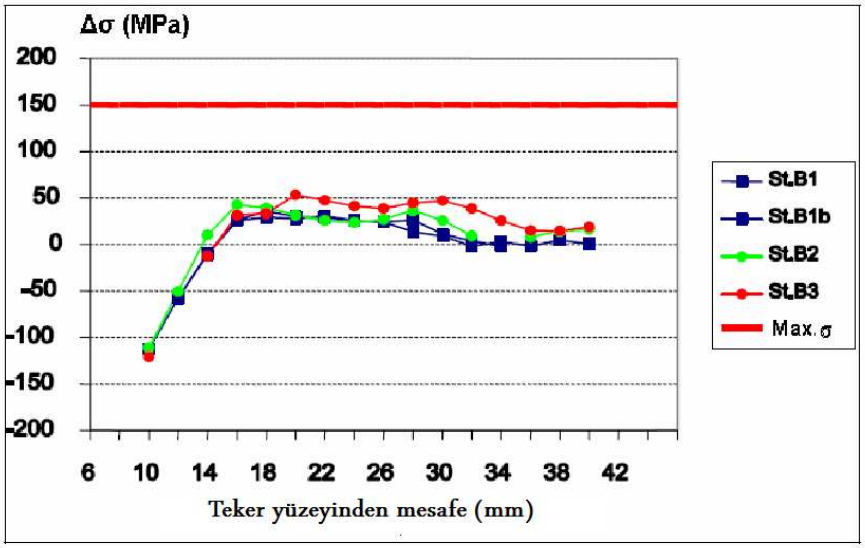
Burada V hız, M elastiklik modülü, ρ ortamın yoğunluğu, C üçüncü derece anharmonik sabit, ε elastik uzamadır.

Kalıntı gerilmeler ses dalgalarının hızlarını yavaşlatarak ses dalgalarının ilerlemesine engel olurlar. Bu sebeple malzeme üzerinde gerilme olmayan durumdaki ses dalgasının yolculuk süresi ile kalıntı gerilme içeren malzemedeki süre de farklı olacaktır. Nano saniye mertebede olan bu sürenin ölçümü hassas cihazlar gerektirir. Şekil 5.8'da kalıntı gerilmelerin ultrasonik ölçümü için geliştirilmiş bir cihaz ve sensörleri gösterilmektedir.



Şekil 5.8 : Ultrasonik ölçüm için bir cihaz ve sensörleri.

Metallerin karakteristikleri içerisinde ultrasonik hızları etkileyebilecek parametreler kristalografik doku, mikro gerilmeler, çoklu fazlar, yapışık çökeltiler, bileşik gradyenler ve dislokasyonların yoğunluğu ve dağılımıdır. İzotropik olmayan malzemelerde ve mikro yapı değişikliklerinin olduğu bölgelerde bu farklılıkların ayırt edilerek ölçüm yapılması oldukça zordur. Buna rağmen ultrasonik yöntem, malzemenin derinliğinden bağımsız olarak ölçüm alınabilen, hızlı, kolay ve ucuz bir kalıntı gerilme ölçüm metodudur. Şekil 5.9'de ultrasonik yöntem ve EMAT (elektro manyetik akustik transdüser) probu kullanılarak tren tekerleklerinde üretim sırasında oluşan kalıntı gerilmelerin ölçüm sonuçları verilmektedir.



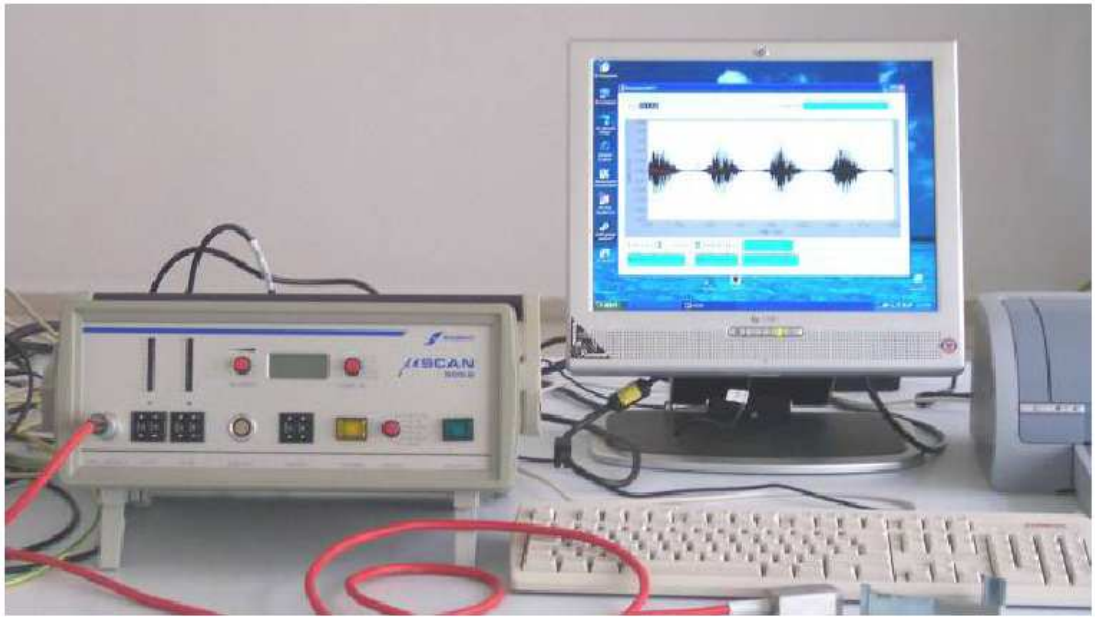
Şekil 5.9 : Ultrasonik yöntem ile tren tekerleklerinin jantları üzerindeki kalıntı gerilmelerin ölçümü [58].

5.2.3.4 Manyetik barkhausen gürültü yöntemi

Barkhausen gürültü analiz tekniği ferromanyetik metallerde manyetik alanların genişleme ve daralması ile meydana gelen ani manyetik yön değişimlerinin sayısını ve büyüklüğünü ölçmeye dayanmaktadır. Alüminyum alaşımları ferromanyetik olmadıkları için bu metod alüminyum alaşımları üzerinde uygulanabilir değildir.

Bu yöntemde ferromanyetik malzemelerde mıknatıslanma esnasında oluşan manyetik gürültü analiz edilerek ölçüm yapılır ve ölçüm derinliği 10 mm'ye kadar ulaşabilmektedir. Kalıntı gerilmelerin yanı sıra ısıl işlem ve kaynak sonucunda oluşan mikro yapı değişiklikleri de elde edilebilmektedir. Ölçülen manyetik parametre değerleri sertlik arttıkça azalmakta, malzeme içerisindeki çekme kalıntı gerilmeleri ile artmaktadır. Basma kalıntı gerilmeleri ise bu değerleri düşürmektedir.

Manyetik Barkhausen gürültü yöntemi hasarsız, doğruluğu yüksek, kolay kullanımlı, hızlı ölçüm alınabilen ve portatif bir metottur. Şekil 5.10'da manyetik Barkhausen gürültü ölçüm cihazı gösterilmektedir.



Şekil 5.10 : Manyetik Barkhausen gürültü ölçüm cihazı.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1 İş Parçası Malzemesi

Kalın camsı metal malzemenin frezelenmesi sonucu oluşan kalıntı gerilmelerin ölçümü ve incelenmesi çalışmasında Şekil 6.1'de gösterilen 10 mm çapında ve 100 mm boyunda ark eritme yöntemiyle yüksek saflıkta üretilen $Zr_{52.5}Ti_5Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}$ bileşimine sahip Zr-esaslı kalın camsı metal kullanılmıştır.



Şekil 6.1 : Deneysel çalışmada kullanılan Zr-esaslı KCM.

Zr-esaslı kalın camsı metal iş parçası deneylerde kullanılmak üzere hassas kesme cihazında su soğutmalı elmas disk kullanılarak 25 mm boyunda dört eşit parçaya kesilmiştir. Deneylerde kullanılan Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin bir takım mekanik özellikleri Çizelge 6.1'de verilmektedir.

Çizelge 6.1 : Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin mekanik özellikleri.

Elastisite Modülü (GPa)	**Sertlik (Vickers)**	**Poisson Oranı**	**Çekme Dayanımı (MPa)**	**Pekleşme Üsteli**	**Kırılma Tokluğu ($MPa.m^{1/2}$)**	**Kopma Uzaması (%)**
96	535	0.36	1900	0	40-55	2 (elastik)

Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin ısıl özellikleri ise Çizelge 6.2'de verilmektedir.

Çizelge 6.2 : Zr-esaslı kalın camsı metal malzemenin ısıl özellikleri.

Isıl İletkenlik (W/mK)	**Camsı Geçiş Sıcaklığı T_g (ºC)**	**Kristalleşme Sıcaklığı T_x (ºC)**	**Ergime Sıcaklığı (ºC)**
4	393	455	850

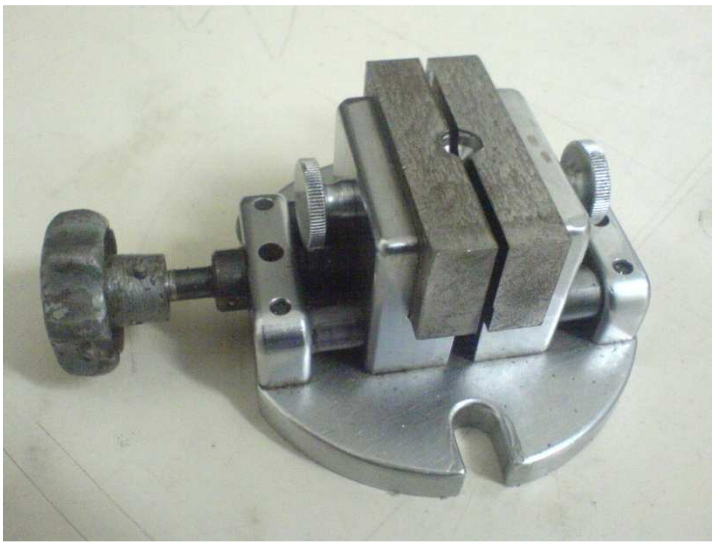
6.2 Alın Frezeleme Deney Düzeneği

Bu çalışmadaki tüm alın frezeleme deneyleri İTÜ Makine Fakültesi CAM laboratuarunda bulunan Spinner VC 650 model CNC kontrollü dik işlem merkezinde (Şekil 6.2) gerçekleştirilmiştir.



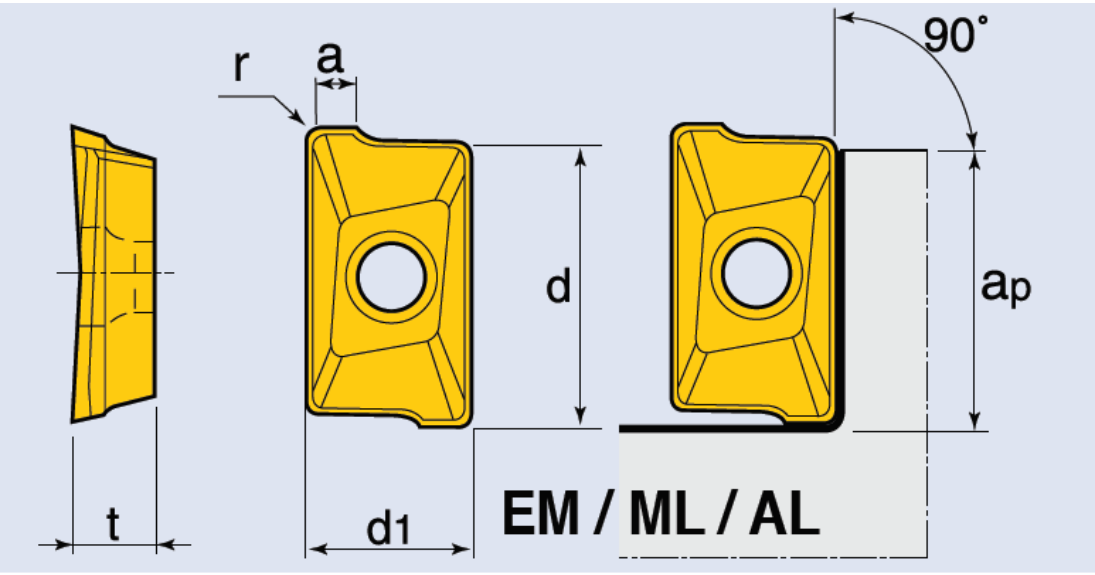
Şekil 6.2 : Frezeleme işlemlerinde kullanılan dik işleme merkezi.

10 mm çapındaki silindirik Zr-esaslı kalın camsı metal numuneleri tezgaha bağlamak için Şekil 6.3'te gösterilen iş parçası tutturma fikstürü gösterilmektedir. Numuneler iki çene arasına vida yardımıyla sıkılmıştır.



Şekil 6.3 : İş parçasının bağlandığı fikstür.

Alın frezeleme için kullanılan kesme uçları ve takımları TaeguTec firma kataloglarından seçilmiştir. Kesme uçları "insert" tipinde değiştirilebilir ve kaplamalı olarak kullanılmıştır. Kesme uçları "AXMT 0903 PER EML" kodu ile verilen (Şekil 6.4) ve Çizelge 6.3'te detayları verilen şekildedir.



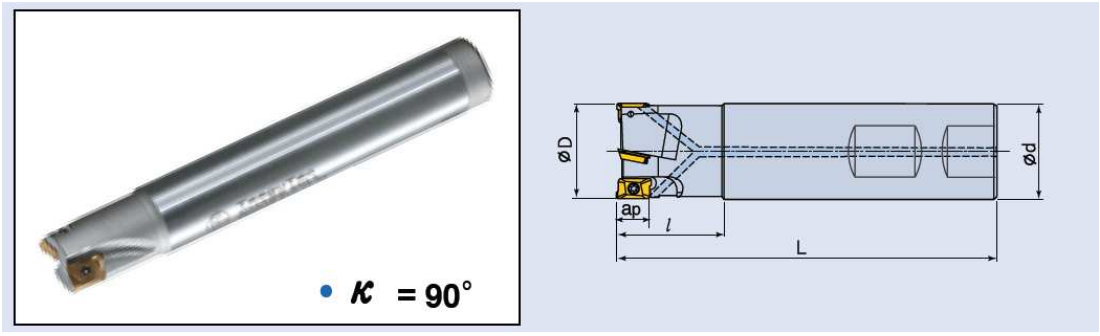
Şekil 6.4 : Kesme ucu "insert" boyutları.

Kesme ucu üzerinde kullanılan kaplama TT8020 kodu ile verilen PVD (fiziksel buhar biriktirme) tekniği ile film halinde kaplanan TiCN (titanyum karbonitrür) malzemedir. Kaplama özellikleri bakımından 90.2 HRA sertliğe sahip, tane boyutu ince, kullanılan iş parçası malzemeleri paslanmaz çelikler, alaşım çelikleri, yüksek sıcaklık alaşımları ve dökme demirlerdir. Çok amaçlı uygulamalar için yüksek mekanik ve şok dayanımı sunmaktadır.

Çizelge 6.3 : Alın frezeleme deneysel çalışmasında kullanılan kesme ucu ölçüleri.

Kesme Ucu Boyutları (mm)						
d	d_1	t	a	r	a_p	Kaplama
9.8	6.2	3.8	1.2	0.4	8.8	TT8020

Kesme uçları iki adet uç “insert” bağlanabilen 16 mm çapındaki “TE90AX216-09L” takıma monte edilmiştir ve tüm alın frezeleme işlemlerinde bu takım kullanılmıştır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 : Kesme ucu “insert”lerin bağlandığı tutturma takımı.

6.3 Deney Tasarımı

Zr-esaslı kalın camsı metal üzerinde frezelemenin kalıntı gerilmeler üzerindeki etkilerinin incelenmesi için öncesinde kesme hızı, ilerleme hızı ve paso derinliği gibi uygun kuru alın frezeleme parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan literatür araştırması sonucu camsı metaller için uygun kesme hızı ve diş başına ilerleme değerlerinin mevcut olmadığı görülmüştür. Bu sebeple ısıl iletkenliği düşük ve nispeten yüksek dayanımlı paslanmaz çelikler için tavsiye edilen kesme hızı ve diş başına ilerleme değerlerinden belirli bir emniyet payı ile yola çıkılmıştır.

Bu çalışmada camsı metalin 4 W/mK’lik düşük ısıl iletkenliği sebebiyle oluşan sıcaklık etkisi incelenmemiştir. Malzemenin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) 399 ºC ve kristalleşme sıcaklığı (T_x) 445 ºC’dir. Kesme parametrelerinin kalın camsı metalin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini işleme sırasında amorf iç yapısını bozacak şekilde yüksek sıcaklıklara çıkılmasını önleyecek şekilde olması gerekmektedir. Bu sebeple önceki bir çalışmada yuva işleme için kullanılan frezeleme parametreleri incelenmiş ve kesme hızı ve ilerleme hızı değerleri seçilirken yakın aralıklarda kalmaya dikkat edilmiştir [59]. İlerleme hızı buradan çıkarılan sonuçla daha yüksek seçilerek daha iyi yüzey kalitesi hedeflenmiştir. Kalın camsı metal numune çapı 10 mm olduğu için kalıntı gerilme ölçümlerinde mevcut olan en küçük uzama ölçer 7.4

mmx7.4 mm kullanılmıştır. Uzama ölçer tüm yüzeyi kapladığı için yüzey kalitesinin yüksek olmasına ihtiyaç duyulmuştur. Başlangıç olarak belirlenen alın frezeleme parametreleri Çizelge 6.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 6.4 : Yapılan alın frezeleme deney parametreleri.

Kesme hızı (dev/dk)	**İlerleme hızı (mm/dk)**	**Kesme derinliği (mm)**	**Kesme sıvısı**
600	20	0.3	Yok

6.4 Kalıntı Gerilme Ölçüm Deney Düzeneği

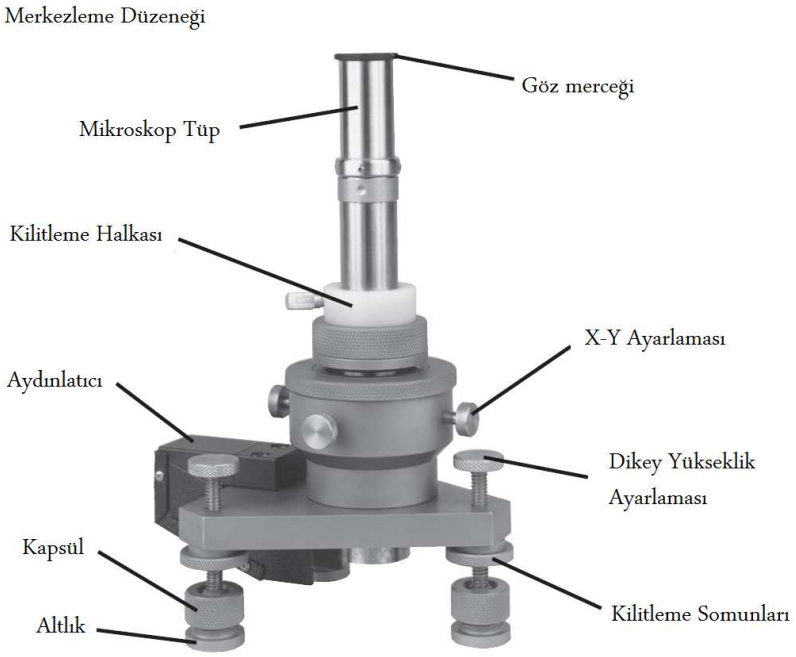
Zr-esaslı kalın camsı metal üzerinde yapılan kalıntı gerilme ölçümleri için yarı hasarlı delik delme yöntemi kullanılmıştır. Amaç frezeleme sonucu oluşan kalıntı gerilmelerin incelenmesi olduğu için hasarlı yöntemlerden kaçınılmıştır. Hasarsız yöntemlerden en yaygın kullanılan teknik olan X-ışını kırınımı kristal yapı içerisinde taneler arası mesafeden yola çıkarak ölçüm aldığı ve kalın camsı metalin amorf yapısı dolayısıyla tane sınırlarına sahip olmaması sebebiyle X-ışını kırınım yöntemi bu malzeme için uygun değildir. Benzer şekilde nötron kırınım yöntemi de kalın camsı metal malzemenin amorf yapısı sebebiyle tercih edilememektedir. Ultrasonik hız ve manyetik Barkhausen gürültü yöntemleri gibi diğer hasarsız kalıntı gerilme ölçüm teknikleri henüz geniş çapta kabul edilen ve standart hale getirilmiş yöntemler değildir. Buna karşın delik delme yöntemi çok küçük çapta delinen deliklerle çoğu zaman ihmal edilebilir yada kolayca onarılabilir bir derecede hasar verdiği için hasarsız yöntemlere yakındır. Ayrıca diğer tekniklere kıyasla basit, hızlı, portatif ve yüksek doğruluklu ölçümlere imkan sağlayan bir teknik olup ASTM E837 ile standart hale getirildiği için bu çalışmada tercih edilen kalıntı gerilme ölçüm tekniği olmuştur.

Delik delme yöntemi için bir takım ekipmanlar gerekmektedir. Uzama ölçümü için Vishay marka "EA-06-31RE-120" kodu ile verilen rozet tipi uzama ölçerler kullanılmıştır. Kullanılan uzama ölçerler delik delme metoduna özel olarak tasarlanmıştır. Uzama ölçer uzunluğu 7.4 mm ve genişliği 7.4 mm olup merkezinde 0.8-1.0 mm çapı arasında delik delmeye uygun kısım bulunmaktadır. Numune yüzeyine yapıştırılan uzama ölçerin merkezine derin olmayan bir deliğin delinebilmesini ve bundan kaynaklı gerilme rahatlaması ile elde edilen uzamanın ölçülebilmesini sağlamaktadır. Kullanılan uzama ölçer Şekil 6.6'da gösterilmektedir.



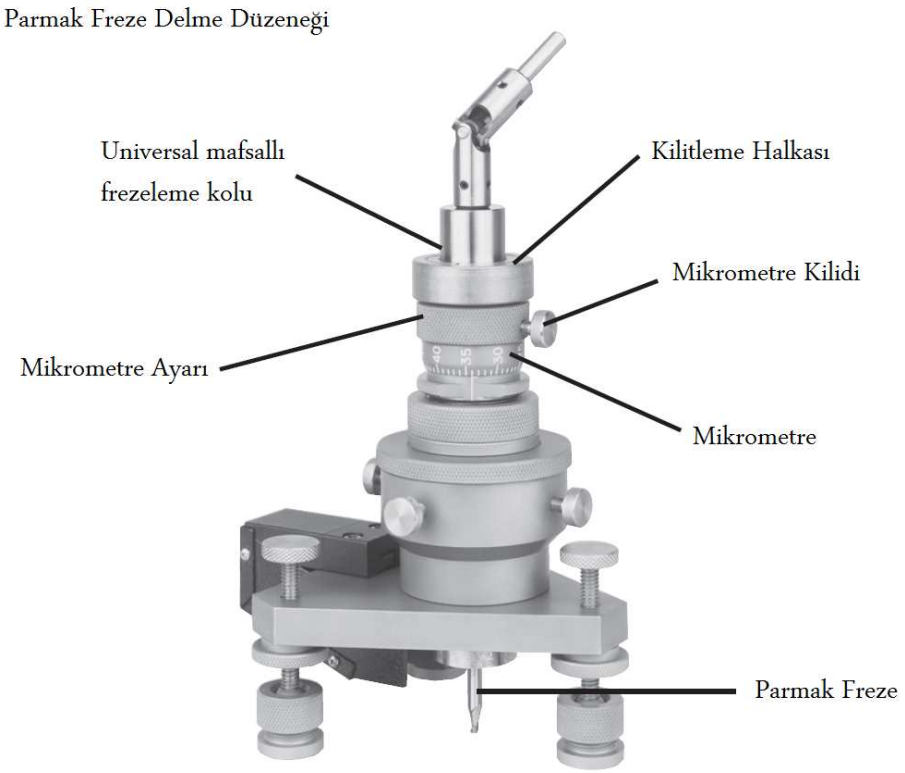
Şekil 6.6 : Delik delme yöntemi ile kalıntı gerilme ölçümüne uygun uzama ölçer [60].

Doğru bir şekilde uzama ölçümü almak için hassas bir şekilde merkezlemeyi ve ardından delmeyi sağlayan Model RS-200 marka ekipman kullanılmıştır. Bu ekipman portatif bir cihaz olup Şekil 6.7'de gösterilen şekilde göz merceği ve mikroskop tüp monte edilerek uzama ölçerin tam merkezine delik delme imkanı sağlamaktadır. Merkezden kaçık olarak delinen bir delik sonucu gerilme rahatlaması ile elde edilen uzama miktarlarından hesaplanan kalıntı gerilme ölçümlerinde kaçıklığın miktarına bağlı olarak ciddi ölçüm hataları yapılabilmektedir. Mikroskop tüp kilitleme halkası ile sıkıldıktan sonra göz merceğinden aydınlatıcı yardımıyla bakılarak uzama ölçerin hedef şeklinde gösterilen merkezine X-Y ayarlama vidaları ile merkezleme yapılır.

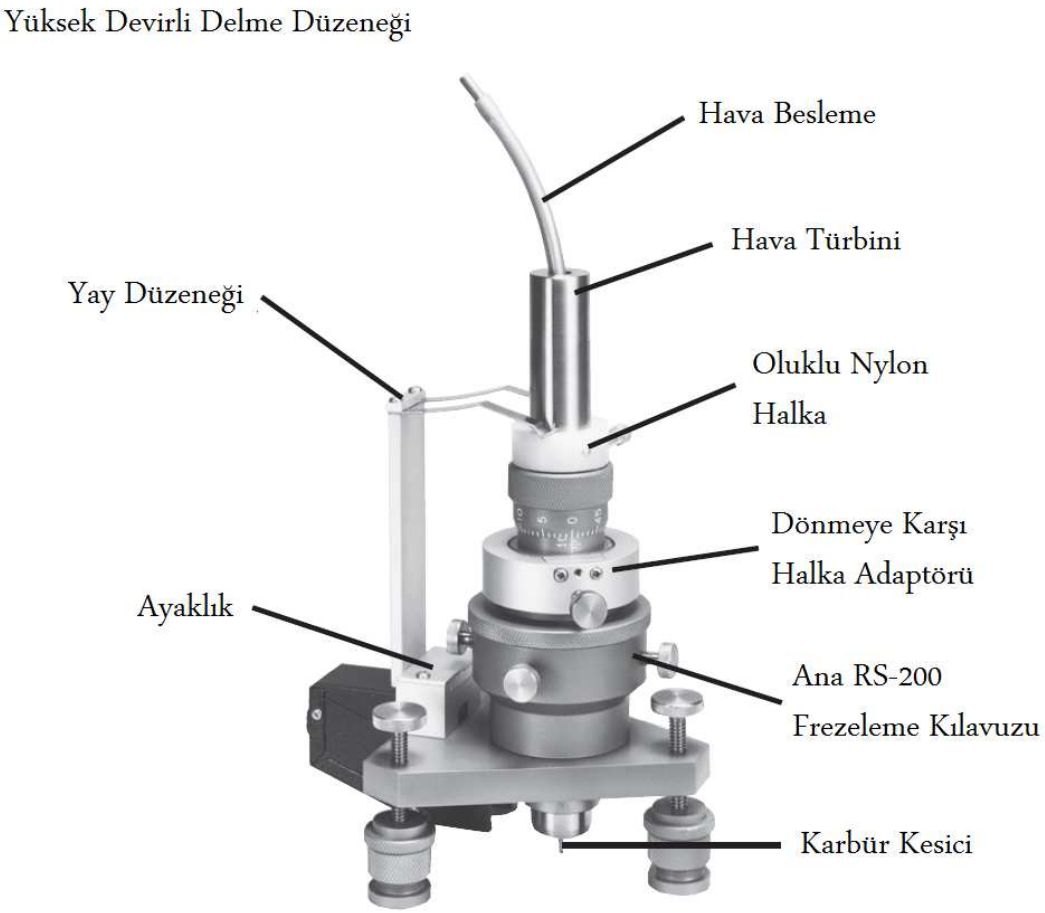


Şekil 6.7 : Model RS-200 merkezleme düzeneği [60].

Mikroskop tüp uzama ölçerin merkezine göre hizalandıktan sonra kilitleme halkası gevşetilerek mikroskop tübü RS-200 cihazından sökülür. Sonrasında delik delmek için Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da gösterilen iki adet opsiyonel delme düzeneğinden biri yerleştirilir. Parmak freze delme düzeneğinde, üniversal bir mafsal bulunmaktadır. Dışarıdan bir tahrikle (el matkabı yada değişken hızda elektrikli matkap) uçta bulunan parmak freze yardımıyla delme işlemi gerçekleştirilebilir. Yüksek devirli delme düzeneğinde ise bir hava türbini bulunmaktadır. Bir hava besleme kaynağına bağlanarak 400,000 rpm devir hızına kadar çıkabilmektedir. Delik delme için ise ucuna karbür bir kesici takılabilmektedir. Yüksek devirde delmenin avantajları yüksek delik kalitesi, kolay kullanım ve daha tutarlı sonuçlardır. Ayrıca işlemesi zor malzemeler için tavsiye edilmektedir. Çok sert metaller için karbür kesici uç yerine elmas uçlar da kullanılabilmektedir. Yüksek devirde delik delme ile aşındırıcı jet ile işlemede olduğu gibi delmeden kaynaklı kalıntı gerilmelerin etkisi en aza indirilmektedir. Bu deneysel çalışmada hava türbinli yüksek devirli delme düzeneği hava kompresörüne bağlanarak 0.8 mm çapındaki karbür uç ile birlikte kullanılmıştır.

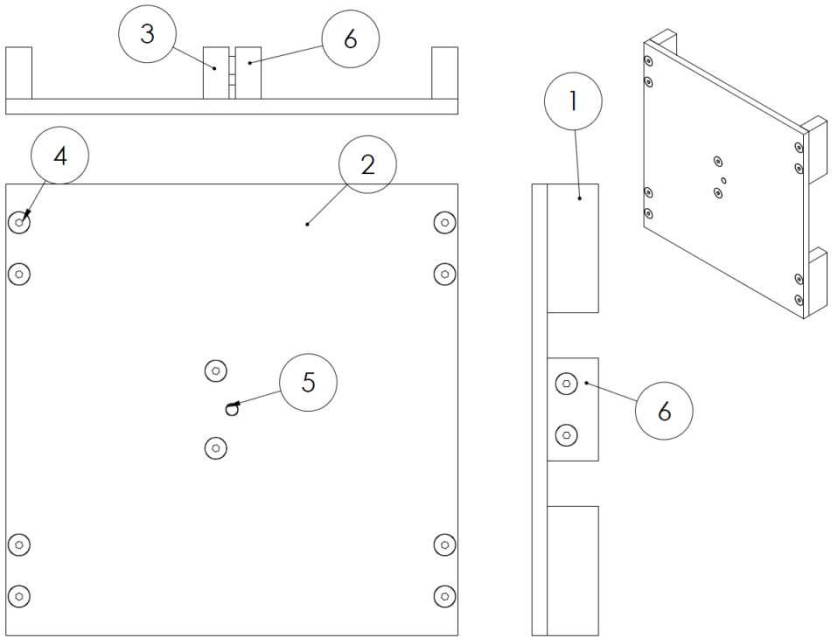


Şekil 6.8 : Model RS-200 parmak freze delme düzeneği [60].



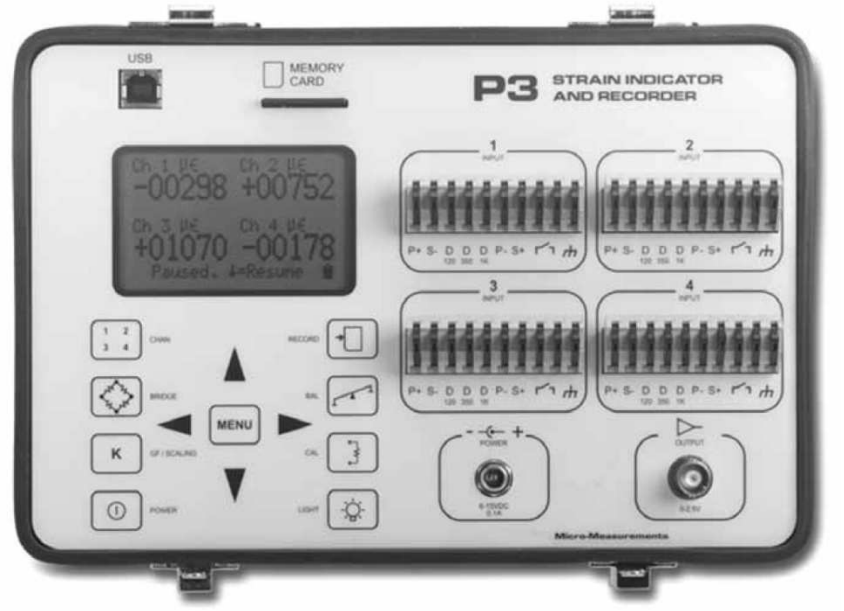
Şekil 6.9 : Model RS-200 yüksek devirli delme düzeneği [60].

Model RS-200 cihazının üç ayaklı tasarımı daha çok plaka şeklindeki büyük parçalar için uygun olmaktadır. Bu deneysel çalışmada ise 10 mm çapındaki silindirik kalın camsı metal malzeme kullanılmıştır. Bu sebeple numunenin üzerine hem uzama ölçerin uygulanması hem de model RS-200 ile delik delinebilmesi için numuneyi sabitlemeye imkan veren alüminyum malzemeden bir fikstür tasarlanıp imal edilmiştir. Şekil 6.10'da 5 numara ile gösterilen boşluğa numune takılmaktadır. 3 ve 6 numara ile gösterilen çeneler arasında vida yardımıyla sıkılarak sabitlenmesi gerçekleştirilmiştir. Kalın camsı metal numunenin alın frezeleme ile işlenmiş yüzeyinin fikstür yüzeyinden fazla bir çıkıntı yapmamasına özen gösterilmiştir. Bu sayede numune yüzeyine uzama ölçer yapıştırılırken kolaylık sağlanmaktadır. Model RS-200 cihazı fikstürün üzerine üç adet altlığın yapıştırılması ile sabitlenmiştir. Cihazın altlıklarının fikstür üzerinde herhangi bir oynamaya müsade etmeyecek şekilde düzgün bir yapışmanın sağlanması kritiktir.



Şekil 6.10 : Numuneyi sabitlemek için kullanılan fikstür.

Uzama ölçer üzerindeki elastik uzama miktarını kademeli olarak delme esnasında okuyabilmek için Vishay marka dört kanallı Model P3 uzama indikatörü kullanılmıştır. Uzama ölçer üzerine lehimlenen kablolar fikstür üzerine yapıştırılan bir terminale lehimlenmiştir. Terminalden aktarılan kablolar da Model P3 uzama indikatöründe ilgili bağlantı noktalarına takılmıştır. Şekil 6.11'de deneysel çalışmada kullanılan portatif ve batarya ile çalışabilen Model P3 uzama indikatörü gösterilmektedir.



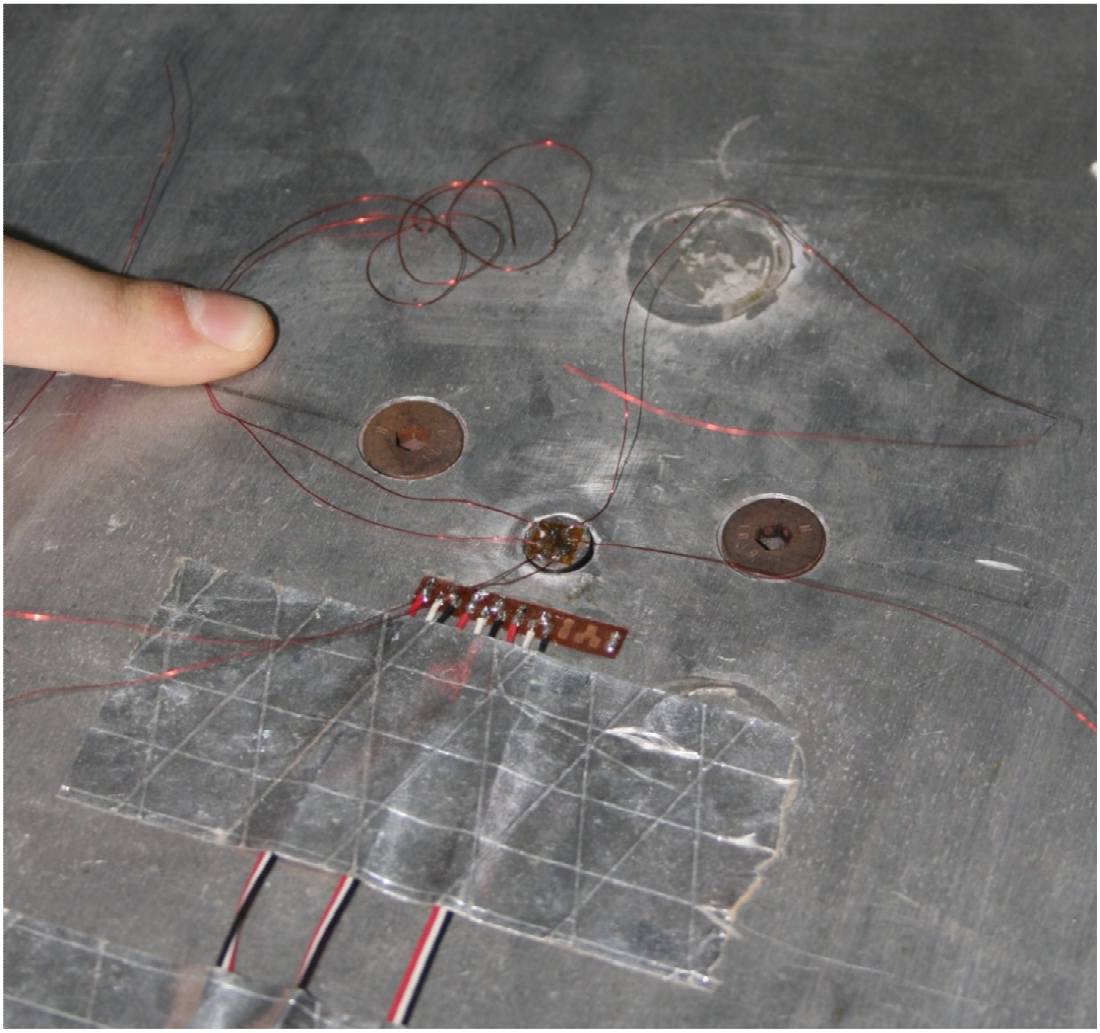
Şekil 6.11 : Model P3 uzama indikatörü.

6.5 Kalıntı Gerilme Ölçümü

Uzama ölçerin numune üzerine iyi bir şekilde yapışması için yüzey hazırlanışı oldukça önemlidir. İlk aşamada kalın camsı metal malzemenin yüzeyi 220, 320 ve 400 numaralı zımparalar ile kabadan inceye doğru zımparalanır. Zımparalamanın ikinci aşamasında asidik özellikte bir şartlandırıcı kimyasal sürülür. Buradaki amaç uzama ölçerin yapıştırılacağı yüzeyde iyi bir yapışmayı sağlamak için yüzeyin pH 7 değerine getirilmesidir. Zımparalamanın ardından yüzey kuru pamukla temizlenerek şartlandırıcının yüzeyden uzaklaşması sağlanır. Kalın camsı metal numune üzerinde uzama ölçerin yapıştırılacağı yüzeye kurşun kalemle eksenel çizgiler çizilir. Bu çizgilerden yararlanarak uzama ölçer daha sonra istenen konumda ve merkezi eksenlerin kesişiminde olacak şekilde yapıştırılır. Çizgiler çizildikten sonra yüzey nötrleştirici bir kimyasal ile temizlenir. Bu sayede yüzey istenilen pH değerine getirilmiş olur. Şartlandırıcı uygulamasından sonraki gibi yüzey kuru bir pamukla temizlenir ve kurulanır. Yüzey artık uzama ölçer yapıştırmaya hazır hale gelir.

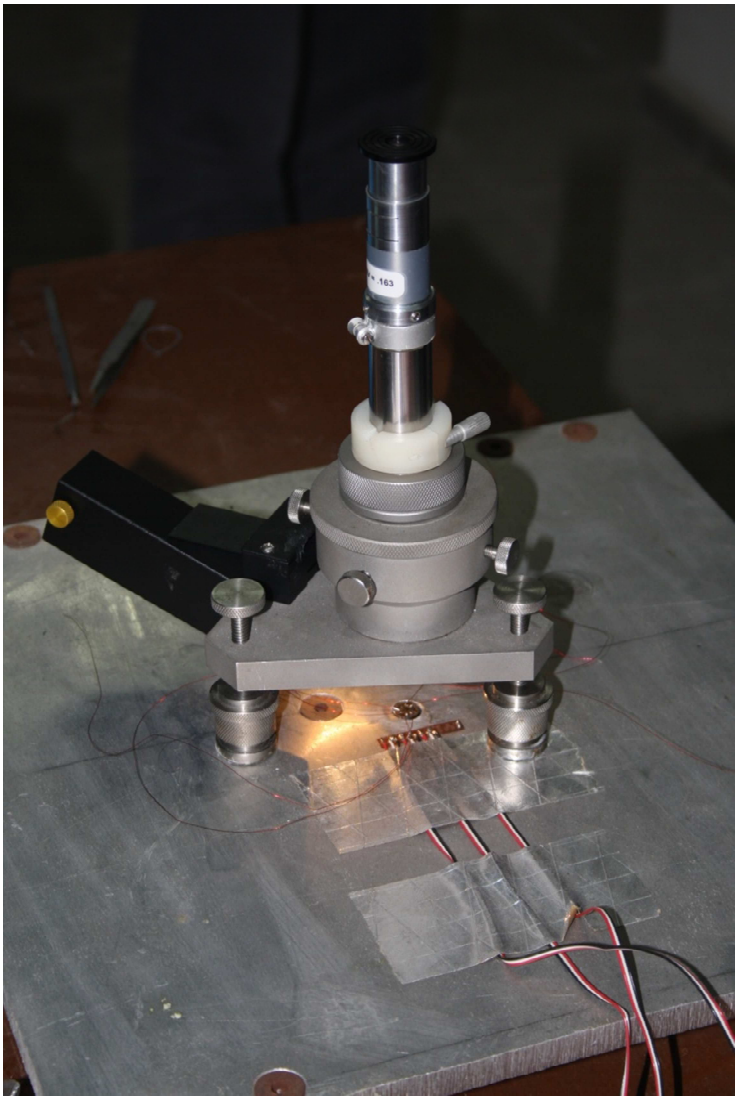
Uzama ölçer numune yüzeyine yapıştırılmadan evvel pleksiglas bir malzeme yüzeyine konularak bir bant yardımıyla bant üzerine yapıştırılır ve sonrasında bant yatayla 45º yapacak şekilde pleksiglas yüzeyden kaldırılır. Numune üzerinde yüzey temizleme işlemleri sırasında çizilen çizgilerin merkezine gelecek şekilde bant numune üzerine yapıştırılır. Bu deneysel çalışmada numune yüzeyi dar olduğu için bant, fikstüre monte edilmiş numune ile aynı seviyedeki fikstürün yüzeyine yapıştırılmıştır. Daha sonra bant yarıya kadar tekrar kaldırılarak uzama ölçerin altına bir damla M-Bond 200 yapıştırıcısı uygulanır. Yapıştırıcının aktivasyonu için uzama ölçerin altına fırça yardımıyla katalizör sürülür. İyi bir yapışmanın sağlanması sıcaklık ve basınçla gerçekleştiği için uzama ölçer üzerine parmak ile iki dakika boyunca bastırılır. Yapışma gerçekleştikten sonra bant yatayla oldukça dar bir açı yapacak şekilde uzama ölçer üzerinden kaldırılır. Böylece lehimleme için hazır hale gelmiş olur.

Lehimleme yapıldıktan sonra her bir kablo çifti ucundan direnç ölçülmüş ve 120Ω olduğu kontrolü yapılmıştır. Bu sayede lehimlemenin düzgün yapıldığından emin olunmaktadır. Uzama ölçerin fikstüre sabitlenmiş kalın camsı metal numune üzerine yapıştırıldığı ve lehimlemenin yapıldığı uygulama Şekil 6.12'de gösterilmektedir.



Şekil 6.12 : Uzama ölçerin fikstüre sabitlenmiş KCM numune üzerine yapıştırıldığı ve lehimlemenin yapılması.

Lehimleme tamamlandıktan sonra artık delik delme işlemine geçilebilir. Model RS-200 cihazı üç adet altlığından fikstüre yapıştırıldıktan sonra göz merceğinden merkezlemesi yapılır. Cihazın altlıklarının oryantasyonu fikstür üzerindeki kablolamaya uygun bir şekilde yapılmıştır. Şekil 6.13'te deneysel düzenek üzerinde merkezleme gösterilmektedir. Sonrasında mikroskop tüp sökülerek yerine hava türbinli düzenek monte edilir. Göz merceği ve hava türbinli düzenek portatif olduğundan bu montaj sırasında cihazın altlıkları tekrar çıkarılmamakta bu sayede göz merceğinde yapılan merkezleme bir sonraki işlem için sabit olarak kalmaktadır. Göz merceği ile merkezleme ardından bu işlemde kullanılan aydınlatıcı da cihazdan sökülmektedir.



Şekil 6.13 : Fikstür üzerine RS-200 cihazının yapıştırılması ve merkezlemenin göz merceği ile gerçekleştirilmesi.

Hava türbinli düzenek monte edildikten sonra hava kompresörüne bağlı hat ile hava besleme borusu birbirine bağlanır. Bu bağlantıda arada bir vana ve pedal bulunmaktadır (Şekil 6.14). Vana yardımıyla basınç 3.5 bara ayarlanır. Pedale basıldığında ise havanın besleme borusuna gönderilmesi sağlanır. Pedale basılıp türbin aktive edildiğinde basınç istenen değer olan 3 bara düştüğü görülmüştür. Delik delme ve ölçüm alma işlemi yüzeyden belirli bir derinliğe kadar kademe kademe ilerlediği için tüm ölçüm alma sürecinde hava türbinine hava akışı sağlamak için pedala sürekli basılı tutularak gerçekleştirilmektedir. Hava akışının kesilerek kesintili bir delme durumunda bundan kaynaklı ilave hata payı ölçümlere eklenebilir.

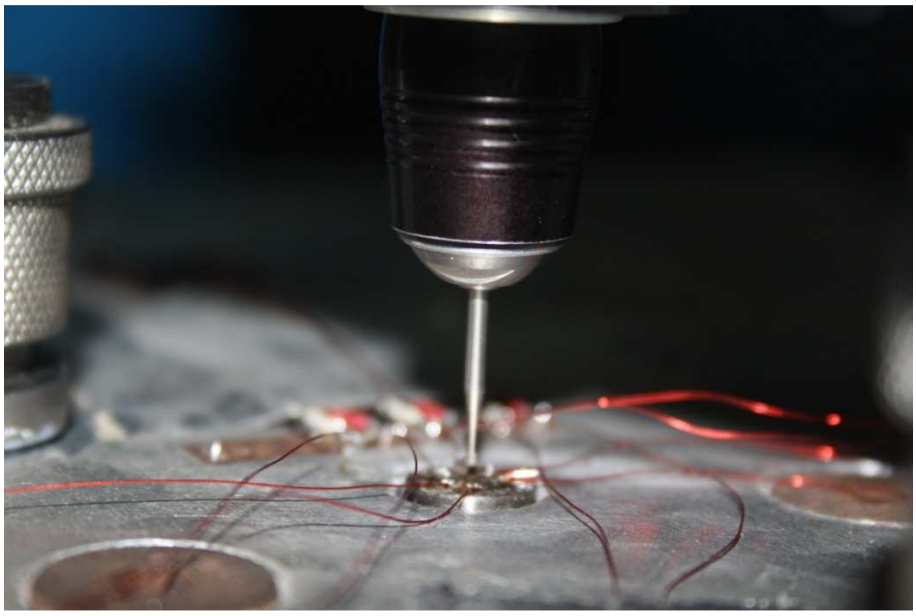


(a) (b)

Şekil 6.14 : Hava türbinini istenen basınçta regüle eden vana (a) ve hava akışına izin veren pedal sistemi (b).

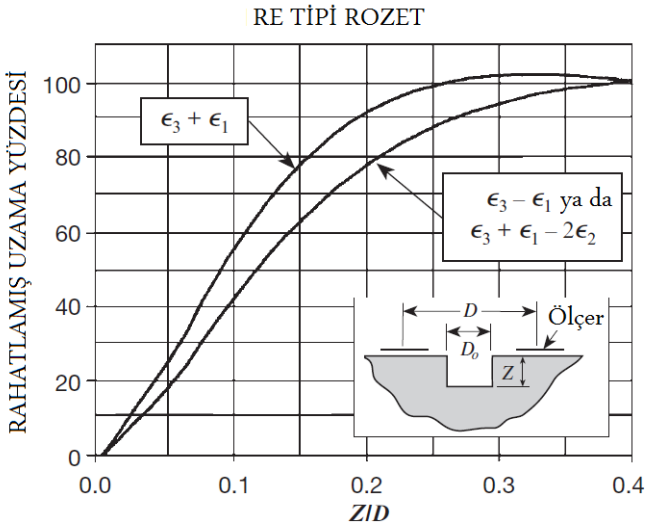
Delik delme düzeneği çalışmaya hazır hale getirildikten sonra kesici uç numune yüzeyine getirilerek sıfırlama yapılır. Ardından kilitleme halkası sıkılır. Mikrometre yardımıyla kesici uç numune yüzeyine 0.2 mm mesafe olacak şekilde yukarı yönde yükseltilir (Şekil 6.15). Bu sayede hava basıncı ile türbin tahrik edildiğinde kesici uç numune yüzeyinden belirli bir aralık bırakılarak dönmeye başlatılabilir. Kesici uç dikey eksende hareket ettirilip delme işlemine başlamadan önce uzama ölçerlerin model P3 uzama indikatörü üzerinde kalibre edilmesi gerekir. Kalibrasyon sonrası her üç kanalda da uzama sıfır olarak okunmalıdır. Model P3 uzama indikatörü ilk üç kanala çeyrek köprü devre olacak şekilde ayarlanmıştır. Ölçü faktörü olarak uzama ölçerden alınan 1.97 değeri girilmiştir.

Kesici uç dikey doğrultuda mikrometre yardımıyla sıfır noktasına getirildikten sonra her seferinde 20 mikron derine inecek şekilde uzama ölçümleri alınmıştır. Bu şekilde 1 mm derinliğe kadar kademeli şekilde inilmiştir. Uzama indikatöründen uzama değerleri okunduğu esnada hava türbinine hava akışı kesilmemiştir ve kesici uç sürekli olarak döner vaziyettedir. Mikrometre yardımıyla derinlik ayarlandığı esnada cihaza ekstra titreşim oluşturmamak için hassas bir şekilde ayarlama yapılmıştır. 1 mm derinliğinde son ölçüm alındıktan sonra kesici uç başlangıç konumuna getirilip hava basıncı kesilerek ölçümler tamamlanmıştır. Uzama ölçümleri daha sonra kalıntı gerilmelerin hesaplanmasında kullanılmaktadır.



Şekil 6.15 : Hava türbini ile tahrik edilen kesici uç.

Uzama ölçümü alınacak delik derinliği, delinen bu delik ile ne kadar bir rahatlama oluşturulduğuna göre belirlenmektedir. Kullanılan RE tipi rozet için Z/D oranı 0.2 olduğunda kalıntı gerilmenin % 80'i ortaya çıkarılmış ve Z/D oranı 0.4 olduğunda ise kalıntı gerilmenin %100 ölçüde ortaya çıkarılmış olduğu görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan uzama ölçerin grid merkez çapı "D" 2.56 mm'dir. Bu sebeple kesici uç numune yüzeyinden 0.5 mm aşağı indiğinde kalıntı gerilme % 80 oranına açığa çıkmaktadır. Kalıntı gerilmeden kaynaklı uzamanın % 100 rahatlatılması için kesici uç ile 1 mm derine inilmiştir. Şekil 6.16'da kalıntı gerilme kaynaklı rahatlamış uzama yüzdesinin Z/D oranına göre değişimi gösterilmektedir.



Şekil 6.16 : Yüzde uzamanın delik derinliğine bağlı grafiği [60].

Uzama ölçerler üzerindeki elastik uzamalar ölçüldükten sonra delik delme ile rahatlatılmış kalıntı gerilme hesaplarına geçilebilir. Uniform kalıntı gerilmeye (σ_x) maruz ince bir plaka üzerindeki lokal bir alanda herhangi bir P (R, α) noktasındaki gerilme durumu polar koordinatlarda şu şekilde verilir (Şekil 6.17a):

$$\sigma'_r = \frac{\sigma_x}{2}(1 + cos2\alpha) \quad \textbf{(6.1)}$$

$$\sigma'_\theta = \frac{\sigma_x}{2}(1 - cos2\alpha) \quad \textbf{(6.2)}$$

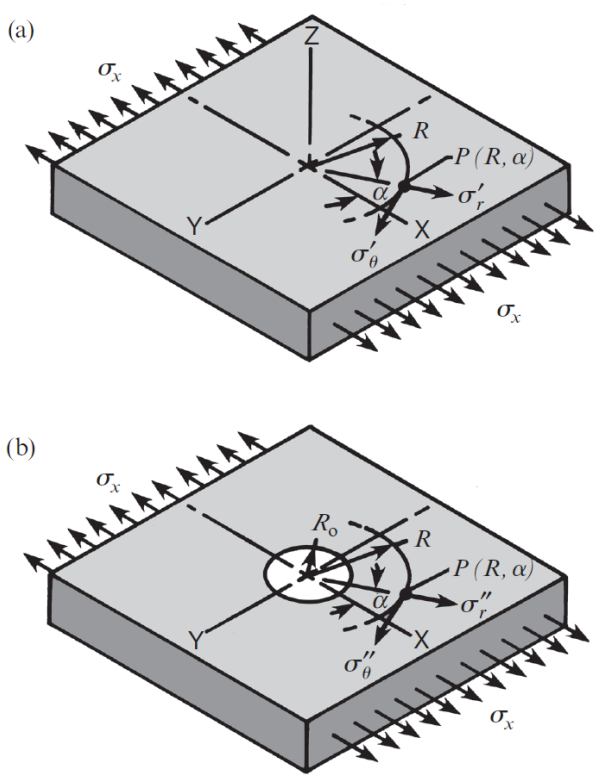
$$\tau'_{r\theta} = -\frac{\sigma_x}{2} sin2\alpha \quad \textbf{(6.3)}$$

Plakanın aynı bölgesinde küçük bir delik delindiğinde ise delik çevresindeki gerilmeler farklı olmaktadır. Delik yüzeyinde heryerde σ_r ve $\tau_{r\theta}$ sıfır olmalıdır. Delik delindikten sonra P (R, α) noktasındaki gerilmeler (Şekil 6.17b):

$$\sigma''_r = \frac{\sigma_x}{2}\left(1 - \frac{1}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x}{2}\left(1 + \frac{3}{r^4} - \frac{4}{r^2}\right) cos2\alpha \quad \textbf{(6.4)}$$

$$\sigma''_\theta = \frac{\sigma_x}{2}\left(1 + \frac{1}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x}{2}\left(1 + \frac{3}{r^4}\right) cos2\alpha \quad \textbf{(6.5)}$$

$$\tau''_{r\theta} = -\frac{\sigma_x}{2}\left(1 - \frac{3}{r^4} + \frac{2}{r^2}\right) sin2\alpha \quad \textbf{(6.6)}$$



Şekil 6.17 : Delik delinmesinden önce ve sonra P (R, α) noktasındaki gerilme durumları.

Denklemlerdeki R_o delik çapı ve R delik merkezinden isteğe bağlı yarıçap olmak üzere:

$$r = \frac{R}{R_o} \ (R \geq R_o) \tag{6.7}$$

Delik delmeden sonraki son durumdaki gerilmelerden ilk durumdaki gerilmeler çıkarıldığında elde edilen gerilme değişiminden P (R, α) noktasındaki delik delmeye bağlı gerilme rahatlaması bulunabilir:

$$\Delta\sigma_r = \sigma''_r - \sigma'_r \tag{6.8}$$

$$\Delta\sigma_\theta = \sigma''_\theta - \sigma'_\theta \tag{6.9}$$

$$\Delta\tau_{r\theta} = \tau''_{r\theta} - \tau'_{r\theta} \tag{6.10}$$

Plaka malzemesinin mekanik özelliklerinin homojen ve izotropik olduğu kabulüyle ve lineer-elastik gerilme-uzama davranışı ile iki eksenli Hooke kuralından P (R, α) noktasındaki rahatlatılmış normal uzamalar:

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_x(1+v)}{2E}\left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4}cos2\alpha + \frac{4}{r^2(1+v)}cos2\alpha\right] \tag{6.11}$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\sigma_x(1+v)}{2E}\left[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4}cos2\alpha - \frac{4}{r^2(1+v)}cos2\alpha\right] \tag{6.12}$$

Yukarıdaki denklemler radyal ve teğetsel uzamalar için sinusoidal biçimde basitleştirilecek olursa:

$$\varepsilon_r = \sigma_x(A + Bcos2\alpha) \tag{6.13}$$

$$\varepsilon_\theta = \sigma_x(-A + Ccos2\alpha) \tag{6.14}$$

Bu durumda A, B ve C katsayıları:

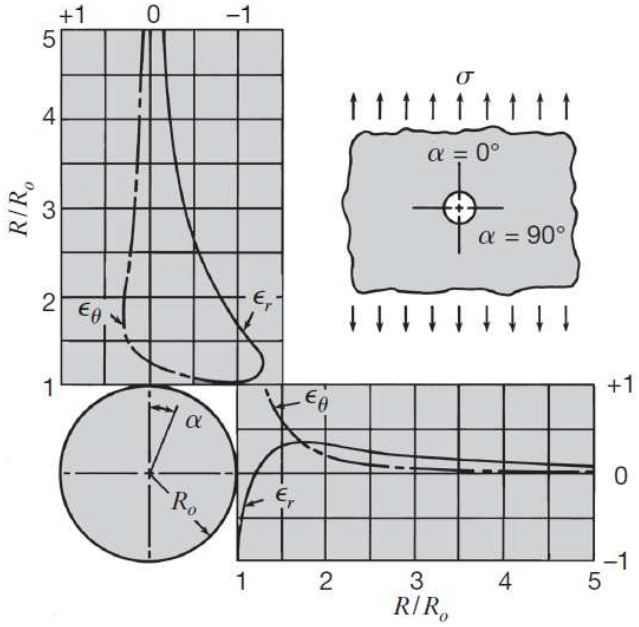
$$A = -\frac{1+v}{2E}\left(\frac{1}{r^2}\right) \tag{6.15}$$

$$B = -\frac{1+v}{2E}\left[\left(\frac{4}{1+v}\right)\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4}\right] \tag{6.16}$$

$$C = -\frac{1+v}{2E}\left[-\left(\frac{4}{1+v}\right)\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4}\right] \tag{6.17}$$

Rahatlayan uzamalar delik yüzeyinden mesafe ile kompleks bir biçimde değişmektedir. Bu değişim Şekil 6.18'de gösterilmektedir. Uzamalar α=0º ve α=90º asal doğrultularda çizilmiştir. Rahatlayan uzamalar genellikle deliğe göre artan mesafelerde düşme eğilimindedir. Bu sebeple uzama ölçer üzerindeki çıkış sinyalini

maksimize etmek için uzamalar delik kenarına yakın biçimde ölçülmelidir. Ancak deliğin kenarı etrafında parasitik etkiler de artmaktadır. Bu yüzden uzama ölçer tasarımları için optimum yarıçapı "R" seçilirken her iki etkiden kaynaklı orta yol bulunur. Analitik ve deneysel çalışmalar $r=R_o/R$ için en uygun aralığın $0.3 < r < 0.45$ olduğunu göstermiştir [60].



Şekil 6.18 : Radyal ve teğetsel uzamaların asal doğrultularda delik merkezinden uzaklığına bağlı değişimi.

Büyük asal gerilme ekseninde α=0º için radyal uzama "ε_r", teğetsel uzamadan "ε_θ" nispeten büyüktür ve bu sebeple ticari uzama ölçerlerin gridleri radyal uzamayı ölçmek için radyal şekilde yönlendirilerek tasarlanmaktadır.

Buraya kadar verilen denklemler en basit olan tek eksenli kalıntı gerilme durumu için geçerlidir. Fakat pratikte kalıntı gerilmeler çoğunlukla çift eksenlidir. Superpozisyon prensibi ile Y ekseni boyunca tek eksenli kalıntı gerilme cos2α'nın cos2(α+90º) ile değiştirilerek elde edilir. Bu durumda X ve Y yönlerindeki radyal uzamalar:

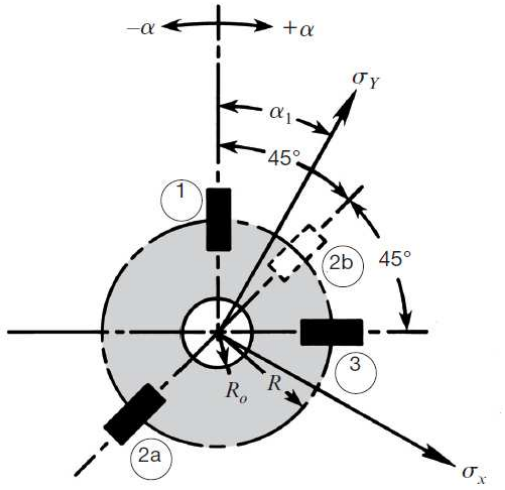
$$\varepsilon_r{}^y = \sigma_y(A - Bcos2\alpha) \qquad \textbf{(6.18)}$$

$$\varepsilon_r{}^x = \sigma_x(A + Bcos2\alpha) \qquad \textbf{(6.19)}$$

Her iki eksende kalıntı gerilmeler olduğu durumda superpozisyon prensibiyle denklemler toplanarak:

$$\varepsilon_r = \sigma_x(A + Bcos2\alpha) + \sigma_y(A - Bcos2\alpha) \qquad \textbf{(6.20)}$$

Bu denklemdeki üç bilinmeyen olan asal gerilmeler ve α açısını bulmak için üç tane bağımsız ölçüme ihtiyaç duyulur. Rahatlayan uzamaları ölçmek için delik delinecek bölge etrafına üç rezistanslı uzama ölçer yerleştirilir. Ticari uzama ölçerler her biri arasında analitik denklemleri en basite indirgemek için 45º olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 6.19'da rozet tipi için uzama ölçerler arasındaki açılar gösterilmektedir.



Şekil 6.19 : Kalıntı gerilmeleri belirlemek için kullanılan rozet tipi uzama ölçer dizilimi.

Dizilimde 2b yerine 2a nolu pozisyonun kullanılma sebebi her ikisinin de aynı sonucu vermesi ve delik ekseninden sapma olduğu durumlardaki hataların 2a pozisyonunda minimize edilmesidir. Denklem 6.20 rozet içerisindeki her üç uzama ölçer için tekrar yazılırsa:

$$\varepsilon_1 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)cos2\alpha \qquad \textbf{(6.21)}$$

$$\varepsilon_2 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)cos2(\alpha + 45°) \qquad \textbf{(6.22)}$$

$$\varepsilon_3 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)cos2(\alpha + 90°) \qquad \textbf{(6.23)}$$

Buradan asal gerilmeler ve doğrultuları α açısı 1 numaralı uzama ölçerden en yakın asal eksene olacak şekilde:

$$\sigma_{maks} = \frac{\varepsilon_1+\varepsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B}\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \qquad \textbf{(6.24)}$$

$$\sigma_{min} = \frac{\varepsilon_1+\varepsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B}\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \qquad \textbf{(6.25)}$$

$$tan2\alpha = \frac{\varepsilon_1-2\varepsilon_2+\varepsilon_3}{\varepsilon_1-\varepsilon_3} \qquad \textbf{(6.26)}$$

Maksimum ve minimum gerilmenin yönünü tespit etmek için aşağıdaki kurallar kullanılmaktadır:

$\varepsilon_3 > \varepsilon_1$: α açısı σ_{maks}'u gösterir

$\varepsilon_3 < \varepsilon_1$: α açısı σ_{min}'u gösterir

$\varepsilon_3 = \varepsilon_1$: $\alpha = \pm 45^o$

$\varepsilon_2 < \varepsilon_1$: σ_{maks} + 45°'de bulunur

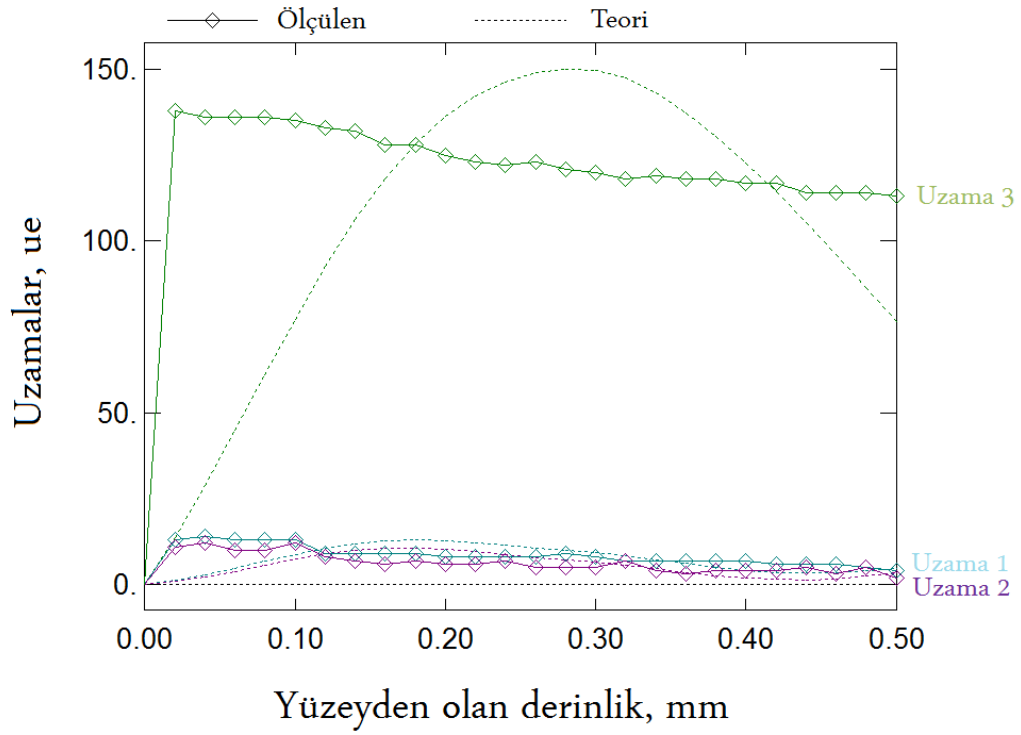
$\varepsilon_2 > \varepsilon_1$: σ_{maks} - 45°'de bulunur

Buraya kadar verilen formüllerle ölçüm sonucu elde edilen uzama değerleri kullanılarak maksimum ve minimum kalıntı gerilmeler hesaplanabilmektedir. Elde edilen uzamalara karşılık hesaplanan tüm sonuçlar Çizelge 6.5'de verilmiştir.

Çizelge 6.5 : Ölçülen uzama değerlerine göre hesaplanan kalıntı gerilmeler.

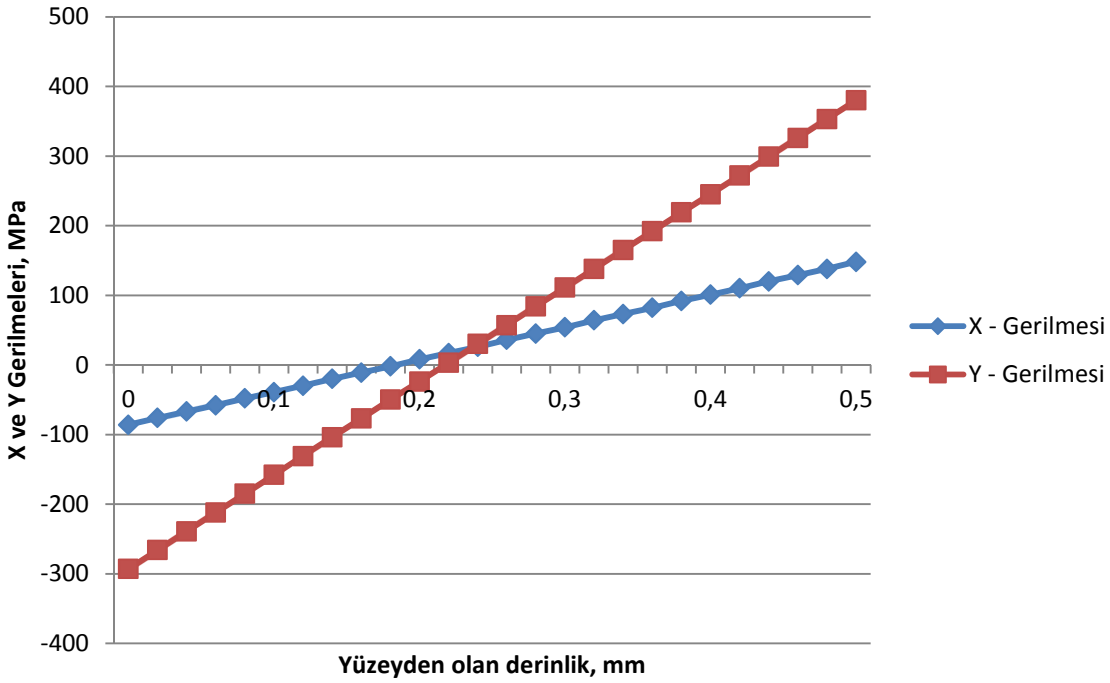
Derinlik	ε_1	ε_2	ε_3	σ_{maks}	σ_{min}	T_{maks}	**α**	σ_X	σ_Y	τ_{XY}
mm	**με**	**με**	**με**	**MPa**	**MPa**	**MPa**	**°**	**MPa**	**MPa**	**MPa**
0	0	0	0	-40	-338	149	23	-86	-293	-108
0,02	13	11	138	-34	-308	137	23	-76	-266	-99
0,04	14	12	136	-29	-277	124	23	-67	-239	-89
0,06	13	10	136	-23	-246	111	23	-58	-212	-80
0,08	13	10	136	-18	-215	99	23	-48	-185	-71
0,1	13	12	135	-13	-184	86	23	-39	-158	-62
0,12	9	8	133	-7	-154	73	23	-30	-131	-53
0,14	9	7	132	-2	-123	61	23	-20	-104	-44
0,16	9	6	128	4	-92	48	23	-11	-77	-34
0,18	9	7	128	9	-61	35	23	-2	-50	-25
0,2	8	6	125	15	-30	23	23	8	-24	-16
0,22	8	6	123	20	0	10	23	17	3	-7
0,24	8	7	122	31	25	3	-66	26	30	2
0,26	8	5	123	62	31	16	-67	36	57	11
0,28	9	5	121	93	36	28	-67	45	84	20
0,3	8	5	120	124	42	41	-67	54	111	30
0,32	7	7	118	154	47	54	-67	64	138	39
0,34	7	4	119	185	53	66	-67	73	165	48
0,36	7	3	118	216	58	79	-67	82	192	57
0,38	7	4	118	247	63	92	-67	92	219	66
0,4	7	4	117	278	69	104	-67	101	245	75
0,42	6	4	117	308	74	117	-67	110	272	84
0,44	6	5	114	339	80	130	-67	120	299	94
0,46	6	3	114	370	85	142	-67	129	326	103
0,48	5	5	114	401	91	155	-67	138	353	112
0,5	4	2	113	432	96	168	-67	148	380	121

Yüzeyden olan derinliğe bağlı ölçülen uzama değerleri Şekil 6.20'de teorik değerlerle kıyaslanmıştır. Uzama 3 değerleri için ölçülen ile teorik arasında bir miktar fark görülmektedir. Bunun sebebi her bir ölçüm arasında 20 mikron olarak belirlenen derinlemesine ilerleme miktarıdır. Alınan ilk ölçümün yüzeyden 20 mikron derinlikte olması sebebiyle grafikte ani bir yükseliş görülmektedir. Teorik durumda ise tavsiye edilen ilk derinlemesine ilerleme miktarı 0.13 mm'dir. Bunun sebebi delinen deliğin çap değerinin ölçülmesinin gerekmesi ve pratik nedenlerle ölçümün yapılabilmesi için derinliğin en azından 0.13 mm olmasının istenmesidir. İlk ölçümün 0.13 mm derinlikte alındığı durumda ölçülen ile teorik eğriler uyumlu bir şekilde ortaya çıkmaktadır.



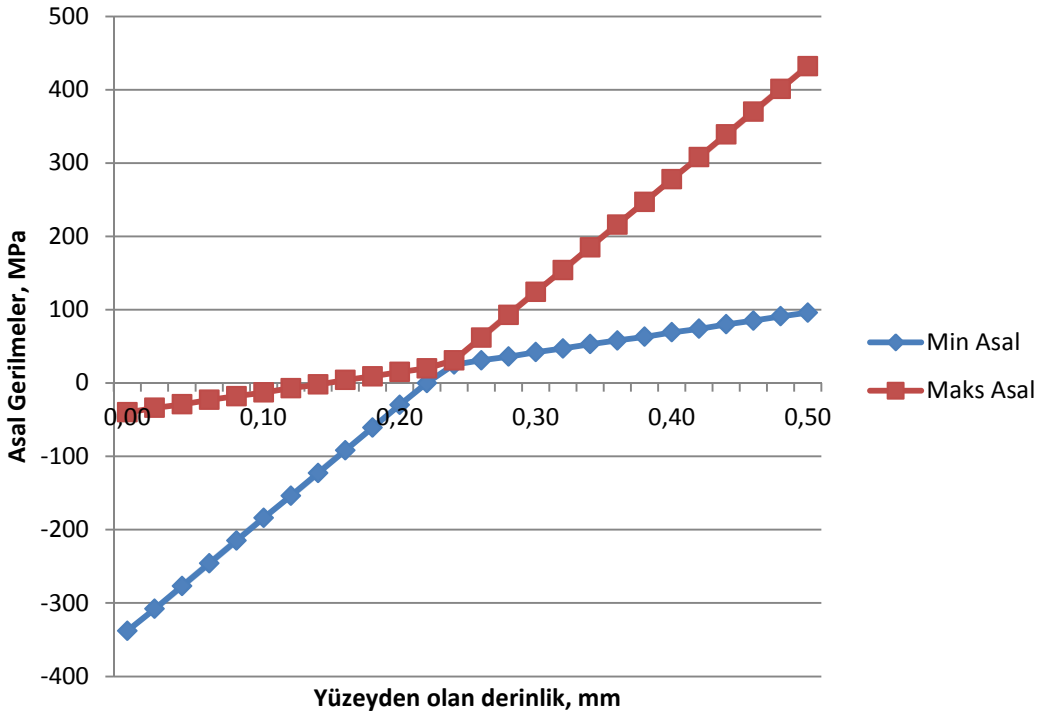
Şekil 6.20 : Ölçülen uzama değerleri ile teorik değerlerin yüzeyden olan derinliğe bağlı olarak kıyaslanması.

Çizelge 6.5'te verilen kalıntı gerilme sonuçları yüzeyden olan derinliğe bağlı olarak X ve Y gerilmeleri için Şekil 6.21'de grafik olarak verilmiştir. Grafikler üzerinde sıfır milimetre derinliği kalın camsı metal numunenin yüzeyindeki kalıntı gerilmeyi göstermektedir.



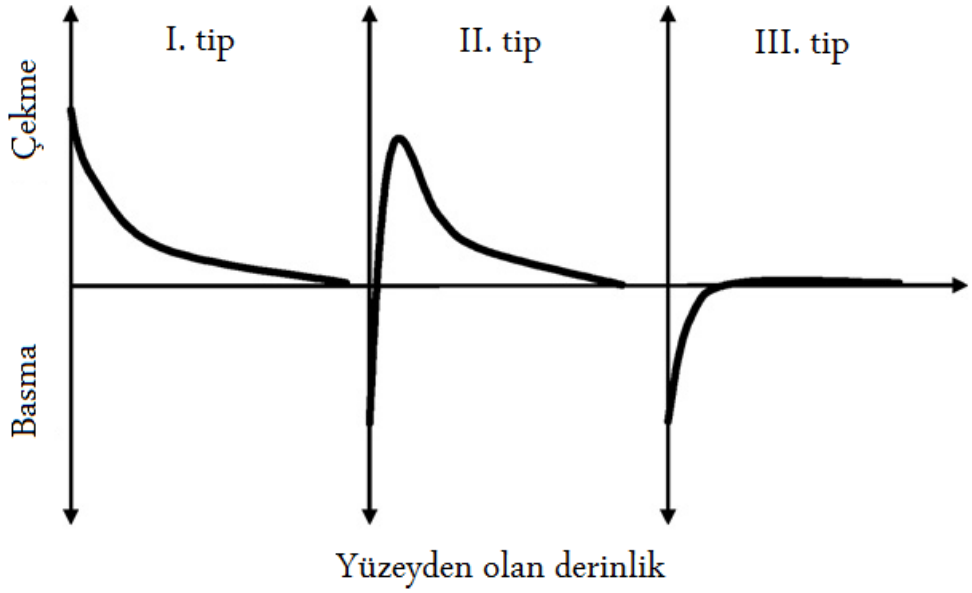
Şekil 6.21 : Yüzeyden derinliğe bağlı olarak X ve Y kalıntı gerilmeleri.

Çizelge 6.5'te verilen kalıntı gerilme sonuçları yüzeyden olan derinliğe bağlı olarak maksimum ve minimum asal gerilmeleri için Şekil 6.22'de grafik olarak verilmiştir.



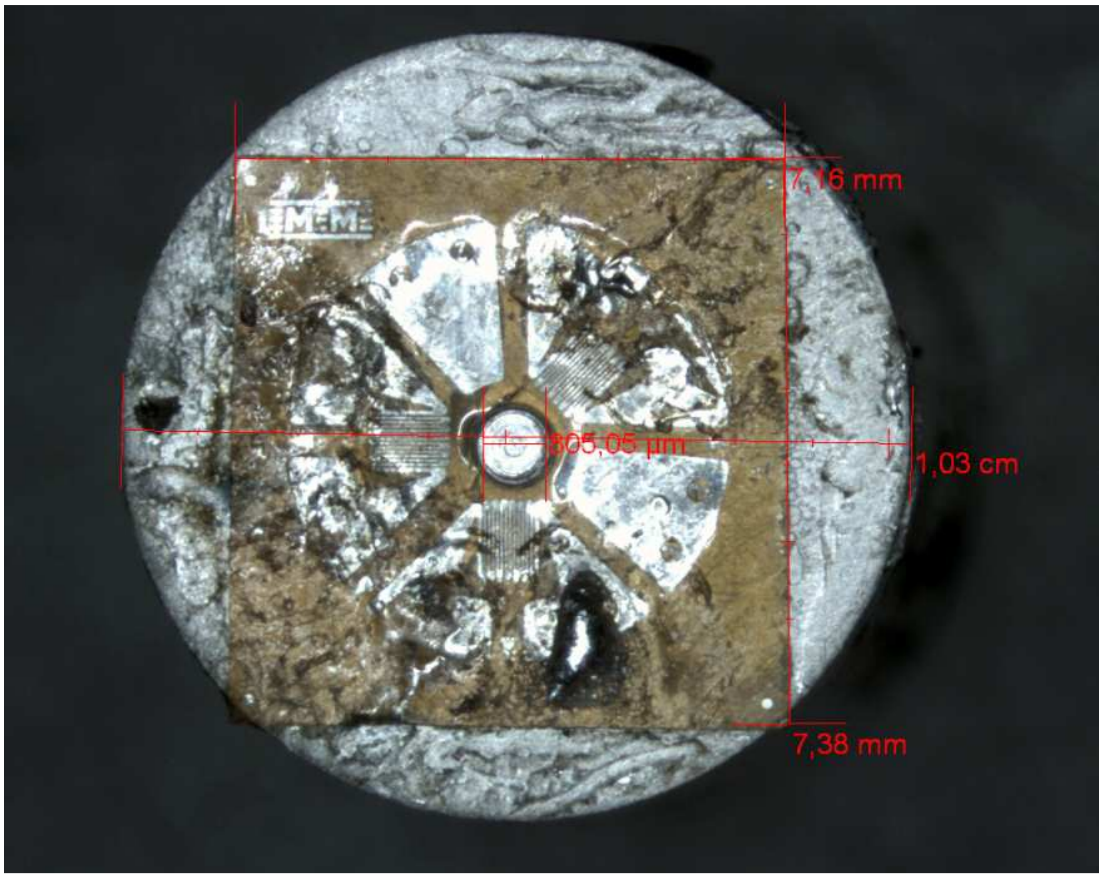
Şekil 6.22 : Yüzeyden derinliğe bağlı olarak asal kalıntı gerilmeleri.

Kalıntı gerilme sonuçları incelendiğinde yüzeyde basma kalıntı gerilmeleri görülmektedir. Derinlikle birlikte azalan basma kalıntı gerilmeleri belirli bir derinlikten sonra çekme yönüne kaymaktadır. Bunun sebebi yüzeyde alın frezelemeden kaynaklı plastik deformasyona bağlı olarak gelişen basma gerilmeleridir. Basma gerilmeleri ilerleyen derinlikle birlikte alın frezeleme sonucu oluşan ısının plastik deformasyona karşı daha baskın hale gelmesi sebebiyle çekme yönüne kaymaktadır. Yüzeyde basma gerilmesi çatlak ilerlemeleri yüzeyden başladığı için tercih edilen bir durumdur. Yüzeyden derine inildikçe yükselen çekme yönündeki kalıntı gerilmeler ise soğutma sıvısı ile frezeleme yapıldığı durumda düşmesi beklenmektedir. Parrish kaba işleme kaynaklı üç tipi gerilme olduğunu öne sürmektedir (Şekil 6.23) [61]. Birinci tip kalıntı gerilme kesme takımı ile iş parçası arasındaki sürtünmeden kaynaklı olarak ortaya çıkan yüksek sıcaklıkların yüzeyde çekme gerilmelerine sebep olması ile oluşmaktadır. Birinci tip en kötü gerilme dağılımıdır. Üçüncü tip kalıntı gerilme oldukça iyi işleme koşullarını göstermektedir. Bu işlemede sadece yüzeyde plastik deformasyona bağlı pekleşme ile oluşan mekanik etki mevcuttur. Üçüncü tip en ideal kalıntı gerilme dağılımıdır çünkü yüzeyde çatlak oluşumuna ve ilerlemesine sebep olan çekme gerilmeleri yoktur. İkinci tip kalıntı gerilmede ise çekme yönünde tepe noktası yapacak kadar ısı oluşmuş fakat plastik deformasyon yüzeyde basma gerilmelerine yol açmıştır. Bu deneysel çalışmada elde edilen sonuç Parrish'in tanımladığı gerilme dağılımlarından ikinci tip dağılıma benzemektedir.



Şekil 6.23 : İşleme gerilme dağılımı tipleri [61].

Delik delme işlemi tamamlanıp tüm uzama ölçümleri alındıktan sonra numune kablolardan ve fikstürden sökülmüştür. Numune yüzeyi mikroskop altında büyütülerek delik çapı ölçülmüştür. Şekil 6.24'te gösterilen numune yüzeyi üzerinde delik çapı 0.8 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.24 : Delik delme ardından mikroskop altında büyütülmüş numune yüzey görüntüsü.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Zr-esaslı kalın camsı metal numunenin frezelenmesi sonucu oluşan kalıntı gerilmelerin delik delme yöntemi ile ölçümü incelenmiştir. 10 mm çapındaki kalın camsı metal 600 dev/dak kesme hızı, 20 mm/dak ilerleme hızı ve 0.3 mm paso kaldırılacak şekilde alın frezelenmiştir. Kalın camsı metalin amorf yapısı sebebiyle hızlı, portatif ve yüksek doğruluklu delik delme yöntemi kalıntı gerilmelerin ölçümü için seçilmiştir. En yaygın kalıntı gerilme ölçümlerinden biri olan X-ışını kırınım yöntemi kalın camsı metal malzemenin amorf yapısı sebebiyle uygun değildir. Delik delme yöntemi ile kalın camsı metal numune üzerindeki kalıntı gerilme, numune yüzeyine delinen 0.8 mm çapındaki küçük delik ile rahatlatılmıştır. Delik çevresine delme öncesinde yerleştirilen mikro uzama ölçer ile bu gerilme rahatlaması ölçülmüştür. Kullanılan mikro uzama ölçer rozet tipinde ve ortasında delik delmeye uygun bir alan barındıran şekildedir. Uzama ölçer üzerine delinen delik uzama ölçerin tam merkezine olacak şekilde delinmesi kalıntı gerilme sonuçlarının doğruluğunu önemli şekilde etkilemektedir. Bu sebeple model RS-200 cihazında göz merceği ile hassas bir şekilde merkezleme yapılmıştır. Ancak her halukarda numunenin fikstüre sabitlenmesi, model RS-200 cihazının fikstüre sabitlenmesi ve cihaz üzerindeki ardışık işlemler sonucu meydana gelen oynamalar kaynaklı merkezleme sapması beklenmektedir. Bu etkiyi kontrol etme amaçlı ekstra bir kontrol yapılmamıştır. Literatürde merkezlemeden kaynaklı hataların tespiti konusunda çalışmalar mevcuttur.

Uzama ölçer üzerinden doğru bir şekilde okuma yapılabilmesi ve bu sebeple iyi bir yapışma gerçekleşmesi için yüzey hazırlığı önemlidir. Bunun için cihazla birlikte tedarik edilen özel kimyasallar kullanılmıştır. Uzama ölçer yapıştırıldıktan sonra kabloların lehimlenmesi konusunda özel tedbirler alınmıştır. Bunun sebebi numune boyutları sebebiyle mevcut bulunan en küçük uzama ölçerin kullanılmış olmasıdır. Lehimleme alanları çok dar olduğu için terminal kullanılmıştır. Bu sayede uzama ölçer ile terminal arasında ince kablo, terminal ile model P3 uzama indikatörü arasında ise kalın kabloların kullanımı mümkün olmuştur. Lehimleme ilgili alanların

dışına taştığı taktirde kısa devre oluşmakta ve ölçüm alınamamaktadır. Numune boyutları bu açıdan zorlayıcı bir faktör olmuştur. Daha büyük boyutlarda numuneler kullanılarak mevcut olan daha geniş uzama ölçerler ile bu tip sıkıntıların önüne geçilebilir.

Hava türbini bağlantısı ile yüksek devirlerde delme imkanı sağlanmıştır. Bu sayede delik delmeden kaynaklı ek olarak kalıntı gerilmelerin dahil olması minimize edilmiştir. Ölçümler numune yüzeyinden itibaren her 20 mikronda bir olarak alınmıştır. Bu sayede ölçüm çözünürlüğü yükseltilmeye çalışılmıştır. ASTM E-837 standardında delinen deliğin çap kontrolünün yapılması gerekmektedir. Bu sebeple ilk derinlemesine ilerleme değer için 0.13 mm tavsiye edilmektedir. Delme sürecinde delik çap kontrolü yapılmamıştır fakat ölçüm sonrası mikroskop altında ölçüm alınmıştır.

Delik delme yönteminde genellikle ölçüm derinliği delik çapı ile aynı olmaktadır. Delik çapının yarısı derinliğe gelindiğinde kalıntı gerilme kaynaklı rahatlamanın % 80 olduğu görülmektedir. Çalışmada Z/D oranı 0.4 olacak şekilde 1 mm derine kadar inilmiştir. Bu sayede kalıntı gerilmenin % 100 oranında açığa çıktığı kabul edilmektedir.

Elde edilen uzama ölçümleri ile hesaplanan gerilmeler yüzeyde -40 Mpa (maks asal) ve -338 Mpa (min asal) basma kalıntı gerilmeleri olduğunu göstermiştir. Yüzeyde basma kalıntı gerilmelerinin oluşumu frezelemeden kaynaklı plastik deformasyonun kesme takımı ile numune arasındaki sürtünmeden kaynaklı sıcaklık etkisinden daha baskın olduğunu göstermiştir. Yüzeydeki basma kalıntı gerilmeleri çatlak oluşumu ve ilerlemesine karşı oluşturacağı direnç sebebiyle pozitif etki yaratmıştır. Numune yüzeyinden derine gidildikçe 0,22 mm'den sonra basma kalıntı gerilmeleri yerini çekme kalıntı gerilmelerine bırakmıştır ve böylece malzeme içerisinde iç denge sağlanmıştır. 0.5 mm derinlikte 432 MPa (maks asal) ve 96 MPa (min asal) çekme kalıntı gerilmeleri görülmüştür. Delik delme metodu ölçüm yapılan malzemenin akma dayanımının yarısından daha az değerlerde hassas bir ölçüme imkan sağladığı için, elde edilen maksimum kalıntı gerilme değeri bakımından bu metodun uygun olduğu söylenebilir. Bu çalışmada alın frezeleme yapılırken kötü durumu değerlendirmek için soğutma sıvısı kullanılmamıştır.

Sonuç olarak, delik delme ile kalıntı gerilme ölçme metodu kalın camsı metal malzemeler üzerinde uygulanabilir olduğu görülmüştür. Alın frezelemeden kaynaklı oluşan kalıntı gerilme ölçümü için diğer yöntemlere kıyasla basit, hızlı ve nispeten düşük ekipman maliyetine sahiptir. Bu yöntem ile alın frezeleme kesme parametrelerinin kalıntı gerilmeye etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Duwez, P., Willens, R.H., and Klement Jr.,W.** (1960). Continuous series of metastable solid solutions in silver-copper alloys. *J. Appl. Phys.* 31, 1136.

[2] **Duwez, P.** (1981). Metallic glasses-historical background (Chap. 2), in *Glassy Metals I (Topics in Applied Physics, Vol. 46),* H.J. Güntherodt and H. Beck (Eds.), Springer, Berlin, p. 19.

[3] **Duwez, P.** (1967). Structure and properties of alloys rapidly quenched from the liquid state. *ASM Trans. Quart.* 60, 607.

[4] **Chen, H.S. and Turnbull, D.** (1969). Formation, stability and structure of palladium-silicon based alloy glasses. *Acta Metall*. 17, 1021.

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

[6] **Suryanarayana, C. and Inoue A.** (2010). Bulk Metallic Glasses, CRC Press, Pages 11–47.

[7] **Gleiter, H.** (1989). Nanocrystalline materials. Prog. Mater. Sci. 33, 223.

[8] **Powers, M.T., Lavernia, E.J., Groza, J.R. and Shackelford, J.F.** (2007). Materials Processing Handbook, CRC Press, Pages 17-1–17-44.

[9] **Gleiter, H.** (2000). Nanostructured materials: Basic concepts and microstructure. Acta Mater. 48, 1.

[10] **Cahn, R.W.** (1993). Background to rapidly solidification processes (Chap. 1), in Rapid Solidified Alloys, H.H. Liebermann (Ed.), Dekker Inc., New York, p. 5.

[11] **Johnson,W.L.** (1990). Metallic glasses. Metals Handbook 2, 805.

[12] **Cahn, R.W.** (1993). Background to rapidly solidification processes (Chap. 1), in Rapid Solidified Alloys, H.H. Liebermann (Ed.), Dekker Inc., New York, p. 5.

[13] **Peker, A. and Johnson, W.L.** (1993). A highly processable metallic glass—Zr41.2Ti13.8Cu12.5Ni10Be22.5. Appl. Phys. Lett. 63, 2342.

[14] **Kauzmann, W.** (1948). The nature of the glassy state and the behavior of liquids at low temperatures. Chem. Rev. 43: 219–256.

[15] **Nishiyama, N. and Inoue, A.** (2002). Glass-forming ability of Pd42.5Cu30Ni7.5P20 alloy with a low critical cooling rate of 0.067 K/s. Appl. Phys. Lett. 80: 568–570.

[16] **Inoue, A., Nishiyama, N. and Kimura, H.M.** (1997). Preparation and thermal stability of bulk amorphous Pd40Cu30Ni10P20 alloy cylinder of 72 mm in diameter. Mater. Trans., JIM 38: 179–183.

[17] **Lu, I.R., Wilde, G., Gorler, G.P. and Willnecker, R.** (1999). Thermodynamic properties of Pd-based glass-forming alloys. J. Non-Cryst. Solids 250–252: 577–581.

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

[19] **Löffler, J.F.** (2006). Recent progress in the area of bulk metallic glasses. Z. Metallkd. 97, 225.

[20] **Ashby, M.F., Butterworth-Heinemann** (1999). Materials Selection in Mechanical Design (2nd ed.).
[21] **Inoue, A.** (2000). Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys. Acta Mater. 48, 279.
[22] **Basu, J., Ranganathan, S.** (2003). Bulk metallic glasses: A new class of engineering materials Sadhana Vol. 28, Parts 3 & 4, June/August, pp. 783–798.
[23] **Nagendra N., Ramamurty U., Goh T.T., Li, Y.** (2000). Effect of crystallinity on the impact toughness of a La-based bulk metallic glass. Acta Mater. 48: 2603–2615.
[24] **Kawamura Y., Ohno Y.** (2001). Superplastic bonding of bulk metallic glasses using friction. Scr. Mater. 45: 279–285.
[25] **Youssef, H.A. and El-Hofy, H.** (2008). Chapter 3. General-Purpose Machine Tools, Machining Technology Machine Tools and Operations, CRC Press, Pages 59–156.
[26] **Nikolaos, T., Aristomenis, A.** (2012). 3-Dimensional Kinematics Simulation of Face Milling, Measurement, Elsevier.
[27] **Zheng, H.Q. et al.** (1999). International Journal of Machine Tools & Manufacture 39, 2003–2018.
[28] **António, C.A., Castro, C., Davim, J.** (2009). Optimisation of multi-pass cutting parameters in face-milling based on genetic search, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44, 1106-1115.
[29] **Lin, T.R.** (2002). Optimisation Technique for Face Milling Stainless Steel with Multiple Performance Characteristics, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 19, 330-335.
[30] **Gural A., Korkut I., Erdogan M. ve Seker U.C**. (1998). Çift fazlı çeliklerde martensit hacim oranı ve morfolojinin işlenebilirlik parametrelerinden yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi, 8.Uluslar Arası Makine Tasarımı Ve İmalat Kongresi, ODTÜ , Ankara-Türkiye [in Turkish].
[31] **Korkut, I., Donertas, M.A.** (2007). The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool–chip contact length during face milling, Materials and Design 28, 308–312.
[32] **Metal Mesleğinde Tablolar** (2003). Milli Eğitim Basımevi.
[33] **Totten, G.E. and MacKenzie, D.S.** (2005). Chapter 8. Residual Stress Measurement, Analytical Characterization of Aluminum, Steel, and Superalloys, CRC Press, Pages 429–471.
[34] **Totten, G.E. and Mackenzie, D.S.** (2003). Chapter 6. Residual Stress and Distortion, Handbook of Aluminum, Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes, CRC Press.
[35] **Chandra, U.** (1993). "Validation of Finite Element Codes for Prediction of Machining Distortions in Forgings." Commun. Num. Methods Eng., 9, pp. 463-473.
[36] **Griffiths, B.** (2001). Manufacturing Surface Technology—Surface Integrity & Functional Performance, Manufacturing Engineering Modular Series, Taylor & Francis, ISBN 1-5603-2970-X.
[37] **Masubuchi, K.** (1980). Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, New York, pp. 94-96.

[38] **Cho, D.H. and Lee, D.G.** (1998). "Manufacturing of Co-Cured Composite Aluminum Shafts, with Compression during CO-Curing Operation to reduce Residual Thermal Stresses." J. Comp. Mater., 32(12), pp. 1221-1241.

[39] **Smith, D.J., Webster, G.A. and Webster, P.J.** (1987). Measurement of Residual Stress and the Effects of Prior Deformation Using the Neutron Diffraction Technique, The Welding Institute, Cambridge, UK.

[40] **Lu, J.** (1996). Handbook of Measurement of Residual Stresses, The Fairmont Press, Lilburn, GA.

[41] **Merchant, M.E.** (1999). Evolution of the modeling of machining in the 20th century—an interpretive look at American contributors, in: Third International Conference on Industrial Tooling, pp. 1–7.

[42] **Park, Y.W., Cohen, P.H. and Ruud, C.O.** (1994). The development of a model for plastic deformation in machined surface, Mat. and Manuf. Processes, Vol. 8, No. 5.

[43] **Ghanem, F., Dishom, H., Braham, C., Fatallak, R. and Leider, J.** (1997). An engineering approach to the residual stresses due to electric-discharge machining process, Proc. The Fifth International Conference on Residual Stresses, Vol. 1, 157–163, Ed. by Ericson, Oden and Anderson, ICRS-5, Institute of Technology, Linkopings University, Sweden.

[44] **Zhang, B., Albertinazzi, M., Scotti, F., Sarietto, G., Garro, M.** (2005). Tensile Properties and Residual Stresses of a Diesel Cylinder Head in GAS9C1 Alloy, SAE World Congress.

[45] **Koch, G.H.** (2001). Tests for stress-corrosion cracking, Adv. Mat. & Proc., 36–38, Aug.

[46] **Mathar, J.** (1934). Determination of initial stresses by measuring deformation around drilled holes, Arch. Eisenhuttenwesen, 6, 277–281 and Trans. ASME 56(4), 249–254.

[47] **ASTM** (1983). Determining residual stresses by the hole drilling strain-gage method, ASTM E837, American Society for Testing Materials, Philadelphia, PA.

[48] **Kelsey, R.A.** (1956). Measuring non-uniform residual stresses by the hole drilling method, Proc. Soc. Exp. Stress Anal., 14(1), 181–184.

[49] **Bush, J. and Kromer, F.J.** (1973). Simplification of the hole-drilling method of residual stress measurement, ISA Transactions, 12(3), 249–259.

[50] **Prevey, P.S.** (1986). Residual stress distribution produced by strain gage surface preparations, SEM Conference on Exp. Mech.

[51] **Kokubo, S.** (1932). Changes in hardness of a plate caused by bending, Science Reports of the Tohoku Imperial University, Japan, Series 1, 21, 256–267.

[52] **Sines, G. and Carlson, R.** (1952). Hardness measurements for the determination of residual stresses, ASTM Bulletin, No. 180, 35–37, Feb.

[53] **Bolstad, D.A., Davis, R.A., Quist, W.E. and Roberts, E.C.** (1963). Measuring stress in steel parts by x-ray diffraction, Metals Progress, 88–92.

[54] **Prevéy, P.S.** (1986). "X-ray Diffraction Residual Stress Techniques," Metals Handbook. 10. Metals Park: American Society for Metals, 380-392.

[55] **Ruud, C.O., DiMascio, P.S. and Snoha, D.J.** (1984). A miniature instrument for residual stress measurement, Adv. in X-ray Anal., Vol. 27, 273–283, Plenum Press.
[56] **Youtsos, A., Ohms, C.** (2002). NDT Based on Neutron Techniques in Support of Structural Integrity Assessment, NDT.net, Vol.7 No.08, August.
[57] **Yelbay, H.İ.** (2008). Tahribatsız Yöntemlerle Kalıntı Gerilim Ölçümündeki Gelişmeler, 3rd International Non-Destructive Testing Symposium and Exhibition, Istanbul Turkey, April.
[58] **Gori, M., Certo, M., Patelli, G., Aruta, L.** (1998). Ultrasonic Assessment Of Residual Stresses In The Rim Of Railway Solid Wheels, NDT.net, Vol.3 No.7, June.
[59] **Nakşiler, V.** (2007). Machinibility of Zirkonium Based Bulk Metallic Glass on Drilling & Milling, ITU Master Thesis, December.
[60] **Vishay Micro-Measurements** (2007). Tech Note TN-503-6.
[61] **Parrish, G.** (1997). Influence of microstructure on properties of case-carburised components. Heat Treta. Met. 4 (2), 45–54.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Emre ÜNLÜ

Doğum Yeri ve Tarihi: Eskişehir / 23.07.1985

Adres: Gökmeydan mah. Ulus cad. No : 59/6 Eskişehir

E-Posta: emreunlu85@gmail.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği