Dicle University
Journal of Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/dumf
duje.dicle.edu.tr

Derleme Makalesi/Review Article

İnceleme: Döküm Alüminyum Alaşımlarında Kalıntı Gerilme Ölçüm Yöntemleri, Nedenleri ve Önleme Çalışmaları

Review: Residual Stress Measurement Methods, Reasons and Prevention Studies in Aluminium Cast Alloys

Onur Özaydın[1*], Aytaç Gören[1], Esra Dokumacı Alkan[2], Gökçe Mehmet Gencer[1]

[1] Dokuz Eylül Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, onur.ozaydin@ogr.deu.edu.tr ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6395-7553, aytac.goren@deu.edu.tr ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7954-1816 , mehmet.gencer@deu.edu.tr ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1084-7240

[2] Dokuz Eylül Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, esra.dokumaci@deu.edu.tr ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3886-3963

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 13 Mayıs 2025
Revizyon 25 Kasım 2025
Kabul 10 Aralık 2025
Online 30 Aralık 2025

Anahtar Kelimeler:

Döküm Alüminyum Alaşımları, Kalıntı Gerilme, Tahribatlı ve Tahribatsız Ölçüm Yöntemleri.

ÖZ

Bu çalışma, döküm alüminyum alaşımlarında üretim sürecinde ortaya çıkan kalıntı gerilmelerin nedenlerini, ölçüm yöntemlerini ve önleme stratejilerini incelemektedir. Kalıntı gerilmeler; ısıl işlem, talaşlı imalat, kaynak gibi işlemlerden sonra, dış yük olmadan malzeme içinde oluşan elastik gerilmelerdir. Bu gerilmeler, parçanın yorulma ömrünü, mekanik performansını ve boyutsal doğruluğunu doğrudan etkiler. Özellikle T6 gibi ısıl işlem süreçlerinde, su verme sırasında meydana gelen ani sıcaklık değişimleri ciddi kalıntı gerilmeler yaratabilir. Çalışmada delik delme, halka çekirdek ve kontur gibi tahribatlı; X-ışını kırınımı, ultrasonik ve nötron kırınımı gibi tahribatsız yöntemler detaylı şekilde incelenmiş, bunların avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, sonlu elemanlar analizleriyle yapılan analitik ölçüm yöntemlerine de yer verilmiştir. Yorulma ömrü açısından, çeki kalıntı gerilmeleri zararlı olurken, bası gerilmeleri ömrü artırabilir. Bu nedenle kalıntı gerilmelerin ölçümü kadar kontrolü de önemlidir. Gerilme giderme tavlaması, düşük sıcaklıkta yaşlandırma ve yüzey işlemleri gibi yöntemlerle bu gerilmeler azaltılabilir. Sonuç olarak, kalıntı gerilmelerin dikkatli yönetimi, daha dayanıklı ve güvenilir mühendislik parçaları üretimini mümkün kılar.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 May 2025
Received in revised form 25 November 2025
Accepted 10 December 2025
Available online 30 December 2025

Keywords:

Cast Aluminum Alloys, Residual Stress, Destructive and Non-Destructive Measurement Methods.

ABSTRACT

This study investigates the causes, measurement methods, and prevention strategies of residual stresses occurring in cast aluminum alloys during the manufacturing process. Residual stresses are elastic internal stresses that form in materials without any external load, typically due to processes like heat treatment, machining, or welding. These stresses directly affect the fatigue life, mechanical performance, and dimensional accuracy of components. In particular, sudden temperature changes during solution treatment and quenching in T6 heat treatment processes can lead to significant residual stresses. The study provides a detailed comparison of destructive methods (e.g., hole-drilling, ring-core, contour methods), non-destructive techniques (e.g., X-ray diffraction, ultrasonic testing, neutron diffraction), and analytical approaches using finite element modeling. The strengths and limitations of each method are discussed. In terms of fatigue performance, tensile residual stresses can be detrimental, while compressive stresses can enhance service life. Thus, accurate measurement and effective control of these stresses are crucial. Techniques such as stress relief annealing, low-temperature aging, and mechanical surface treatments are highlighted as effective in reducing residual stress. In conclusion, managing residual stresses carefully is essential for producing more durable and reliable engineering components.

Doi: 10.24012/dumf.1697102

* Sorumlu Yazar

Giriş

Üretim teknolojilerinin gelişmesiyle daha çok önem kazanan verim artışı, enerji tasarrufu ve maliyet düşürücü faaliyetlerin önemi ortaya çıkmaktadır. Bu faaliyetler kapsamında, yüksek üretim adetleri ve hızlı üretim adımları gerekmektedir. Şüphesiz bu üretim adımları farklı teknik sorunları da beraberinde getirmektedir. Örneğin, artan üretim adetleri sebebiyle ürün başına düşen çevrim süresinin giderek azaltılması hedeflenmekte ve eş zamanlı olarak ürünün performansında herhangi bir düşme olmadan, bilakis ürün performansı arttırma amaçlı farklı imalat prosesleri ve ısıl işlem uygulamaları uygulanabilmektedir.

Kalıntı gerilmeler, farklı imalat prosesleri ve/veya ısıl işlem uygulamaları sonrası yapıda homojen olmayan şekilde oluşan elastik gerilmeler olarak tanımlanabilir. Farklı kaynaklarda, hapsedilmiş (trapped stresses) ya da kilitli (locked stresses) gerilmeler olarak da ifade edilmektedir [1]. Kalıntı gerilmelerin oluşmasında farklı imalat prosesleri mekanik ve termal kökenli sebepler olarak sınıflandırılabilir. Mekanik kökenli etkiler, farklı imalat prosesleri olarak; işleme prosesi, katmanlı imalat ve kaynak prosesi olarak listelenmektedir. Termal kökenli etkiler, ısıl işlem uygulamaları ve termal çevrimler olarak tanımlanmaktadır. Kalıntı gerilmeleri, diğer gerilmelerden ayıran en önemli özellikleri, herhangi bir dış yük (Mekanik ya da termal yükler) olmadan da yapıda var olmalarıdır [1-5]. Esasen, kalıntı gerilmelerin doğrudan ölçümü mümkün olmamakla birlikte, dolaylı olarak şekil değiştirme (deformasyon) değerleri ölçümüyle belirlenebilir.

Kalıntı gerilmelerin büyüklüğünün doğru bir şekilde belirlenmesi, bileşenlerin mekanik performansının anlaşılması için çok önemlidir [4]. Kalıntı gerilmeler, ürün performansını direkt olarak etkileyen mikroyapı, mekanik performans, hata tipleri ve yapısal bütünlük (structural integrity) arasındaki ilişkilerin anlaşılması için de kritik rol oynamaktadır [1]. Endüstriyel uygulamalarda, ilgili parçanın çekme ya da basma yükleri altında çalışması durumuna göre, yapıdaki kalıntı gerilmeler yapının bütünlüğünün bozulması, mikroyapıdaki çatlakların ilerlemesi gibi riskler oluşturabilir [6-7]. Ayrıca, parça içinde kalan kalıntı gerilmenin de çeki ya da bası kalıntı gerilmesi olması durumu da parçaya uygulanacak gerilmelerin gerçek yükleme altında hesaplanandan farklı şekilde ortaya çıkmasına sebep olabilir. Örneğin, yapıdaki çeki kalıntı gerilmeleri, yorulma şartları altında çalışan parçanın servis ömrünü azaltarak yorulma hasarlarına sebep olabilirken, yapıdaki bası kalıntı gerilmeleri ise yine aynı yorulma şartları altında çalışan parçanın servis ömrünü arttırabilir. Ek olarak, aynı parçanın tasarımına ve imalat sürecine göre bir bölgesinde çeki kalıntı gerilmeleri görülürken, diğer bölgesinde bası kalıntı gerilmeleri meydana gelebilir. Bu sebeple, kalıntı gerilmelerin kesin ve doğru (accurate) ölçümü büyük önem kazanmaktadır. Bu ölçüm, parçanın tasarımında, üretim ve ısıl işlem parametrelerinin belirlenmesinde etkilidir. Ayrıca kalıntı gerilmeler, parçanın boyutsal doğruluğunu da etkileyebileceğinden, endüstriyel uygulamalarda ölçümü önemli bir adım haline gelmektedir.

Kalıntı gerilme ölçümleri, endüstride kullanılan metalik, seramik ve kompozit malzemelere uygulanabilir [8-9]. Kalıntı gerilme ölçümleri malzeme türlerine göre en büyük oranda metalik malzemelere uygulanırken, onu metal matrisli kompozitler (MMC: Metal Matrix Composite), seramik ve polimer malzemeler takip etmektedir [10]. Ek olarak, sektöre göre de Ar-Ge ve akademik çalışmalar, havacılık, enerji-güç üretimi ve otomotiv endüstrisinde geniş uygulama alanı bulmaktadır. Sektör uygulamalarında; otomotiv motor pistonları, motor silindir blokları – kapakları, süspansiyon parçaları örnek olarak verilebilir [11].

Çalışmada, farklı imalat prosesleri nedeniyle kalıntı gerilimlerin tasarlanan parça yapısında sıklıkla oluştuğu alüminyum alaşımdan üretilen döküm parçalar ve diğer mühendislik malzemeleri incelenmiştir. Buna ilaveten, metalik alaşımlarda oluşan kalıntı gerilimlerin ölçüm yöntemleri, neden oluştukları ve malzemeye etkileri ile bu gerilimlerin üretilen mühendislik parçaları içindeki önleme çareleri de araştırılmıştır.

Alüminyum Döküm Alaşımları

Temelde makro ve mikro seviyede incelenebilen kalıntı gerilmeler için üç farklı stres seviyesi tanımlanmıştır; bu stres tiplerinin ilki Tip 1 olarak adlandırılan, makro seviyede üretim prosesi esnasında malzeme tane boyutundan daha büyük ölçekte oluşan gerilmelerdir. İkincisi, Tip 2 olarak adlandırılan, mikro seviyede üretim prosesi esnasında tane boyutunda oluşan mikro kalıntı gerilmelerdir. Sonuncusu ise Tip 3 olarak adlandırılan, mikro seviyede tane içinde yer alan kristal kusurlarından oluşan mikro kalıntı gerilmelerdir [1].

Kalıntı gerilmeler, farklı imalat ve kaynak uygulamaları sebepli oluşması yanında, alüminyum döküm parçaları için kalıntı gerilmelerin önemli bir miktarının ısıl işlem sürecinde oluştuğu not edilmiştir [1]. Çözeltiye alma – su verme – yapay yaşlandırma adımlarının olduğu (T6 gibi) ısıl işlem süreçlerinde, özellikle çözeltiye alma ile su verme adımları arasındaki gibi çok kısa zamanda yüksek sıcaklık farkı oluşan adımlarda yapı içinde kalıntı gerilmeler oluşabilir. Yapıdaki bu kalıntı gerilmeler Tip 1 olarak adlandırılan makroskobik seviyede oluşabilir [1].

Diğer Malzemeler

Önceden bildirildiği gibi, bu çalışmada döküm alüminyum alaşımları için yapılan kalıntı gerilme ölçümü işlemleri detaylandırılacaktır. Metal dışı malzemelerdeki en yüksek kullanım oranı, metal matrisli kompozitler (MMC: Metal Matrix Composite), polimerler ve polimer matrisli kompozitler (PMC: Polymer Matrix Composite), seramikler ve seramik matrisli kompozitlerdir (CMC: Ceramic Matrix Composite) [10]. Alüminyum dökme alaşımlarına benzer şekilde, kompozit yapılar için de farklı stres tipleri tanımlanmıştır; Tip 1 tabaka (laminate) kalınlığı boyunca yapıdaki değişim sebepli oluşan kalıntı gerilmelerdir. Tip 2 ise anizotropik farklılıklardan (farklı yönlerdeki dış etkilere farklı özellik gösteren yapılar) dolayı oluşan makro

seviyedeki kalıntı gerilmelerdir. Son olarak, Tip 3 ise matris aralarında oluşan mikro seviyedeki kalıntı gerilmelerdir [1].

Daha önce tamamlanmış çalışmalar kalıntı gerilmelerin farklı mühendislik yapılarının performanslarına etki edebileceği ve değiştirebileceğini göstermiştir [10-11]. Endüstriyel uygulamalarda ilgili çalışma ya da test şartları altında çalışan parça, yapı içindeki kalıntı gerilmenin oluştuğu bölge ve tipine göre, beklenenden daha kısa sürede hasara uğrayabilir. Diğer taraftan, bu durumun tam aksine çalışma ve test şartlarına göre yapıda farklı yönde oluşturulabilecek kalıntı gerilmeler parça ömrünü arttırabilir. Bu durum, kalıntı gerilme ölçümünün önemini bir kez daha göstermiştir.

Ölçüm Yöntemleri

Literatürdeki çalışmalara göre kalıntı gerilimlerin ölçüm yöntemleri deneysel ve analitik yöntemler olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Deneysel yöntemler, "tahribatlı (destructive)", "yarı-tahribatlı (semi-destructive)" ve "tahribatsız (non-destructive)" başlıkları altında incelenebildiği gibi [1], bazı çalışmalara göre, yarı-tahribatlı örnekler tahribatlı örnekler içinde de incelenebilmektedir. [3-10-12-13]. Bu sınıflandırmalar içerikleri bakımından yakın oldukları ve her iki yaklaşımda da benzer sonuçların elde edileceği öngörüldüğü için, çalışmada tüm ölçüm yöntemleri; tahribatlı deneysel teknikler, tahribatsız deneysel teknikler ve analitik teknikler olarak sınıflandırılmıştır.

Sınıflandırılan yöntemleri içerdikleri teknikler açısından, delik delme (hole-drilling) yöntemi, halka çekirdek (ring-core) yöntemi, derin delik delme (deep hole drilling) yöntemi, kontur-kesit profili (contour) yöntemi, katman kaldırma (layer removal / curvature) yöntemi ve kesit alma (sectioning) yöntemi gibi tahribatlı deneysel teknikler; X-ışını kırınımı (XRD: X-Ray diffraction) yöntemi, ultrasonik (ultrasonic) yöntem, nötron kırınımı (neutron diffraction) yöntemi ve manyetik (magnetic) yöntem gibi tahribatsız deneysel teknikler ve analitik ve sonlu elemanlar modelleri ile kalıntı gerilme ölçümünü içeren yöntemler analitik (analytical) teknikler olarak incelenmektedir [14].

Tahribatsız yöntemler, diğer yöntemlere kıyasla daha kesin (accurate) sonuçlar vermesine rağmen daha pahalılardır [1]. Bu sebeple, endüstriyel uygulamalarda nispeten daha uygun fiyatlı ve yüksek teknoloji gerektirmeyen ölçüm cihazlarıyla yerinde ölçüm imkânı sunan tahribatlı ölçüm yöntemleri avantajlı hale gelmektedir.

Kandil ve ekibi yayınladığı raporda, Birleşik Krallık'taki endüstriyel kurumların kalıntı gerilmelerin belirlenmesinde kullandığı yöntemleri kullanım oranlarına göre listelenmiştir, %30 oran ile en çok kullanılan yöntemin delik delme yöntemi olduğu belirtilmiştir. Delik delme yöntemini, %26 oranla X-ışını kırınımı yöntemi izlemektedir. Bu iki yöntem sırasıyla tahribatlı ve tahribatsız ölçüm yöntemlerinin en çok tercih edilen örnekleri olmuştur. Bu iki yöntemi ise sırasıyla, nötron kırınımı (%19), katman kaldırma (%16) ve manyetik ve ultrasonik gibi diğer yöntemler (%9) izlemektedir [10]. Bu değerler her ne kadar Birleşik Krallık'taki endüstriyel kurumları örnek gösterse de diğer endüstri alanları için de fikir verici olabilir.

Tahribatlı Deneysel Teknikler

Prensip olarak, iş parçasının gerilmeleri farklı yaklaşımlarla serbest bırakılır ve ölçülür. Bölgenin şekil değiştirmesi veya yer değiştirmesi ölçülerek, elastik mekanik prensiplerine göre kalıntı gerilme durumu belirlenebilir [12]. Tahribatlı teknikler, numunelerde hasara sebep oldukları için ilk aşamada daha az çekici görünseler de çok yönlü kullanımı (versatility) ve güvenilirlikleri (reliability) ile iyi bir tercih olarak öne çıkarlar [16]. Tahribatlı ve yarı-tahribatlı teknikler, genellikle maliyet etkin (cost-effective) ve yüksek teknoloji gerektirmeyen yöntemler olarak bilinir [15]. Tahribatlı ölçüm yöntemlerinde, test edilen parçadaki tahribat, kademeli olarak malzeme kaldırılarak oluşan deformasyonlar, gerinim ölçer (straingage) ya da Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC: Digital Image Correlation) gibi optik yöntemler kullanılarak belirlenebilir [1].

Mekanik uygulama teknikleri, gerilme gevşemesi (stress-relaxing) yöntemleri olarak da bilinir ve metal parçadan alınan malzemenin oluşturduğu gevşeme (relaxation) miktarının analizi temeline dayanır. Mekanik uygulama öncesi ve sonrası karşılaştırılarak parçadaki kalıntı gerilmeler analiz edilir [14].

Tahribatlı teknikler, mekanik gevşeme (mechanical relaxation) ölçümleri ile uygulandığında, aynı parça üzerinde tekrarlanamaz ve birçok parça gerektirir [1].

Delik Delme (Hole-drilling) Yöntemi

Delik delme (hole-drilling) yöntemi farklı kaynaklarda "merkezi ya da kör delik delme (central or blind hole drilling)" [17] ve "artımlı ya da derin delik delme (incremental or deep hole drilling)" [18] yöntemi olarak da bilinmektedir.

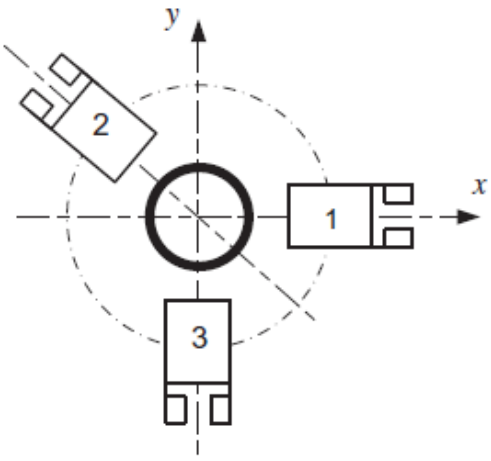
Delik delme yöntemi, basit ve hızlı bir yöntem olması sebebiyle, en çok tercih edilen tahribatlı ölçüm yöntemidir. Rossini ve arkadaşları, bu yöntemi ölçüm için açılan deliklerin küçük (Yaklaşık 1,8 mm çapında ve en fazla yaklaşık 2,0 mm derinliğinde) ve tamir edilebilir boyutlarda olması sebebiyle, farklı kaynaklarda yarı-tahribatlı yöntemler altında da listelemiştir. En önemli avantajı, kesinlik (accuracy), güvenilirlik (reliability), standardize edilmiş test prosedürleri ve uygulamadaki kolaylık olarak gösterilebilir [14]. Bu etkili yöntem, ilk olarak 1934 yılında Alman bilim insanı Mather tarafından önerilmiştir. Zamanla iyi bir şekilde yerleşmiş ve kabul görmüş, 2015 yılında Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) tarafından bir standart test prosedürü olarak yayımlanmıştır [13]. Test metodu 1981'de tanıtılarak ASTM Standard Test Metodu E837 ile standardize edilmiştir. Bu yöntem, temelde tüm parçayı etkileyecek kadar derin olmayan, sınırlı bir alanda uygulandığı için endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir [1,19,20]. Bu yöntem endüstride daha çok metalik malzemelere uygulanırken, Magnier ve arkadaşları çalışmalarında plastik

malzemeler için [19]; Wu ve arkadaşları ise metal-karbon fiber ile güçlendirilmiş plastikler gibi hibrid malzemelerde delik delme yöntemini kullanmışlardır [20].

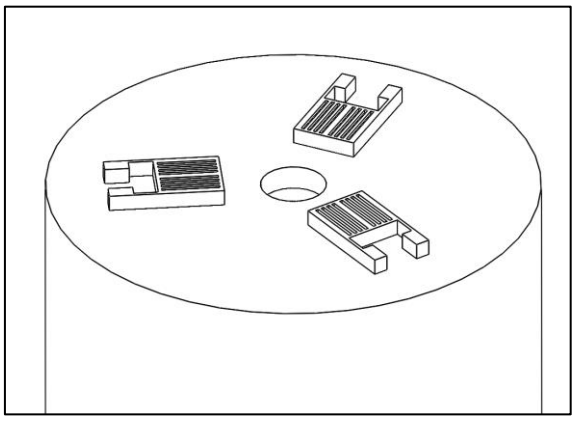
Bu yöntemde potansiyel hataları, özellikle delme işlemi sırasında oluşan gerilme etkilerini göz önünde bulundurmak önemlidir. M. T. Flaman, bu etkilerin, özellikle düşük hızla delme işleminde, ölçülen toplam gerilmelere önemli ölçüde katkıda bulunabileceğini bulmuştur. Sonuç olarak, delik delme yönteminde üstün performansı nedeniyle ultra yüksek hızlı bir matkap (20.000 devir/dakikadan, 400.000 devir/dakikaya) kullanımı tercih edilir. [13,21]. Scafidi ve arkadaşları, başlıca hata kaynaklarının analizinde, eksantrikliğin (eccentricity) en büyük etkenlerden biri olduğunu vurgulamıştır. Tipik deneysel koşullar altında, yalnızca eksantriklikten kaynaklanan hatalar %10'u aşabilmektedir. Ancak, ölçüm doğruluğunu etkileyen en kritik faktörün, operatörün yeteneği olduğu muhtemeldir [22,23].

Literatürdeki farklı çalışmaların temel alındığı bir başka standartta (ASTM E837-20 Delik Delme Gerinim Ölçer Yöntemi ile Kalıntı Gerilmelerin Belirlenmesi için Standart Test Yöntemi; ASTM E837-20 Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method) delik delme yönteminin gereklikleri standart şekilde paylaşılmıştır. En yaygın delme tekniği, en sert malzemeler hariç tümü için uygun olup, 20.000 ila 400.000 devir/dakika hızında dönen yüksek hızlı bir hava türbini veya elektrik motoru ile çalışan karbür frezeler veya uç frezelerin kullanılmasını içerir [24].

Delik çevresinde ölçülen gerilmelerden, uygun kalibrasyon sabitleri kullanılarak kalıntı gerilmeler hesaplanır. Bu sabitler, kullanılan gerinim ölçer rozetinin türüne ve beklenen gerilme türüne en uygun analiz prosedürüne dayanır [10]. Şekil 1, şematik olarak gerinim ölçer (straingage) rozetlerini göstermektedir. Şekil 1'deki merkezi daire delme yapılacak alanı, pozitif x yönü gerinim ölçer 1'in ekseni boyunca, negatif y yönü ise gerinim ölçer 3'ün ekseni boyunca uzanır (Şekil 2). Bu işlem sonucunda oluşan serbest bırakılmış deformasyonlar, üç gerinim ölçer tarafından kaydedilir [2].



Şekil 1. Bir rozetin tipik geometrisi. [2]



Şekil 2. Delik Delme yöntemi şematik gösterimi.

Elastik değerler için gerilme-gerinim (Stress-strain) ilişkisine dayalı Eşitlik (1) kullanılırken, düzlem gerilme durumundaki kalıntı asal gerilmenin büyüklük ve yönü için ise Eşitlik (2) kullanılır. Gerinim serbest bırakma (Strain relase) katsayıları A ve B, doğruluğu etkileyen en kritik faktörlerden biridir ve tam delik yöntemiyle doğrudan Kirsch teorisi kullanılarak hesaplanabilir [12]. A ve B Gerinim serbest bırakma (strain release) katsayıları, Eşitlik (3)'te gösterilmiştir. Burada ν, a ve r sırasıyla Poisson oranını, deliğin yarıçapını ve strain (gerinim) ölçüm cihazının deliğin merkezine olan mesafesini temsil etmektedir [13]. Buna karşın, kör delik yöntemi için kalibrasyon deneyleri gereklidir [12].

$$\varepsilon = A(\sigma 1 + \sigma 2) + B(\sigma 1 - \sigma 2)\cos 2\theta \tag{1}$$

$$\sigma_{1,2} = (1/4A)(\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}) \pm (\sqrt{2}/4B)\sqrt{((\varepsilon_0 - \varepsilon_{135})^2 + (\varepsilon_{90} - \varepsilon_{135})^2)}$$

$$\tan 2\theta = (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90} - 2\varepsilon_{135}) / (\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}) \tag{2}$$

$$A = -(1 + \nu)/2 \times (a^2 / r^2)$$

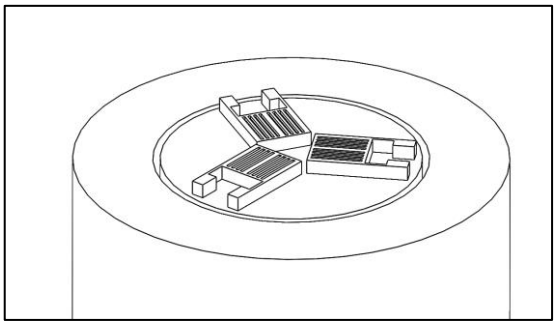
$$B = (1/2) \times [\, 3(1 + \nu) \times (a^4 / r^4) - (4a^2 / r^2) \,] \tag{3}$$

Eşitlik (1) ve (2)'de, ε, ε_0, ε_{90} ve ε_{135} radyal gerilmeleri; σ1 ve σ2 ana (principal) gerilmeleri; θ, 0° gerinim (strain) ölçüm cihazı ile ilk başlıca gerilme yönü arasındaki açıyı, E, elastisite modülünü (Young modülü) temsil etmektedir [12,13].

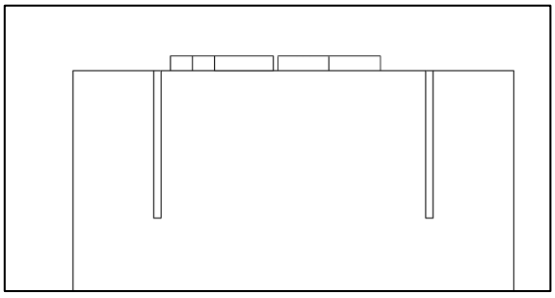
Li ve arkadaşlarına göre, ölçümlerdeki tüm bu gelişmeler, delik delme tekniğinde önemli kolaylıklar ve iyileştirmeler sağlamıştır. Ancak gerinim ölçerlerin bazı sınırlamaları bulunmaktadır; bu sınırlamalar arasında zaman alıcı bir kurulum, sınırlı ölçüm noktaları ve delik delme yönteminde rozet içindeki deliğin yerleştirilmesindeki küçük sapmalardan kaynaklanan doğruluk problemleri yer almaktadır. Optik

yöntemler bu adımda umut vadedici alternatifler sunmuştur. Ayrıca, optik tekniklerin temassız yapısı, gerinim ölçerler ve diğer ölçüm cihazlarının zahmetli kurulumunu gereksiz kılar [13]. Numunenin yüzeyinde küçük bir delik açmayı ve geleneksel olarak gerinim ölçerler ve daha yakın zamanda Moiré interferometresi (Moiré interferometry), Elektronik Nokta Deseni İnterferometrisi (ESPI: Electronic Speckle Pattern Interferometry) ve Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC: Digital Image Correlation) gibi tam alan optik teknikleri kullanarak çevreleyen yüzeyin deformasyonlarını ölçmeyi içerir. Delik delme yöntemi, birçok numune türünde güvenilir ve hızlı sonuçlar verebildiği ve yalnızca lokalize ve genellikle tolere edilebilir hasar yarattığı için yaygın olarak kullanılmaktadır [15].

Kim ve Jung, ESPI'yi Dijital Nokta Desen İnterferometrisi (DSPI: Digital speckle pattern interferometry) olarak da adlandırır ve yöntem örnek üzerindeki bir bölgenin tutarlı ışıkla aydınlatılmasını içerir. Bir ışın ayırıcı, lazer kaynağından çıkan ışını iki simetrik ışına böler; bu ışınlar, çoklu aynalar tarafından yansıtılır ve lensler aracılığıyla dağıtılır [25]. Cao ve ekibi ise Moiré interferometrisini örnek yüzeyine yerleştirilen veya üzerinde üretilen ince çizgilerden oluşan bir kırınım ızgarası kullanarak girişim oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Elde edilen "sanal ızgaralar", örnek yüzeyinin gerinim bilgilerini taşır [26]. Yoon ve arkadaşları ise DIC'nin temel prensibini, referans görüntü ile farklı yük seviyeleri altındaki şekil değiştirmiş görüntüler arasında görüntü korelasyonları kurmayı içerdiğini söyleyerek açıklamışlardır [27].



Şekil 3. Halka çekirdeği yöntemi şematik gösterimi.



Şekil 4. Halka çekirdeği yöntemi şematik kesit gösterimi.

Halka çekirdeği yöntemi (Şekil 3 ve 4), delik delme yönteminin bir varyasyonu olarak değerlendirilebilir. Delik delme yönteminde, gerinim ölçerin tam merkezine bir delik açılırken, halka çekirdeği yönteminde gerinim ölçerin çevresinde bir halka oluşturulur. Bu süreçte ortaya çıkan şekil değişimleri ölçülerek kalıntı gerilmeler hesaplanır. Halka çekirdeği yönteminin, delik delme yöntemine kıyasla, daha büyük şekil değişimlerini tespit edebilmesi ve bu sayede daha yüksek kalıntı gerilmeleri ölçme imkânı sağlaması önemli bir avantajdır. Ancak, bu yöntem ölçüm yapılan malzemede daha fazla hasara yol açması ve uygulama zorlukları nedeniyle delik delme yöntemine oranla daha az tercih edilmektedir. Halka çekirdeği yöntemi, malzemenin belirli bir derinliği boyunca kalıntı gerilmeleri ölçmeye olanak tanıyan tahribatlı bir yöntemdir. Malzemeden talaş kaldırıldığında, içindeki kalıntı gerilmeler serbest kalır ve bu değişiklikler ölçülür. Delik delme işlemi sırasında oluşan gerinim değişimleri, bilgisayar tarafından derinlik boyunca kaydedilir. Daha sonra bu veriler kullanılarak kalıntı gerilmeler hesaplanır. Halka çekirdeği yöntemi, elastik teorinin geçerli olduğu metaller, seramikler ve polimerler gibi çeşitli malzemelerde uygulanabilir [28].

Baldi, halka çekirdek yönteminin prensip olarak yeniden başlatılabilir olması sebebiyle (çekirdeğin çıkarılıp gerinim ölçer rozetinin yeniden takılmasıyla) bu avantaja sahip nadir bir yöntem olduğundan bahsetmiştir. Bu özelliği sayesinde, diğer yöntemlere kıyasla kalıntı gerilmenin çok daha derinlerde ölçebildiği ve gerinim ölçümünde yöntemin daha hassas olduğunu bildirmiştir. Fakat, bu ilgi çekici fikrin pratik olarak uygulanmasının çok zor olduğunu fark ederek, özellikle derinlik arttıkça gerinim ölçer (strain gauge) rozetlerinin yeniden takılıp kablolamasının deneysel olarak zorluğunu ortaya koyarak, optik bir ölçüm yolu tercih edilmesini önermiştir [38].

Maslákova ve arkadaşları, halka çekirdek yöntemi kullanılarak kalıntı gerilmelerin belirlenmesi için gerinim ölçer (strain gauge) uygulaması çalışmalarında tüm gereklilikleri adım adım açıkladıktan sonra, yöntemin dezavantajları arasında, delik delme yöntemine kıyasla daha hassas/duyarlı olduğunu not etmişlerdir. Bunun yanında, delik delme yöntemine göre bir avantaj olarak deliğin çapındaki küçük hatalara veya eksantrikliğe karşı daha az hassastır. Şüphesiz, halka derinliği, delik delme yöntemine göre daha fazla olduğundan parçaya verilen hasar daha fazladır [39].

Derin Delik Delme (Deep hole drilling) Yöntemi

Derin delik delme yöntemi, delik delme yöntemi ile halka çekirdek yönteminin bir ara formudur. Bu yöntemin uygulamasında, öncelikle iş parçasında boylu boyunca bir delik açılır ve delik çapının ölçümü alınır. Daha sonra, halka çekirdek yöntemine benzer şekilde, deliğin etrafındaki parça çıkarılır. İlk durumda ölçülen delik çapı tekrar ölçülerek, çapta oluşan farktan kalıntı gerilme hesabı yapılır. Bu yöntem genellikle, büyük ölçekli döküm parçalarda kullanılır [28,29].

Shokrieh ve Ghasemi çalışmalarında, ortotropik (mekanik özellikleri üç birbirine dik eksen yönünde bağımsız ve özgün)

plakalar için delik delme yöntemiyle ölçülen serbest kalan gerinimlerin, kesin çözüm yöntemleri kullanılarak kalıntı gerilmelere dönüştürülmesini ele almışlardır [40].

Hosseinzadeh ve arkadaşları çalışmalarında, paslanmaz çelik silindir ve halkaları, gerilme oluşturmak amacıyla suyla soğutmuş ve bu gerilmelerin, akma gerilmelerine eşit veya daha büyük seviyelere ulaşmasını sağlamışlardır. Kalıntı gerilmeleri, nötron kırınımı ve iki mekanik gerilme rahatlatma (relaxation) yöntemi olan derin delik delme ve artımlı merkez delik delme ile ölçmüşlerdir. Bu ölçümlerde, sonlu elemanlar analiziyle yapılan soğutma tahminleriyle karşılaştırıldığında, benzer eğilimler olmasına rağmen büyüklükler arasında sınırlı bir uyum bulmuşlardır. Yeniden oluşturulan gerilmeler ile yapılan ölçümlerde ise daha iyi bir uyum yakalamışlardır. Şaşırtıcı bir şekilde, derin delik delme ve nötron kırınımı ölçümleri arasında ise oldukça iyi bir uyum olduğunu tespit etmişlerdir [41].

Kontur-Kesit Profili (Contour) Yöntemi

Kontur yöntemi, ilk olarak Prime tarafından 2000'li yılların başında önerilmiştir [30, 31] ve stresin iki boyutlu olarak değerlendirilmesi amacıyla uygulanmıştır. Bu yöntemin, tüm kesitindeki kalıntı gerilmelerin görselleştirilmesini sağlaması nedeniyle, kontur yöntemi sonuçları genellikle tahribatsız nötron kırınımı ölçümleriyle karşılaştırılır [1, 28].

Yöntem, Bueckner prensibine dayanır ve özet olarak şunu ifade eder: "Çatlak kapatma kuvvetleri, çatlak içermeyen bir cismin aynı koşullardaki gerilme dağılımına eşdeğer olmalıdır." [30] Ölçüm prosesi ise numunenin kesilmesi, yüzey profilinin çıkarılması, veri toplanması ve gerilme ölçülmesi şeklinde özetlenebilir. Profilin doğru çıkarılması için, bu yöntemde kesilen yüzeyin kalitesi önemli bir rol oynar. Bu sebeple, kesmede geleneksel kesme takımları yerine tel erozyon yöntemi tercih edilir. Diğer proses parametreleri de ölçümde önemli rol oynar. Bu parametreler, malzeme, tel erozyon proses parametreleri, parça kompleksitesi olarak listelenebilir [16, 30].

Hacini ve arkadaşları çalışmalarında, kaynaklı bileşenler, kaynak dikişi çevresinde yüksek gerilmeli kalıntı gerilmelerine maruz kaldığı temeline göre, bu gerilmelerin erken çatlamanın kaynağı olabileceğine dikkat çekmişlerdir. Laboratuvarlarında kurulu robotlu çekiçleme ile, başlangıçta gerilmesiz olan östenitik paslanmaz çelik 304L örneklerinde kompresif kalıntı gerilmeleri indüklemek için kullanılmışlar ve elde edilen kalıntı gerilmeleri, kontur tekniği ile değerlendirilmiştir [30].

Brown ve arkadaşları, kaynaklanmış silindirdeki kalıntı gerilmelerin ölçüm sonuçlarını, kontur ve nötron kırınımı yöntemleriyle karşılaştırmıştır. Sonuçlar, nötron kırınımının, kontur yöntemine göre 50 MPa daha düşük gerilmeler değerlendirdiğini göstermiştir [42].

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, kesit profilinin ölçümünde yeni yöntemler kullanıldığı görülmüştür. D'Elia ve arkadaşları, kalıntı gerilme değerlendirmesi için kullanılan kontur yönteminin laboratuvarlar arası yeniden üretilebilirliğini inceleyen çalışmalarında, süreç simülasyonundan elde edilen yüzey topografyası verilerini kullanmışlardır [43].

Wang ve arkadaşları ise karmaşık geometrilere sahip yapısal parçalarda kesit kalıntı gerilmelerini belirlemek için 3D tarayıcı kullanarak kontur ölçümü olarak yeni bir yöntem sunmuşlardır. Önerilen yöntem, farklı özellikteki bir boru kaynağındaki eksenel kalıntı gerilme dağılımını değerlendirmek için uygulanmış ve elde edilen sonuçlar, doğrulama amacıyla referans kontur ölçüm makinesi (CMM) ile karşılaştırılmıştır. İki yöntem arasında hem ölçülen konturlar hem de hesaplanan kalıntı gerilmeleri açısından nicel bir uyum sağlanmıştır. Bu yöntem, referans yönteme kıyasla ölçüm süresini yaklaşık %99 oranında kısaltmaktadır [44]. Özetle, Kontur-Kesit Profili (Contour) yöntemiyle ilgili yeni bakış açıları, karmaşık geometrilere sahip parçalar için kesit kalıntı gerilmelerini belirlemek amacıyla 3D tarayıcı kullanılarak, geleneksel yönteme kıyasla ölçüm süresinde önemli bir azalma sağlamıştır.

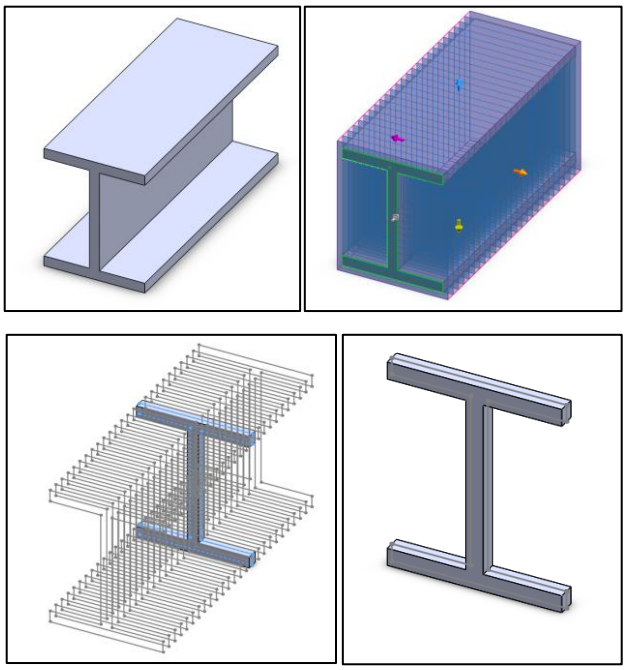
Kesit Alma (Sectioning) Yöntemi

Bu yöntem farklı kaynaklarda, Kesit alma (Sectioning), Yarma (Slitting) ya da Dilimleme (Slicing) gibi farklı isimlerle sınıflandırılmışlardır [1,14,32]. Kesit alma tekniği test edilecek parçadan belirli bir kütle/hacim çıkarılması sırasında kalıntı gerilmelerin serbest bırakılmasından kaynaklanan deformasyonun ölçülmesine dayanan tahribatlı bir yöntemdir (Şekil 5 ve 6).

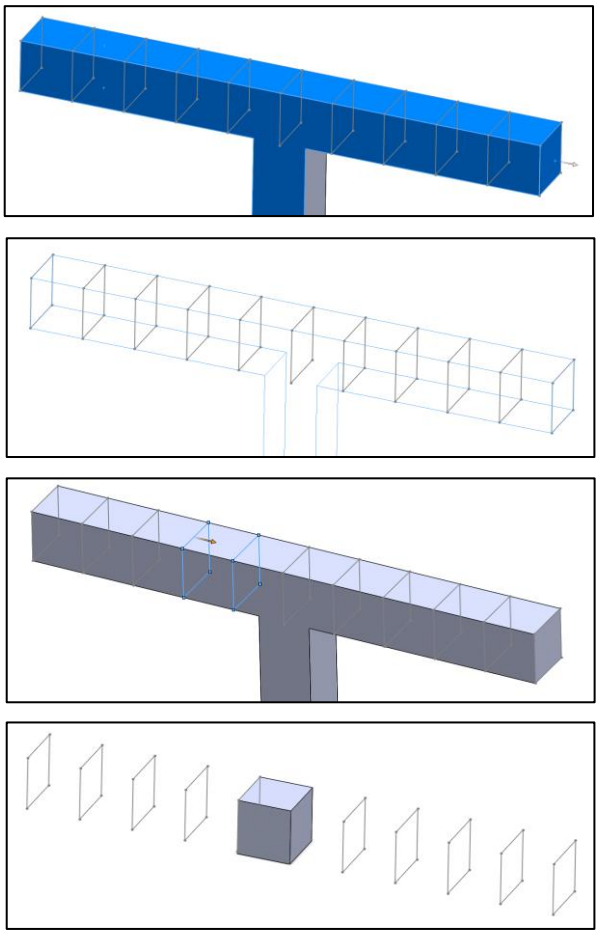
Bu teknik, Tebedge ve arkadaşları tarafından genel yapı çeliği, alüminyum alaşımları ve paslanmaz çelik malzemelerin kesitlerindeki kalıntı gerilmeleri analiz etmek için kullanılmıştır [33].

Rossini ve arkadaşları da kesit alma yöntemini, fiziksel büyüklükleri ölçülüp kaydedilmiş bir plakada kesim yaparak kesim hattında mevcut olan kalıntı gerilmeleri serbest bırakarak belirlemiştir. Çalışmaya göre, kullanılan kesim işlemi, plastik deformasyon veya ısı oluşturmamalıdır, böylece kesim yüzeylerindeki plastik deformasyon etkileri olmadan orijinal kalıntı gerilmeler doğru bir şekilde ölçülebilir. Kesme işlemi sırasında açığa çıkan gerinimler genellikle mekanik ve elektriksel gerinim ölçerler kullanılarak ölçülür [14, 33].

Ekmekçi çalışmasında, kesit alma yöntemini gerilme altındaki nesne kesilir ve gerilmeler serbest bırakılır şeklinde özetlemiştir. Her durumda, çıkarılan malzeme miktarına bağlı olarak ortalama deformasyon değerleri ölçülür ve bunun serbest bırakılan gerilmenin büyüklüğünü belirleyeceği not edilmiştir [32].



Şekil 5. Kesit alma yönteminde I Profilinin şematik gösterimi.



Şekil 6. Kesit alma yönteminde I Profilinin şematik gösterim detayı.

Tahribatsız Deneysel Teknikler

Son yıllarda, tahribatsız değerlendirme (NDT: Non-Destructive Testing) yöntemleri gibi yeni muayene çözümleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler sadece maliyet açısından etkili, güvenilir ve uygulaması kolay olmakla kalmaz, aynı zamanda test prosedürü sırasında yüksek bir güvenlik seviyesi de sağlar [1].

Tahribatsız yöntemlerin temeli elastik değişimlerin ölçümüne dayanır. Buradaki en temel fark, malzemeye zarar vermeden yapılan bir ölçüm olmasıdır. Literatürde ve sanayide karşılaşılan en yaygın yöntemler: X-Işını Kırınımı (XRD: X-Ray Diffraction) yöntemi, Ultrasonik yöntem, Nötron kırınımı ve Manyetik (Barkhause gürültüsü) yöntemidir.

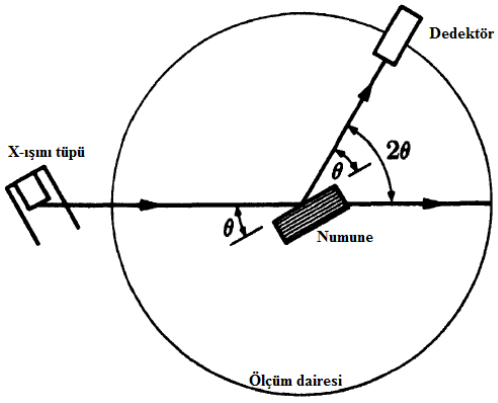
X-Işını Kırınımı (XRD: X-Ray Diffraction) Yöntemi

Kalıntı gerilmesi hesaplama yöntemleri arasında en çok X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi kullanılmaktadır [33]. X-Işını kırınımı, malzemelerdeki yüzey kalıntı gerilmelerini ölçmek için kullanılan tahribatsız bir yöntemdir (Şekil 7). Bu yöntem, malzemenin gerilme altında veya kalıntı gerilmeleri mevcut olduğunda meydana gelen elastik şekil değişikliklerinin, atomik düzlemler arasındaki mesafeyi değiştirmesi prensibine dayanır. X-Işını kırınımı ile atomik düzlemler arasındaki mesafe ölçülerek, daha sonra bu şekil değişiklikleri hesaplanabilir ve kalıntı gerilme değeri belirlenebilir [28].

Kırınım yöntemleri, elastik deformasyonu belirlemeye dayanır; bu deformasyon, düzlemler arası mesafe d'yi, gerilmesiz değeri d_0 'ya değiştirecektir. Ardından, Eşitlik (4)'te verilen Bragg yasası kullanılarak gerilme hesaplanabilir: [14,32]

$$\lambda = 2d \sin\theta \tag{4}$$

Burada λ X-ışınlarının dalga boyunu, d kristal düzlemleri arası mesafe ve θ kırınım açısını temsil etmektedir [32].



Şekil 7. Geleneksel XRD Yöntemi [34,35].

X-ışını kırınımı ile kalıntı gerilmesi ölçümü, kristalin özelliklere sahip, nispeten ince taneli olan ve numune yüzeyinin her yönü için kırınım üreten malzemelere uygulanabilir. Numune metalik veya seramik olabilir [36]. Ramana ve arkadaşları, X-ışını yöntemini, maraging çeliği ile su verilip tavlanmış alaşımlı orta karbonlu çelik arasındaki farklı metallerin kalıntı gerilme dağılımını değerlendirmek için kullanmışlardır [37]. Bu yöntemin avantajı tüm kalıntı gerilme tiplerinin ölçülebilmesi iken, yüksek cihaz maliyeti ve sınırlı numune boyutu ise dezavantajı olarak görülebilir [28]. Bu çalışmada, tüm detaylarına girilmemekle birlikte, X-ışını kırınımı (XRD) ölçümü için literatürde farklı ölçüm yöntemlerine değinilmiştir. Bu yöntemler: Williamson-Hall yöntemi, Warren-Averbac yöntemi ve Rocking yöntemi olarak listelenmiştir [34].

Robinson ve Redington, XRD yöntemini kullanarak yüzeye yakın kalıntı gerilmeleri ölçmüş ve bunları ısıl işlem görmüş alüminyum alaşımlarındaki mukavemet ve sertlik özellikleriyle ilişkilendirmeye çalışmışlardır. Bu çalışmada incelenen tüm alüminyum alaşımlar için kalınlık boyunca kalıntı gerilme dağılımının aynı deseni takip ettiği ve iç kısımlarda çekme gerilmeleri, yüzeyde ise bası gerilmeleri oluştuğu gözlemlenmiştir. Alaşım mukavemetinin etkisi, gözlenen kalıntı gerilme büyüklüklerinde değişim olarak kendini göstermiştir. Ayrıca, yüzey kalıntı gerilmelerinin su verme sonrası sertlik (Vickers) ve mukavemet ile doğrusal bir ilişkiye sahip olduğu tespit edilmiştir [45].

Ultrasonik (Ultrasonic) Yöntem

Ultrasonik yöntemlerde, katı içerisindeki gerilme seviyelerinin etkisiyle hareket eden ultrason dalgalarının hızındaki değişiklikler kullanılarak kalıntı gerilmeler hesaplanabilir. Bir malzeme, kalıntı gerilme altında ve gerilmesiz durumda farklı ultrason dalga hızlarına sahip olur. Malzeme elastik özellik gösterdiği sürece, dalga hızı malzemedeki kalıntı gerilme durumuna bağlı olarak değişir [34].

Malzeme içindeki kalıntı gerilmeler, ses dalgalarının hareketine engel olarak dalga hızlarını düşürür. Bu nedenle, malzeme içinde ilerleyip arka yüzeyden yansıyan ses dalgalarının gidiş geliş mesafesi, kalıntı gerilmesi olmayan bir malzemeye göre farklılık gösterir. Bu fark nano saniye düzeyinde olduğundan, ölçüm yapabilmek için son derece hassas cihazlar kullanmak gereklidir [28].

Kalıntı gerilmelerinin dalga hızı üzerindeki etkisi, Eşitlik (5) ile kavramsal olarak açıklanabilir:

$$V = V_0 + K\sigma \tag{5}$$

Burada, V_0 gerilmesiz ortamda bir dalganın hızını, σ gerilmeyi ve K ise malzemeye bağlı bir parametre olan akustik elastik sabiti ifade eder.

Javadi ve arkadaşları, sonlu elemanlar ve ultrasonik yöntem kullanarak östenitik paslanmaz çelik plakalarda kalıntı gerilmelerin, kaynaklı parca kalınlıkları boyunca değerlendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Öncelikle, sonlu elemanlar modelini, delik delme yöntemi ile karşılaştırmışlar, daha sonra da bu modeli ultrasonik yöntemle karşılaştırmışlardır [46].

Zhan ve arkadaşları da kalıntı gerilmelerin lazer ultrasonik ölçümü için deneysel ve sayısal simülasyonunu yapmışlardır. Numunenin kaynak kalıntı gerilmesi, sayısal simülasyon (ABAQUS) fonksiyon modülü kullanılarak önceden tanımlanmış alanla gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonuçları, deneysel yöntemle oldukça uyumlu çıkmıştır [47].

Literatürde karşılaşılan örneklere göre, ultrasonik yöntemin genellikle kaynaklı parçalar ve kaynak işleminin neden olduğu kalıntı gerilmenin ölçümünde tercih edildiği not edilebilir.

Nötron Kırınımı (Neutron Diffraction) Yöntemi

Nötron kırınımı yöntemi, X-ışını kırınımı yöntemine benzer şekilde, malzemenin kristal yapısındaki atomik düzlemler arasındaki mesafeyi ölçerek kalıntı gerilmeleri belirler. Bu yöntemin avantajı, X-ışınları yerine daha güçlü ve yüksek penetrasyona sahip nötronlar kullanılmasıyla nüfuziyet derinliğinin daha fazla olmasıdır. Bu sayede ölçüm derinliği, alüminyumda 200 mm, çelikte 25 mm ve titanyumda 25 mm'ye kadar ulaşabilir [28].

Daha önce de not edildiği üzere, Brown ve arkadaşları, kaynaklanmış parçada, kontur ve nötron kırınımı yöntemleriyle karşılaştırmıştır. Sonuçlar, nötron kırınımı, kontur yöntemine göre 50 MPa daha düşük gerilmeler vermiştir [42]. Arada oluşan farkın temel sebebi; kontur yönteminde tüm kesitteki deformasyona bağlı sonuç hesaplanırken, nötron kırınımı yönteminde ise hacimsel ortalama ile sonuçlara ulaşılmasıdır. Bu fark, malzeme yoğunluğu ve tanesel arası gerilmelerin olduğu bölgelerde daha fazla olabilir.

Smith ve arkadaşları, Brown ve arkadaşlarının çalışmasına benzer bir karşılaştırmayı türbin ve kompresörlerde kullanılan Nikel bazlı alaşımların lineer sürtünmeli kaynak işlemi sonrası nötron kırınımı ve kontur yöntemine göre karşılaştırmışlardır. Nötron kırınımı ile yapılan kalıntı gerilme değerlendirmelerinin, ölçüm hatalarını azaltma ve doğruluğu artırma konusunda büyük bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamıştır [48].

Analitik (Analytical) Teknikler

Son yıllarda, makroskobik yüzey gerilme ölçüm yöntemlerinde büyük gelişmeler gerçekleşmiştir. Bu gelişmelerden biri, analitik tekniklerden sonlu elemanlar yöntemi (FEM) alanındaki gelişmelerdir. Bu yöntem, kritik gerilme gevşemesi (critical stress relief) katsayısının

kalibrasyon sürecini büyük ölçüde basitleştirerek ölçüm doğruluğunu artırmıştır [13].

Tahribatlı ve tahribatsız deneysel teknikler, kalıntı gerilme analizi için öncelikli olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte, endüstri uygulamalarında artan ölçüm aletleri, kurulum, zaman gibi maliyetler sebebiyle analitik ve sonlu elemanlar modelleri geliştirilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemin en önemli avantajları, nispeten daha düşük işlem sürelerinde gerçekleştirilmesi ve ölçüm aletleri ve kurulum maliyetlerinin olmamasıdır. Bunun yanında en önemli dezavantajı ise gerçek koşulların tümüyle modellenememesidir.

Özel ve arkadaşları çalışmalarında, kalıntı gerilmelerin analitik yöntemlerle kesin olarak hesaplanmasının zor olduğunu, bu sebeple genellikle deneysel tekniklerle beraber kullanılarak, kesin hesaplama olmasa da iyi bir yaklaşım sunabileceğini belirtmişlerdir. Kalıntı gerilmelerin hesaplanmasının sayısal çözüm yöntemi olan sonlu elemanlar yöntemi ile yapılabileceğini belirtmişlerdir [49].

Zhang ve arkadaşları, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic) ve Alüminyum birleşimlerinde oluşan kalıntı gerilmeleri tahmin etmek için bir model geliştirmiştir. Model, deneysel ve sonlu elemanlar sonuçları ile karşılaştırılarak başarılı bir şekilde doğrulanmıştır. Fakat bu doğrulama, birçok varsayıma bağlıdır. Kalıntı gerilmenin düzlem gerilmesi olması, kalıntı gerilmenin bir tork oluşturmadığı, farklı malzemeyi birleştiren yapıştırıcı (adhesive) malzemenin elastik bir malzeme olması ve CFRP ve alüminyumdan farklı malzemelerin aynı deformasyona sahip olması gibi bir dizi varsayımlara bağlıdır [50].

Shokrieh ve Ghasemi, delik delme ve yarma (slitting) yöntemlerinin simülasyonu için temel oluşturabilecek eşitlikleri not etmişlerdir [40].

Literatürdeki birçok çalışma, kullanılan malzemenin - özellikle kompozit parçalar için- farklı sonlu eleman modelleri oluşturarak, deneysel sonuçlara yaklaşmaya çalışmışlardır. Tabatabaeian ve arkadaşları, plastik kompozitler için kullanılan modelleri: Elastik çözüm, Silindir teorisi, Elshelby teorisi, Enerji yöntemi, Kür sertleşmesi anlık doğrusal elastik (CHILE) modeli, Viskoelastik model olarak listelemişlerdir [1].

Cai ve arkadaşları çalışmalarında, AlSi7Cu0.5Mg (A356) alüminyum alaşımının T4 ve T6 ısıl işlem görmüş hallerinde gelişen kalıntı gerilmeleri değerlendirmeyi amaçlamıştır. Farklı ölçüm teknikleriyle yapılan analizlerde, kontur yöntemi ve artımlı delik delme yöntemlerinin T6 uygulanan alaşımlar için en uygun olduğu, T4 uygulanan alaşımlarda ise tüm yöntemlerin eşit derecede etkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca, işlem görmemiş (as-cast) ve ısıl işlem görmüş örnekler arasındaki farkların, çökeltme ısıl işlemi ve su vermeden kaynaklandığı öne sürülmüştür [51].

Johnson ve arkadaşları, gri dökme demir örneği için döküm sürecindeki kalıntı gerilmelerin gelişimini incelemek amacıyla MAGMAstress paketini kullanmışlardır. Simülasyonlarında sıcaklık bağımlı termofiziksel özelliklere sahip termo-elastoplastik malzeme modeli kullanmışlardır. Simülasyon sonuçları, parça üzerindeki farklı konumlarda nötron kırınımı tekniğiyle karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır [52].

Menne ve arkadaşları, Ford'un bazı motor projelerinde, döküm ve ısıl işlem süreçlerinin son mekanik özellikleri, kalıntı gerilme dağılımını ve olası hataları tahmin etmek için sonlu elemanlar modellemesinin önemini vurgulamışlardır. Çalışma, motor bloğu üretimi öncesinde döküm sürecinin bilgisayar destekli mühendisliğin bir parçası olarak sonlu elemanlar metodu modellemesinin, zaman ve maliyetini %50'ye kadar azaltabileceğini ve ürünlerin kalite ve dayanıklılığını iyileştirebileceğini sonucuna varmıştır. Analiz için MAGMA ticari yazılım paketi kullanılmıştır; ancak modelleme parametreleri, sınır koşulları veya malzeme özellikleri gibi detaylar raporda tartışılmamıştır [53].

Tüm bu yöntemler, Tablo 1'de yöntem grubu (Tahribatlı, Tahribatsız ve Analitik) olarak sınıflandırılarak avantaj, dezavantaj ve uygulama alanları olarak kaşılaştırılarak tablolaştırılmıştır.

Tablo 1. Tüm Ölçüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Yöntem Grubu	Yöntemler	Avantajlar	Dezavantajlar	Uygulama Alanları
Tahribatlı	Delik Delme	Basit, hızlı, standart, küçük hasar	Operatör etkisi, eksantriklik riski	Metaller, plastikler
	Halka Çekirdek	Yüksek kalıntı gerilme ölçebilme	Daha fazla hasar, zor uygulama	Metaller, seramikler
	Derin Delik Delme	Büyük parçalarda etkili	Karmaşık, çok tahribat oluşturması	Büyük döküm parçalar
	Kontur	Kesit boyunca 2D dağılım	Tam kesit tahribatı	Kaynaklı yapılar
	Kesit Alma	Basit uygulama	Tam tahribat	Çelik/Alüminyum
Tahribatsız	XRD	Kesin, yaygın	Pahalı, yüzeyle sınırlı	Metalik/seramik
	Ultrasonik	Zararsız, kaynaklı parçalarda etkili	Yüksek hassasiyet gerektirir	Kaynaklı parçalar
	Nötron	Derin nüfuziyet	Yüksek maliyet	Kalın metal parçalar
	Manyetik	Kolay, zararsız	Sadece ferromanyetik malzemelerde uygulama	Manyetik malzemeler
Analitik	Analitik ve FEM Yakşalımı	Düşük maliyet, hızlı	Gerçek tam modellenemez	Döküm/ısıl işlem simülasyonları

Nedenler ve Etkiler

Nedenler

Tabatabaeian ve arkadaşları, kalıntı gerilme oluşturan nedenleri; Termal (Isıl işlemler) işlem, Kaynak işlemi, Kaplama işlemleri, Talaşlı imalat ve Katmanlı imalat işlemi olarak listelemişlerdir. Termal süreçler altında kürleme işlemi, kaynak işlemi, termal sprey işlemleri incelenirken, mekanik işlemler altında ise talaşlı imalat ve katmanlı imalat işlemleri detaylı olarak incelenmiştir [1].

Özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlı jantlar, silindir kapakları/blokları gibi alüminyum döküm parçalara uygulanan imalat adımlarının sebep olduğu nedenler dikkate alındığında, iki imalat adımı öne çıkmaktadır. Bunlar, ürünlerin mekanik özelliklerini arttırmaya yönelik yapılan ısıl işlemler (T6 Isıl işlemleri gibi) ve ürünlerin son haline getirilmesi amacıyla yapılan talaşlı imalat işlemleridir.

Isıl İşlemler

Kalıntı gerilmelerin oluşmasının ana nedenlerinden biri, sıcaklık alanındaki ani değişikliklerdir.

Li ve arkadaşları, kalıntı gerilmelerin, çeşitli imalat ve kaynak işlemleri sonucunda meydana gelebileceği gibi, alüminyum döküm parçalarında önemli bir kısmının ısıl işlem sırasında oluştuğu gözlemlemiştir [11]. Çalışmalarına göre, T6 gibi çözeltiye alma, su verme ve yapay yaşlandırma aşamalarını içeren ısıl işlem süreçlerinde, özellikle çözeltiye alma ve su verme adımları arasında meydana gelen ani sıcaklık değişimleri, yapı içinde kalıntı gerilmelerin oluşmasına yol açabilir. Bu tür kalıntı gerilmeler, makroskobik ölçekte ortaya çıkabilir [11].

Jiang ve arkadaşları, ısıl işlemler esnasında çok kısa zaman dilimlerinde çok yüksek sıcak farklılıkları sebebiyle ortaya çıkan termal farklılıkların yapıda kalıntı gerilme oluşturması sebebiyle plastik deformasyona yol açabileceğini bildirmiştir [54].

Isıl işlemler sürecinde oluşan kalıntı gerilmelerin giderilmesi için bilinen en iyi yöntem nispeten düşük sıcaklıklarda uygulanacak ek bir ısıl işlem olabilmektedir. [55] Bu ikincil ısıl işlem, gerilme giderme tavı olarak da bilinmekle birlikte (malzeme ve parça geometrisine göre farklılık gösterir) alüminyum alaşımlı döküm parçalarında 250 °C civarında uygulanabilir.

Jiang ve arkadaşları, AlSi10Mg alaşımındaki kalıntı gerilmenin sıcaklığın azalmasıyla kademeli olarak düştüğünü ve 250 °C'de minimum seviyeye ulaştığını göstermektedir [54]. Bu durum, alaşımlarda kalıntı gerilmelerin azaltılması amacıyla yapılan ikincil ısıl işlemin önemini ortaya koymaktadır.

Robinson ve arkadaşları, alüminyum alaşımı malzemenin ısıl işlem sonrası kalıntı gerilmelerinin yeniden dağılım mekanizması üzerine bir çalışma yapmışlardır ve malzeme kaldırmanın, kalıntı gerilmelerinin katman katman yeniden dağılımına neden olduğunu bulmuşlardır [56].

Li ve arkadaşları, A356 malzemeli jantlarda, T6 ısıl işlemindeki su verme aşamasından kaynaklanan kalıntı gerilmelerinin bir modelini geliştirilmiştir. Elde edilen tahminler, su verme işleminden geçirilen jantlar üzerinde gerinim ölçer (strain gauge) konumlandırıp, kesit alma tekniği ile yapılan kalıntı gerilmesi ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmadaki model, T6 Isıl işlemindeki su verme işlemi sırasında kalıntı gerilmenin durumu ve işleme aşamasındaki malzeme kaldırma (talaşlı imalat) nedeniyle kalıntı gerilmelerinin yeniden dağılımını dikkate almıştır. Su verme sırasında oluşan kalıntı gerilme, esas olarak 200 °C ile 350 °C arasında değişebildiği görülmüştür [57].

Godlewski ve arkadaşları, Alüminyum döküm alaşımlarının işlem döngüsündeki su ile soğutmanın, döküm parçanın bazı bölgelerinde yüksek kalıntı gerilmeleri oluşturma potansiyeline sahip olduğunu not etmişlerdir. Döküm parçanın ömrüne katkı sunacağı düşünülerek, bu kalıntı gerilmenin giderilmesi için farklı sıcaklıklarda gerilme giderme tavlaması uygulanarak sıcaklık arttıkça, kalıntı gerilme gidermenin daha başarılı olduğunu bildirmişlerdir [58].

Talaşlı İmalat

Alüminyum döküm parçalarında talaşlı imalat esnasında oluşan yüzeysel kalıntı gerilimler parçanın yorulma dayanımını etkileyebileceğinden ömrünü de direkt olarak etkileyecektir. Ayrıca talaşlı imalat, yüzey pürüzlüğü ve bütünlüğünü de etkileyebilir. Bu sebeple, talaşlı imalat ısıl işlem sürecinin yanında önemli bir rol oynayan işlemdir. Bu sebeple, talaşlı imalat işlemi, kalıntı gerilme durumu için mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

Tabatabaeian ve arkadaşları, özellikle uçak endüstrisinde, parça distorsiyonların düzeltilmesi için yüksek maaliyetler olduğunu not etmişlerdir. 2001'de yayınlanan bir çalışmaya dayandırdıkları bir bilgiye göre, Boeing şirketinin işlenmiş bileşenlerdeki distorsiyonu telafi etmek için yaklaşık 290 milyar USD harcadığını belirtmişlerdir [1]

Bu çalışmada daha önce de belirtildiği gibi, yapıda oluşan kalıntı gerilmelerin çeki ya da bası olması, çalışma şartlarına göre değişiklik gösterse de-, bası kalıntı gerilmesine sahip işlenmiş parçaların, işlenmemiş ham parçalara göre daha uzun bir yorulma ömrüne sahip olduğu not edilebilir. Bu sebeple, işleme planında bu durumun göz önüne alınması fayda sağlayabilir.

Zhang ve arkadaşları, ince cidarlı parçaların işlenmesinde kalıntı gerilmelerin iş parçası distorsiyonuna ve boyutsal kararsızlığa neden olduğunu göstermişlerdir [59].

Amini ve arkadaşları, ince cidarlı alüminyum alaşımlarının işleme sonrası kalıntı gerilmelerini incelemiş ve kesme kuvveti ve sıcaklığın kalıntı gerilme ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Isıl etki, iş parçasında kalıntı gerilme oluşturabilir; bu nedenle, bu parçaların işlenmesi daha fazla distorsiyona ve üretim hatalarına yol açmaktadır [60].

Mantle ve Aspinwall, işleme sürecinde farklı faktörlerin kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Kesme hızı, ilerleme oranı, eksenel ve radyal kesme derinliği, iş parçası açısı, aşınma ve frezeleme yönü gibi işleme parametrelerinin kalıntı gerilme profili üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır [61].

Liu ve Guo, ikinci kesme işleminin rasyonel optimizasyonu ile yüzeydeki kalıntı gerilmenin çeki gerilmesinden bası gerilmesine dönüştürülebileceğini not etmişlerdir [62].

Tabatabaeian ve arkadaşları, işlenmiş numunenin daha yüksek yüzey kalitesi, bası kalıntı gerilmelerinin varlığını gerektireceğini, işleme operasyonlarında, bası kalıntı gerilmeleri mekanik yüklerin, çekme kalıntı gerilmeleri ise termal yüklerin bir sonucu olarak oluştuğunu bildirmişlerdir [1].

Kalıntı Gerilmelerin Parça Ömrüne Etkileri

Yorulma/Kırılma Üzerine Etkiler

M.B. Prime, Kalıntı gerilmelerin yorulma ve kırılma üzerindeki etkilerinin açık olduğunu ve kırılma mekaniği kavramlarının kalıntı gerilim ölçümleri ile iç içe geçmiş olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, kalıntı gerilmelerin, tıpkı harici bir yük gibi davrandığını ve çeki ya da bası gerilmeleri olmasına bağlı olarak hasar süreçlerini hızlandırıp yavaşlatabileceğini bildirmiştir. Ek olarak, nispeten daha az bilinen bir örnek etkiyi; kalıntı gerilmelerin, malzemelerin gerçek mekanik özelliklerini, özellikle kırılma tokluğunu ölçmeyi son derece zorlaştırabileceğini bildirmiştir [63].

Tabatabaeian ve arkadaşları, Kalıntı gerilmelerin yorulma / kırılma üzerine olan etkilerini Eşitlik (6) da ifade etmişlerdir:

$$(K1)applied + (K1)rs > K1c \quad (6)$$

Burada:

- $(K1)applied$: Uygulanan mod gerilme yoğunluk faktörü,

- $(K1)rs$: Kalıntı gerilmeden kaynaklanan mod gerilme yoğunluk faktörü,
- $K1c$: Malzemenin kırılma tokluğu sınırı (kırılma mukavemetine karşı dayanıklılık).

$(K1)rs$, negatif değerlere (bası gerilmeleri) sahip olduğunda faydalı, pozitif değerlere (çekme gerilmeleri) sahip olduğunda ise zararlı olabileceğini göstermektedir [1].

M.B. Prime, kalıntı gerilmelerin yüksek çevrimli yorulmaya kıyasla yorulma çatlağı büyümesi üzerinde daha güçlü bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur [63].

Prabhakar ve arkadaşları, kritik bölgelerde lokalize bası kalıntı gerilmeleri uygulayarak bileşenlerin yorulma ömründe %88'lik önemli bir iyileşme sağlanabileceğini ortaya koymuştur [64].

Daha önce bildirildiği üzere, Li ve diğerleri, AlSi7Mg0.3 alaşımlı jantların su verme (quenching) işlemi sırasında oluşan gerilmeler sonrası, bu gerilmelerin yorulma ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Su verme işlemi sırasında oluşan gerilmelerin, yüzeyde bası, çekirdek kısmında ise çeki olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, su verme hızının düşürülmesiyle birlikte, çeki tipi gerilmeler nedeniyle kalıntı gerilmelerin azaldığını ve bunun sonucunda yorulma ömrünün arttığı belirtmişlerdir [57].

Kutsal ve arkadaşları, AlSi7Mg0.3 alüminyum alaşımlı jantların, T6 ısıl işlemlerini simüle ederek, bu ısıl işlem adımlarının farklı adımlarda oluşturduğu kalıntı gerilme değerlerini yazılım yardımıyla hesaplamışlardır. İlk aşamada, üç farklı koşulda (döküm, su verme ve yapay yaşlandırma) mikroyapısal incelemeler ve mekanik test çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca, 3D tarayıcı test sonuçlarına göre, her ısıl işlem adımında üç farklı bölgedeki boyutsal değişiklikler gözlemlenmiştir. Su verme işleminden sonra, jantın yüzeyinde çoğunlukla bası gerilmesi gözlemlenmiştir ve yapay yaşlandırma adımında kalıntı gerilimde az ve yetersiz bir düşüş görülmüştür [65].

Kalıntı Gerilmeleri Önleme (Kontrol) Yöntemleri

Kalıntı gerilmeler metallerin yanında; seramikler ve kompozit malzemeleri de önemli ölçüde etkilemektedir.

Kalıntı gerilmelerin, yorulma ömrünü azaltması, yüzeyde çatlak/kırılma oluşturması ya da parçanın şekilsel bütünlüğünü bozması gibi yapıya verdiği hasarlar üstte detaylıca tartışılmıştır. Bu olası hasarları önlemek ise, hem ilgili parçanın uygun şartlar altında çalışılması, hem olası maddi hasarların önüne geçilmesi, hem de tasarım aşamasında tasarımcılara daha optimum ve hafif tasarım yapmalarına yardımcı olacaktır. Endüstriyel uygulamalarda, kalıntı gerilmelerin tamamen önlenmesi mümkün olmasa da azaltılması/yönlendirilmesi ya da kontrol altına alınması maliyet ve parça ömrü açısından önemli bir kazanç sağlar.

Bu önleme faaliyetleri, kompozit ya da seramik malzemeler için farklılık gösterse de bu çalışmada metal ve alüminyum alaşımları için örnekler incelenmiştir.

Isıl İşlemler

Alüminyum alaşımlarında görülen kalıntı gerilmeler için önemli önleme yöntemlerinden ilki ısıl işlem uygulamalarıdır.

Alümiyum alaşımlı parçalarda yapılan kaynak uygulamaları, çok kısa zamanda yüksek sıcaklık farkları oluşturması sebebiyle, kaynak bölgesine yapılacak soğutma işlemleriyle nispeten önlenebilir. Lin ve arkadaşları, kaynaklanan alüminyum alaşımları gibi bazı hassas malzemeler için yerel veya genel olarak uygulanabilen soğutma işleminin daha uygun olduğunu göstermektedir. Araştırma bulguları, çoklu elektron ışını (multi electron beam heating) ile ısıtma yöntemi kullanılarak kalıntı kaynak gerilmelerde yaklaşık %48 oranında azalma sağlanabileceğini ortaya koymaktadır [66].

Bu çalışmanın da merkezinde yer alan, alüminyum alaşımlı döküm parçaların ergitme-döküm-ısıl işlem (T6 Isıl işlem gibi) üretim adımlarında, imalatın doğası gereği sınırlı olarak müdahale edilebilen adımları sonrası, ek ısıl işlemlerle gerilme giderme uygulamaları yapılabilir. Yang ve arkadaşları, alüminyum alaşımlarının su verme işlemi sonrası oluşan kalıntı gerilmelerini incelemek için bir sonlu elemanlar simülasyon modeli geliştirmiştir. Çalışma, su verme sıcaklığının artmasıyla birlikte, su verilmiş silindirik çubuklardaki maksimum çeki ve bası kalıntı gerilmelerin azaldığını ortaya koymuştur [67].

Wyatt ve arkadaşları, A356 alüminyum alaşımından üretilen parçanın yüzeyinde oluşan kalıntı gerilmeleri belirlemek için düşük maliyetli yeni bir yöntem kullanmıştır. Mikro sertlik izleri arasındaki mesafe değişimini ölçerek gerilme seviyeleri hesaplanmış ve kesme ile ısıl gerilme giderme teknikleri karşılaştırılmıştır. Döküm parçalar daha sonra 250°C'de 200 dakika süren bir ısıl işlemle gerilme giderme işlemine tabi tutulmuş ve ısıl gerilme giderme teknikleri karşılaştırılmıştır [69].

Godlewski ve arkadaşları, alüminyum alaşımlı döküm parçalara uygulanan ısıl işlemler adımlarından, çözeltiye alma ile su verme arasındaki hızlı sıcaklık değişimi gerçekleşen bölgeyi işaret ederek kalıntı gerilmelerin oluştuğu adımı belirtmişlerdir. Bu kalıntı gerilmelerin olumsuz etkilerini azaltmak için de farklı yaşlandırma adımları üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada dört farklı sıcaklık (190 °C, 220 °C, 240 °C ve 260 °C) ve geniş bir yaşlandırma süresi aralığı (0.3 ila 336 saat) incelenmiştir. Sonuçlar, yaşlandırma sıcaklığı arttıkça kalıntı gerilmelerin azaldığını da göstermiştir [58].

Mohamed ve arkadaşları, gerilim giderme işleminin, bir parçanın uygun bir sıcaklığa eşit şekilde ısıtılması, belirli bir süre boyunca bu sıcaklıkta tutulması ve ardından termal gerilmelerin yeniden oluşmasını önlemek için yavaş

soğutulmasıyla gerçekleştirileceğini not etmişlerdir. Uygun sıcaklığı belirlerken de yüksek sıcaklıklarda (Çözeltiye alma sıcaklığı gibi) kalıntı gerilmelerde büyük bir azalma meydana gelse de malzemenin mekanik özelliklerinde de önemli kayıplar gözlemlenebileceğini ve bunun nedeninin, tavlama işlemi sırasında çökeltilerin irileşerek sertleşme özelliklerini kaybetmesi olacağını bildirmişlerdir. Bu yüksek sıcaklıklarda, gerilme giderme mümkün olmayacağı için, gerilim giderme için gerekli sıcaklık, ikinci faz bileşenlerinin çökelmesini teşvik eden sıcaklıkla örtüşeceği ve bu nedenle, gerilim giderme işlemi daha düşük sıcaklıklarda, yani yaşlandırma sırasında gerçekleştirilmesi gereği sonucuna varmışlardır. Deneysel çalışmalarında, T6 ısıl işlemiyle giderilen kalıntı gerilme miktarı yalnızca sınırlı bir azalma sağlarken, 250°C'de yapılan yaşlandırma işlemi en az %75 oranında kalıntı gerilme gevşemesi sağladığını görmüşlerdir. Yaşlandırma süresi arttıkça, kilitlenmiş kalıntı gerilmelerin büyük bir kısmının tamamen ortadan kaldırılabildiğini not etmişlerdir [72].

Benzer ısıl işlem ile gerilme giderme uygulamaları, farklı imalat yöntemleri ile üretilen alüminyum alaşımları için de uygulanmaktadır. Roveda ve arkadaşları, katmanlı imalat yöntemi ile ürettikleri AlSi10Mg malzemeli parça için düşük sıcaklıkta tavlama ısıl işlemi (265 °C, 1 saat ve 300°C, 2 saat) uygulayıp, kalıntı gerilme gevşemesini (relaxition) X-Işını kırınımı ve nötron kırınımı yöntemleriyle incelemişlerdir. Yorulma çatlağı ilerleme limitinde, 265 °C, 1 saat işleminden sonra %60'a ve 300 °C, 2 saat işleminden sonra %120'ye varan iyileşme görülmüştür. 2. Isıl işlem sürecinde (300 °C, 2 saat) aluminyum matris içindeki silikon partiküllerinin daha homojen dağılmış olması sebebiyle, daha sünek bir yapı oluşturduğu, bu sebeple de bu sünek yapının daha yüksek bir yorulma çatlağı ilerleme limiti verdigi ifade edilmiştir [70].

Robinson ve Tanner, yüksek dayanımlı alüminyum alaşımı (7010) için; Su verme işlemini farklı su sıcaklıklarında ve soğutma işlemlerini farklı fırın sıcaklıklarında yapılmıştır. Ayrıca, yeniden yaşlandırma işlemleri ile standart ısıl işlemlerle (Doğal yaşlandırma, T6, T74 ısıl işlemleri) kalıntı gerilmelerdeki azalma miktarları belirlenmiştir. 175 °C, 200 °C ve 240 °C gibi daha yüksek sıcaklıkları içeren yaşlandırma işlemleri tutarlı olarak %20'den fazla azalma sağlamaktadır [71].

İmalat

Mekanik yöntem, çekiçleme veya titreşimle gerilim giderme yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Üretim aşamasında kalıntı gerilmeleri azaltmanın etkili bir yolu, bilyeli dövme (shot peening), derin haddeleme ve ultrasonik nano-kristal yüzey modifikasyonu (UNSM) gibi mekanik yüzey işlemlerini uygulamaktır. Bu yüzey işlemleri, bası kalıntı gerilmeleri oluşturarak çekme kalıntı gerilmelerinin neden olduğu çatlak başlangıcını geciktirmekte ve böylece yorulma direncini belirli bir ölçüde artırmaktadır [68].

Tabatabaeian ve arkadaşları, kaynak uygulamalarında, kaynak hattı boyunca bası kalıntı gerilmeleri oluşturabilecek yeterli bir yük uygulamanın avantajlarından bahsetmişlerdir. Bu yöntem, tahrip edici çeki kalıntı gerilmelerinin azaltılmasında önemli bir etkiye sahip görünmektedir. Bununla birlikte, uygulanan yükün miktarı da dikkat edilmesi gereken parametrelerdendir, aksi halde yapıda çatlak oluşturacak ya da mevcut çatlakların ilerleyerek yapı hasarına sebep olabilir [1].

Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışma, alüminyum alaşımlı döküm parçalarındaki kalıntı gerilmelerin oluşum sebeplerini, bunların ürün performansına olan etkilerini ve bu gerilmelerin ölçülmesinin önemini ele almaktadır.

Çalışmada, kalıntı gerilimlerin oluşum sebepleri, ürün ömrüne etkileri, bu gerilimlerin ölçüm ve giderilme yöntemleri üzerinde durulmuştur. Çalışmada elde edilen bulgulara göre:

1. Kalıntı gerilmeler, özellikle hızlı üretim süreçleri ve ısıl işlem uygulamaları sırasında ortaya çıkan, dış yük olmaksızın yapıda var olabilen iç gerilmelerdir. Bu gerilmelerin doğru bir şekilde ölçülmesi, ürünün mekanik performansını, mikroyapısal bütünlüğünü ve servis ömrünü doğrudan etkileyen kritik bir faktördür.
2. Kalıntı gerilme ölçüm yöntemleri, deneysel ve analitik teknikler olarak iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Deneysel yöntemler, tahribatlı ve tahribatsız olarak ayrılırken, Delik delme ve X-ışını kırınımı yöntemleri, sırasıyla tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerin en çok tercih edilen örnekleri olarak öne çıkmaktadır.
3. Delik delme yöntemi, tahribatlı yöntemler arasında yaygın kullanımı ve hızlı uygulama avantajı ile dikkat çekmektedir. Ancak, bu yöntemde operatör hatalarının etkisi ve delme sırasında oluşan gerilme etkileri gibi sorunlar göz önünde bulundurulmalıdır.
4. X-ışını kırınımı yöntemi, tahribatsız yöntemler arasında; Hızlı ve yüksek hassasiyetle ölçüm yapabilme, karmaşık malzemeler için uygun olması sebebiyle öne çıkmaktadır. Ancak, yüksek maliyet/ekipman gereksinimi ve uzun süreli ve ileri düzey hazırlık gerektirmektedir.
5. Kalıntı gerilmelerin oluşmasının başlıca nedenleri arasında termal işlemler, kaynak işlemleri, talaşlı imalat ve katmanlı imalat yer almaktadır.
6. Isıl işlemler sırasında meydana gelen ani sıcaklık değişiklikleri, alüminyum alaşımlarındaki kalıntı gerilmeleri artırabilir. Örneğin, T6 ısıl işlemi sırasında su verme ve yapay yaşlandırma aşamaları sırasında gerilmeler oluşabilir. Bu gerilmeler, parçalarda plastik deformasyona yol açabilir.

Kalıntı gerilmelerinin giderilmesi için genellikle ek bir ısıl işlem (gerilme giderme tavı) uygulanır.

7. Talaşlı imalat sırasında yüzeyde oluşan kalıntı gerilmeler, parçalarda distorsiyona ve boyutsal hatalara yol açabilir. Ayrıca, ince cidarlı alüminyum alaşımlarında, işleme sırasında oluşan gerilmeler, parçaların distorsiyonuna ve üretim hatalarına neden olabilir. Bu süreçlerin dikkatle yönetilmesi, ürün ömrünü uzatmaya yardımcı olabilir.
8. Kalıntı gerilmelerinin, özellikle yorulma ve kırılma üzerinde önemli etkileri vardır. Çeki gerilmeleri, malzemelerin yorulma ömrünü kısaltabilirken, bası gerilmeleri bu ömrü uzatabilir. Bu nedenle, kalıntı gerilmelerinin dikkatle yönetilmesi, malzeme ömrünü uzatmada kritik bir faktördür.
9. Endüstriyel uygulamalarda kalıntı gerilmelerin tamamen önlenmesi mümkün olmasa da, azalması ve kontrol altına alınması, maliyet ve parça ömrü açısından önemli faydalar sağlar. Isıl İşlemler adımında; Su verme ve yaşlandırma işlemleri kalıntı gerilmelerin azalmasını sağlar. İmalat İşlemleri adımında; Bilyeli dövme ve yüzey işlemleri kalıntı gerilmelerin azalmasını sağlar.
10. Yeni araştırmalar; tahribatlı ve tahribatsız yöntemleri birlikte kullanabilen hibrit modellerin geliştirilmesine, karmaşık geometriler için 3D tarama destekli analitik/FEM yaklaşımlarındaki varsayım kaynaklı hataları azaltacak yapay zekâ tabanlı tahmin modellerine odaklanabilir. Ayrıca endüstriyel maliyetleri düşürmek için hızlı, yerinde uygulanabilir ve sensör entegrasyonlu kalıntı gerilme ölçüm çözümleri araştırılarak geliştirilebilir.

Kaynaklar

[1] Tabatabaeian, A., Ghasemi, A. R., Shokrieh, M. M., Marzbanrad, B., Baraheni, M., & Fotouhi, M. (2022). Residual Stress in Engineering Materials: A Review. In *Advanced Engineering Materials* (Vol. 24, Issue 3). https://doi.org/10.1002/adem.202100786

[2] Akbari, S., Taheri-Behrooz, F., & Shokrieh, M. M. (2014). Characterization of residual stresses in a thin-walled filament wound carbon/epoxy ring using incremental hole drilling method. *Composites Science and Technology*, *94*, 8–15. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.01.008

[3] Ahn, S. min, Park, S. Y., Kim, Y. C., Lee, K. S., & Kim, J. Y. (2015). Surface residual stress in soda-lime glass evaluated using instrumented spherical indentation testing. *Journal of Materials Science*, *50*(23), 7752–7759. https://doi.org/10.1007/s10853-015-9345-x

[4] Serrano-Munoz, I., Fritsch, T., Mishurova, T., Trofimov, A., Apel, D., Ulbricht, A., Kromm, A., Hesse, R., Evans, A., & Bruno, G. (2021). On the interplay of microstructure and residual stress in LPBF IN718. *Journal of Materials Science*, *56*(9), 5845–5867. https://doi.org/10.1007/s10853-020-05553-y

[5] Carpenter, H. W., Reid, R. G., & Paskaramoorthy, R. (2015). The effect of residual stresses and wind configuration on the allowable pressure of thick-walled GFRP pipes with closed ends. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, *11*(4), 455–462. https://doi.org/10.1007/s10999-014-9280-z

[6] Alipooramirabad, H., Kianfar, S., Paradowska, A., & Ghomashchi, R. (2024). Residual stress measurement in engine block—an overview. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Vol. 131, Issue 1, pp. 1–27). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/s00170-024-13071-3

[7] Carrera, E., Rodríguez, A., Talamantes, J., Valtierra, S., & Colás, R. (2007). Measurement of residual stresses in cast aluminium engine blocks. *Journal of Materials Processing Technology*, *189*(1–3), 206–210. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.01.023

[8] Olson, M. D., DeWald, A. T., & Hill, M. R. (2022). Measurement Layout for Residual Stress Mapping Using Slitting. *Experimental Mechanics*, *62*(3), 393–402. https://doi.org/10.1007/s11340-021-00791-w

[9] Reid, R. G., & Paskaramoorthy, R. (2009). A novel method to measure residual stresses in unidirectional GFRP. *Composite Structures,* Volume 88, Issue 3, May 2009, Pages 388-393. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.04.015

[10] Kandil, F. A., Lord, J. D., Fry, A. T., & Grant, P. v. (2001). *A Review of Residual Stress Measurement Methods-A Guide to Technique Selection. by*.

[11] Li, K., Xiao, B., & Wang, Q. (2009). Residual Stresses in As-Quenched Aluminum Castings. *International Journal of Materials and Manufacturing*, *1*(1), 725–731. https://doi.org/10.2307/26282709

[12] Guo, J., Fu, H., Pan, B., & Kang, R. (2021). Recent progress of residual stress measurement methods: A review. In *Chinese Journal of Aeronautics* (Vol. 34, Issue 2, pp. 54–78). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.10.010

[13] Li, X., Liu, J., Wu, H., Miao, K., Wu, H., Li, R., Liu, C., Fang, W., & Fan, G. (2024). Research progress of residual stress measurement methods. In *Heliyon* (Vol. 10, Issue 7). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28348

[14] Rossini, N. S., Dassisti, M., Benyounis, K. Y., & Olabi, A. G. (2012). Methods of measuring residual stresses in components. In *Materials and Design* (Vol. 35, pp. 572–588). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.022

[15] Wong, W., & Hill, M. R. (2013). Superposition and Destructive Residual Stress Measurements. *Experimental Mechanics*, *53*(3), 339–344. https://doi.org/10.1007/s11340-012-9636-y

[16] Schajer, G. S. (2010). Relaxation Methods for Measuring Residual Stresses: Techniques and Opportunities. *Experimental Mechanics*, *50*(8), 1117–1127. https://doi.org/10.1007/s11340-010-9386-7

[17] Shokrieh, M. M., & Ghasemi K., A. R. (2007). Determination of calibration factors of the hole drilling method for orthotropic composites using an exact solution. *Journal of Composite Materials*, *41*(19), 2293–2311. https://doi.org/10.1177/0021998307075443

[18] Ghasemi, A. R., Taheri-Behrooz, F., & Shokrieh, M. M. (2014). Determination of non-uniform residual stresses in laminated composites using integral hole drilling method: Experimental evaluation. *Journal of Composite Materials*, *48*(4), 415–425. https://doi.org/10.1177/0021998312473858

[19] Magnier, A., Scholtes, B., & Niendorf, T. (2017). Analysis of residual stress profiles in plastic materials using the hole drilling method – Influence factors and practical aspects. *Polymer Testing*, *59*, 29–37. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.12.025

[20] Wu, T., Tinkloh, S. R., Tröster, T., Zinn, W., & Niendorf, T. (2020). Determination and validation of residual stresses in CFRP/metal hybrid components using the incremental hole drilling method. *Journal of Composites Science*, *4*(3). https://doi.org/10.3390/jcs4030143

[21] Flaman, M.T. Brief investigation of induced drilling stresses in the center-hole method of residual-stress measurement. *Experimental Mechanics,* 22, 26–30 (1982). https://doi.org/10.1007/BF02325700

[22] Scafidi, M., Valentini, E., & Zuccarello, B. (2011). Error and uncertainty analysis of the residual stresses computed by using the hole drilling method. *Strain*, *47*(4), 301–312. https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00688.x

[23] Beghini, M., Bertini, L., & Mori, L. F. (2010). Evaluating non-uniform residual stress by the hole-drilling method with concentric and eccentric holes. Part II: Application of the influence functions to the inverse problem. *Strain*, *46*(4), 337–346. https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00684.x

[24] *Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. (2020). ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0837-20

[25] Kim, K., & Jung, H. (2016). Nondestructive Testing of Residual Stress on the Welded Part of Butt-welded A36 Plates Using Electronic Speckle Pattern Interferometry. *Nuclear Engineering and Technology*, *48*(1), 259–267. https://doi.org/10.1016/j.net.2015.10.008

[26] Cao, Q., Li, Y., & Xie, H. (2020). Orientation-Identified virtual fields method combined with moiré interferometry for mechanical characterization of single crystal Ni-based superalloys. *Optics and Lasers in Engineering*, *125*. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105854

[27] Yoon, S., Jung, H. J., Knowles, J. C., & Lee, H. H. (2021). Digital image correlation in dental materials and related research: A review. In *Dental Materials* (Vol. 37, Issue 5, pp. 758–771). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.02.024

[28] Akdeniz, Y. (2012). Taşlama Sonrası Kalın Camsı Metalde Olusan Kalıntı Gerilmenin Delik Delme Yöntemiyle İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[29] Leggatt, R. H., Smith, D. J., Smith, S. D., & Faure, F. (1996). Development and experimental validation of the deep hole method for residual stress measurement. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. Volume 31, Issue 3 https://doi.org/10.1243/03093247V313177

[30] Hacini, L., van Lê, N., & Bocher, P. (2009). Evaluation of residual stresses induced by robotized hammer peening by the contour method. *Experimental Mechanics*, *49*(6), 775–783. https://doi.org/10.1007/s11340-008-9205-6

[31] Prime, M. B. (2001). Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut. *Journal of Engineering Materials and Technology*, *123*(2), 162–168. https://doi.org/10.1115/1.1345526

[32] Ekmekçi, B. (2004). Theoretical and Experimental Investigation of Residual Stresses in Electric Discharge Machining. PhD Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural And Applied Sciences, Ankara

[33] Tebedge, N., Alpsten, G. & Tall, L. (1973) Residual-stress measurement by the sectioning method. *Experimental Mechanics* 13, 88–96. https://doi.org/10.1007/BF02322389

[34] Dege, B. (2013). TiN İnce Filmlerde Bias Voltajına Bağlı Olarak Kalıntı Gerilme Değişiminin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[35] Arnold, D. Gordon., Beauchamp, T. L., & Bowie, N. E. (2014). *Ethical theory and business*. Pearson Education Limited.

[36] Prevéy, P. S. (1986). X-Ray Diffraction Residual Stress Techniques. *Metals Handbook, 10*, American Society for Metals, 1986, pp. 380-392.

[37] Venkata Ramana, P., Madhusudhan Reddy, G., Mohandas, T., & Gupta, A. V. S. S. K. S. (2010). Microstructure and residual stress distribution of similar and dissimilar electron beam welds - Maraging steel to medium alloy medium carbon steel. *Materials and Design*, *31*(2), 749–760. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.007

[38] Baldi, A. (2016). Using Optical Interferometry to Restart the Ring-Core Method. *Experimental Mechanics*, *56*(7), 1191–1202. https://doi.org/10.1007/s11340-016-0163-0

[39] Masláková, K., Trebuňa, F., Frankovský, P., & Binda, M. (2012). Applications of the strain gauge for determination of residual stresses using Ring-core method. *Procedia Engineering*, *48*, 396–401. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.531

[40] Shokrieh, M. M., & Ghasemi K., A. R. (2007). Determination of calibration factors of the hole drilling method for orthotropic composites using an exact solution. *Journal of Composite Materials*, *41*(19), 2293–2311. https://doi.org/10.1177/0021998307075443

[41] Hosseinzadeh, F., Hossain, S., Truman, C. E., & Smith, D. J. (2014). Measurement and Prediction of Residual Stresses in Quenched Stainless Steel Components. *Experimental Mechanics*, *54*(7), 1151–1162. https://doi.org/10.1007/s11340-014-9890-2

[42] Brown, D. W., Holden, T. M., Clausen, B., Prime, M. B., Sisneros, T. A., Swenson, H., & Vaja, J. (2011). Critical comparison of two independent measurements of residual stress in an electron-beam welded uranium cylinder: Neutron diffraction and the contour method. *Acta Materialia*, *59*(3), 864–873. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.09.022

[43] D'Elia, C. R., Carlson, S. S., Stanfield, M. L., Prime, M. B., Araújo de Oliveira, J., Spradlin, T. J., Lévesque, J. B., & Hill, M. R. (2020). Interlaboratory Reproducibility of Contour Method Data Analysis and Residual Stress Calculation. *Experimental Mechanics*, *60*(6), 833–845. https://doi.org/10.1007/s11340-020-00599-0

[44] Wang, H., Kim, D. K., Woo, W., Choi, S. H., Lee, S. Y., & Hwang, S. K. (2020). A new contour method for rapid evaluation of the cross-sectional residual stress distribution in complex geometries using a 3D scanner. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *34*(5), 1989–1996. https://doi.org/10.1007/s12206-020-0420-0

[45] Robinson, J. S., & Redington, W. (2015). The influence of alloy composition on residual stresses in heat treated aluminium alloys. *Materials Characterization*, *105*, 47–55. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.04.017

[46] Javadi, Y., Akhlaghi, M., & Najafabadi, M. A. (2013). Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates. *Materials and Design*, *45*, 628–642. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.038

[47] Zhan, Y., Liu, C., Kong, X., & Lin, Z. (2017). Experiment and numerical simulation for laser ultrasonic measurement of residual stress. *Ultrasonics*, *73*, 271–276. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.08.013

[48] Smith, M., Levesque, J. B., Bichler, L., Sediako, D., Gholipour, J., & Wanjara, P. (2017). Residual stress analysis in linear friction welded in-service Inconel 718 superalloy via neutron diffraction and contour method approaches. *Materials Science and Engineering: A*, *691*, 168–179. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.038

[49] Özel, A., Sadri S. (1998). Effects of Residual Stresses Caused by Different Types of Loading on Silent Chain Strength. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 22 461-470.

[50] Zhang, K., Yang, Z., & Li, Y. (2013). A method for predicting the curing residual stress for CFRP/Al adhesive single-lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *46*, 7–13. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.05.010

[51] Cai, Z., Mayr, P., Fernandez, R., Robbe, S., Usmial, E., Lefebvre, F., To, L., Schajer, G. S., Withers, P. J., & Roy, M. J. (2024). Residual Stress Determination of Cast Aluminium Benchmark Components Using Strain Relief Techniques. *Experimental Mechanics*, *64*(3), 441–452. https://doi.org/10.1007/s11340-024-01033-5

[52] Johnson, E. M., Watkins, T. R., Schmidlin, J. E., & Dutler, S. A. (2012). A benchmark study on casting residual stress. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, *43*(5), 1487–1496. https://doi.org/10.1007/s11661-011-0907-5

[53] Menne, R.J., Weiss, U., Brohmer, A., Egner-Walter A., Weber M., P. Oelling P. (2007) Implementation of Casting Simulation for Increased Engine Performance and Reduced Development Time and Costs-Selected Examples from FORD R&D Engine Projects. (n.d.). *28. Internationales Wiener Motorensymposium.*

[54] Jiang, X., Kong, X., Zhang, Z., Wu, Z., Ding, Z., & Guo, M. (2020). Modeling the effects of Undeformed Chip Volume (UCV) on residual stresses during the milling of curved thin-walled parts. *International Journal of*

Mechanical Sciences, *167*. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105162

[55] Moon, J. H., Baek, S. M., Lee, S. G., Seong, Y., Amanov, A., Lee, S., & Kim, H. S. (2019). Effects of residual stress on the mechanical properties of copper processed using ultrasonic-nanocrystalline surface modification. *Materials Research Letters*, *7*(3), 97–102. https://doi.org/10.1080/21663831.2018.1560370

[56] Robinson, J. S., Tanner, D. A., Truman, C. E., & Wimpory, R. C. (2011). Measurement and Prediction of Machining Induced Redistribution of Residual Stress in the Aluminium Alloy 7449. *Experimental Mechanics*, *51*(6), 981–993. https://doi.org/10.1007/s11340-010-9389-4

[57] Li, P., Maijer, D. M., Lindley, T. C., & Lee, P. D. (2007). Simulating the residual stress in an A356 automotive wheel and its impact on fatigue life. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, *38*(4), 505–515. https://doi.org/10.1007/s11663-007-9050-5

[58] Godlewski, L. A., Su, X., Pollock, T. M., & Allison, J. E. (2013). The effect of aging on the relaxation of residual stress in cast aluminum. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, *44*(10), 4809–4818. https://doi.org/10.1007/s11661-013-1800-1

[59] Zhang, Z., Li, L., Yang, Y., He, N., & Zhao, W. (2014). Machining distortion minimization for the manufacturing of aeronautical structure. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *73*(9–12), 1765–1773. https://doi.org/10.1007/s00170-014-5994-1

[60] Masoudi, S., Amini, S., Saeidi, E., & Eslami-Chalander, H. (2015). Effect of machining-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *76*(1–4), 597–608. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6281-x

[61] Mantle, A. L., & Aspinwall, D. K. (2001). Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 118, Issues 1–3, 3 December 2001, Pages 143-150. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00914-1

[62] Liu, C. R., & Guo, Y. B. (2000). Finite element analysis of the effect of sequential cuts and toolchip friction on residual stresses in a machined layer. In *International Journal of Mechanical Sciences* (Vol. 42).

[63] Prime, M. B. (2018) The Two-Way Relationship Between Residual Stress and Fatigue Fracture. *Fracture, Fatigue, Failure and Damage Evolution, Volume 7*, Springer International Publishing

[64] M, P., Prasad, A. K., & Paswan, M. K. (2020). Durability improvement of axle housings by compressive residual stress inducement. *Applied Materials Today*, *19*. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100584

[65] Kutsal, U., Arslan, Y., Ozaydin, O., Akyildiz, Y., Yigit Kaya, A., & Ertugrul, O. (2024). Heat Treatment Simulation of Aluminum Alloy Wheels and Investigation of Process Steps. *International Journal of Metalcasting*, *18*(2), 1556–1572. https://doi.org/10.1007/s40962-023-01132-4

[66] Lin, J., Ma, N., Liu, X., & Lei, Y. (2020). Modification of residual stress distribution in welded joint of titanium alloy with multi electron beam heating. *Journal of Materials Processing Technology*, *278*. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116504

[67] Yang, X., Zhu, J., Nong, Z., Lai, Z., & He, D. (2013). FEM simulation of quenching process in A357 aluminum alloy cylindrical bars and reduction of quench residual stress through cold stretching process. *Computational Materials Science*, *69*, 396–413. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.11.024

[68] Kattoura, M., Telang, A., Mannava, S. R., Qian, D., & Vasudevan, V. K. (2018). Effect of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on residual stress, microstructure and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy. *Materials Science and Engineering: A*, *711*, 364–377. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.043

[69] Wyatt, J. E., Berry, J. T., & Williams, A. R. (2007). Residual stresses in aluminum castings. *Journal of Materials Processing Technology*, *191*(1–3), 170–173. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.018

[70] Roveda, I., Serrano-Munoz, I., Haubrich, J., Requena, G., & Madia, M. (2023). Influence of post-process heat treatments on the fatigue crack propagation behaviour of a PBF-LB/M AlSi10Mg alloy. *International Journal of Fatigue*, *175*. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107808

[71] Robinson, J. S., & Tanner, D. A. (2003). Residual stress development and relief in high strength aluminium alloys using standard and retrogression thermal treatments. *Materials Science and Technology*, *19*(4), 512–518. https://doi.org/10.1179/026708303225001939

[72] Mohamed, Serageldin & Samuel, A. & Doty, H. & Valtierra, Salvador & Samuel, Fawzy. (2020). Generation and Relaxation of Residual Stresses in Automotive Cylinder Blocks. *Automotive System Engineering-New Methods and Optimal Solutions* 10.5772/intechopen.93664.