

15-5 PH Çelik Malzemesinin Kriyojenik Talaşlı İmalat Sürecinde Yüzey Bütünlüğü Analizi

Erkin DUMAN
Mak. Müh.
İstanbul

Yusuf KAYNAK
Doç. Dr.

Marmara Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
İstanbul

Havacılık ve savunma sanayilerinde kullanılan birçok parçanın üretiminde talaşlı imalat yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilen imalat süreçlerinde meydana gelen termal ve mekanik etkiler imal edilen malzemelerde mikroyapısal dönüşümlere sebep olabilmekte olup bu durum nihai ürünün yorulma ömrü, korozyon direnci ve fonksiyonel performansını etkileyebilmektedir. Bu çalışmada 15-5 PH çelik malzemesinin kriyojenik talaşlı imalat sürecinin yüzey bütünlüğü karakteristiklerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular kuru ve kesme sıvısı kullanılarak yapılan talaş kaldırmadan elde edilen bulgularla karşılaştırılmıştır. Düşük kesme hızlarında kriyojenik soğutma yöntemi ile gerçekleştirilen deneyler neticesinde mikroyapıda plastik deformasyon ve bunun sonucu olarak mikrosertlik artışı meydana gelmiş, kriyojenik koşullar altında kesici takımında meydana gelen lokal kırılmalar diğer kesme yöntemlerine oranla daha pürüzlü bir yüzey oluşumuna neden olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kriyojenik Talaşlı İmalat, Yüzey Bütünlüğü, Martenzitik Paslanmaz Çelik

GİRİŞ

Paslanmaz çelikler yüksek mukavemet, korozyon direnci ve tokluk gibi özelliklerinden dolayı pek çok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadırlar [1]. Martenzitik paslanmaz çelikler grubunda yer alan ve bileşiminde ~% 3 bakır (Cu) içeren 15-5 PH malzemesi martenzit matris içerisinde dağılmış bakır (Cu) partiküllerinin çökmesi sonucu sertleştirilir [2]. Çökme sertleştirilmesi işlemi ile oldukça yüksek mukavemet değerine sahip olan 15Cr-5Ni PH çeliği sahip olduğu yüksek mukavemet özelliklerinin yanı sıra yüksek kaynak edilebilme, korozyon direnci [2] ve yüksek sıcaklıklarda bahsi geçen özelliklerini muhafaza edebilme kabiliyeti [3] dolayısıyla havacılık ve savunma sanayilerinde modern savaş uçaklarının motor [4] ve bağlantı elemanlarında [5] kullanılmaktadır. Bahsi geçen uygulama alanları düşünüldüğünde bu malzemenin nihai boyut ve toleranslarına getirilmesinde faydalanılan imalat operasyonlarından birisi de talaşlı imalat yöntemidir [3,5,6]. Öte yandan şekillendirilebilme kabiliyetlerinin düşük olması 15-5 PH malzemesinin kesilmesi zor malzemeler grubunda yer almasına neden olmaktadır [7]. Bu malzemelerin talaşlı imalat sürecinde oluşan yüksek kesme kuvvetleri (mekanik etki), kesme sıcaklığı (termal etki), kesici takım aşınması vb. etkiler nihai ürünün yüzey ve yüzey altı özelliklerini etkileyebilmekte olup kimyasal, mekanik ve fiziksel özelliklerini değiştirebilmektedir [8, 9].

Literatürde ve endüstride kesilmesi zor malzemelerin talaşlı imalat performansını geliştirmek amacıyla kesme sıvısı, yüksek basınçlı soğutma (HPC), minimum miktarda yağlama (MQL), hava ile soğutma, kriyojenik soğutma vb. pek çok soğutucu ve yağlayıcı yöntemler kullanılmaktadır [10]. Bu yöntemler içerisinde kriyojenik soğutma yöntemi kesme performansını arttırmasının [11] ve yüzey bütünlüğünü iyileştirmesinin [12] yanı sıra çevre ve insan sağlığı açısından faydalı kabul edilmektedir ve dolayısıyla yaygın olarak tercih edilmektedir [13].

Literatür incelendiğinde 15-5 PH malzemesinin talaşlı imalat süreci ve yüzey bütünlüğü ile ilgili olarak sınırlı sayıda çalışma yer aldığı görülmekte olup [5, 7, 9, 14-16], bu çalışmalar içerisinde kriyojenik soğutucu (sıvı azot, karbondioksit vb.) yöntemlerine başvurulmadığı görülmektedir. Bu çalışmalar içerisinde Mondelin ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmalarda [5, 6], 15-5 PH çeliğinin kesme sıvısı yöntemi ile gerçekleştirilen tornalama operasyonu sonucu mikroyapıda beyaz tabaka oluşumu meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Benzer bir çalışma Chomienne ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiş, 15-5 PH çeliğinin talaşlı imalat sürecinin yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilme oluşumu üzerine etkilerini incelemişlerdir [14]. İşlenmiş yüzeyde kalıntı gerilme oluşumu meydana geldiği gözlemlenmiştir [17].

Literatür incelendiğinde bu malzemenin talaşlı imalat sürecinde kriyojenik soğutma koşulu kullanılarak gerçekleştirilen talaşlı imalat uygulamasının yer almadığı görülmektedir.

Bu çalışmada havacılık ve savunma sanayilerinde kullanılan 15-5 PH paslanmaz çelik malzemesinin kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik soğutma (sıvı karbondioksit ile) yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen talaşlı imalat sürecinde iş parçasının yüzey ve yüzey altında meydana gelen yüzey pürüzlülüğü, mikroyapı deformasyonu, mikrosertlik değişimi ve faz dönüşümü incelenmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmalar kapsamında Ø25x110 mm boyutlarında hazırlanan, H1025 standartlarında çökeltme sertleştirilmesi işlemi uygulanmış ve 310±5 Hv sertliğine sahip 15-5 PH martenzitik paslanmaz çelik malzemeler kullanılmıştır. 15-5 PH iş parçası malzemesinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir. Çalışma kapsamında, talaşlı imalat testleri 18,5 kW motor gücüne sahip Doosan Puma CNC torna tezgahı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de kuru (a), kesme sıvısı (b) ve kriyojenik (c) yöntemler ile gerçekleştirilen deneylere ait deneysel düzenek gösterilmektedir. Kesme deneylerinde CNMA 120408 K68 kaplamasız karbür kesici uçlar kullanılmıştır. Düşük, orta ve yüksek deformasyon hızlarının iş parçası mikroyapısında neden olabileceği değişimleri belirleyebilmek amacıyla kesme hızları geniş bir aralıkta (30-60-120-240 m/dak) olarak seçilmiş, ilerleme ve talaş derinliği değerleri sırasıyla 0,12 mm/dev ve 1,2 mm olarak sabit tutulmuştur. Kuru kesme, kesme sıvısı ve kriyojenik (sıvı karbondioksit ile) kesme koşulları kullanılarak gerçekleştirilen deneylere ait deneysel şema Tablo 2 'de gösterilmektedir. Çalışmalar kapsamında kullanılan soğutucu ve yağlayıcı sistemlerden kesme sıvısı ile gerçekleştirilen deneylerde sıvı çıkış basıncı 5-10 bar aralığında ölçülmüştür. Deneyler süresince kriyojenik (sıvı CO₂) sistemin çalışma basıncı, literatür [18] ve karbondioksit faz diyagramı [18] dikkate alınarak, regülatör vasıtasıyla 45-50 bar aralığında düzenlenmiştir.

Tablo 1. 15-5 PH iş parçası kimyasal bileşim ve mekanik özellikleri

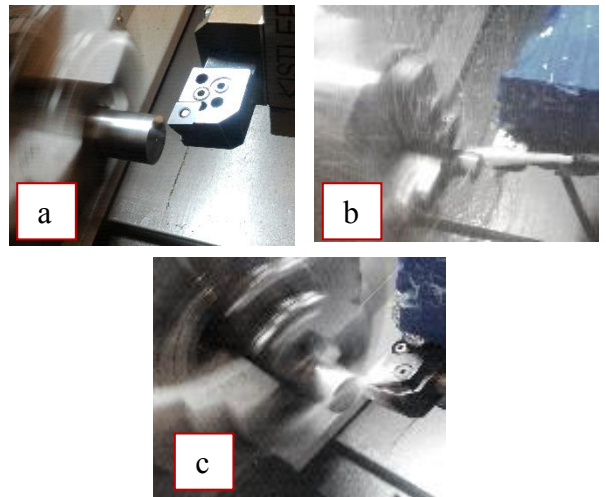
Kimyasal Bileşim	% Cu	% Mn	% Cr	% Ni
15-5 PH	3,1	0,78	15,24	4,82
Mekanik Özellikler	Akma Gerilmesi [19]	Çekme Gerilmesi [19]	% Uzama	Sertlik [20]
15-5 PH	1000	1200	12	310

Farklı kesme koşulları ve kesme hızına bağlı olarak iş parçası işlenmiş yüzeyinde meydana gelen ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerlerinin ölçülmesinde Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü cihazı kullanılmıştır. Faz dönüşüm analizi kapsamında kesme bölgesinde meydana gelen kesme sıcaklığı değerlerinin ölçümünde ise Optris PI 400 infrared kamera kullanılmış, yayım kabiliyeti (emissivity) değeri 0,8 [21] olarak seçilmiştir.

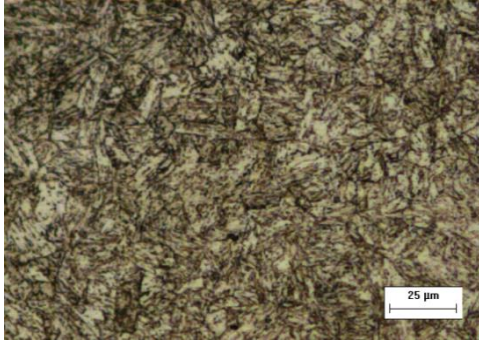
Tablo 2. Deney parametreleri

Kesme Hızı (m/dak) V_c	30, 60, 120, 240
Talaş Derinliği (mm) a_p	1.2
İlerleme miktarı (mm/dev) f	0.12
Kesme Koşulları	Kuru, Kesme Sıvısı, CO ₂
Kesici Uç	CNMA 120408 K68

Kesme sürecinin iş parçası yüzeyi ve yüzeye yakın bölgelerinde neden olduğu mikroyapısal değişimlerin incelenmesinde işlenmiş parçalardan kesilen ve soğuk kalıba alınan numuneler konvansiyonel yöntemler kullanılarak zımparalanmış, parlatılmış ve ardından dağlanarak mikroyapıda meydana gelen deformasyon Olympus BX51M optik mikroskop cihazı kullanılarak gözlemlenmiştir. İş parçasının işlem görmemiş mikroyapı görüntüsü Şekil 2'de gösterilmektedir. İşlenmiş numunelerin mikrosertlik değişimi yüzeyden itibaren 200 µm derinlik boyunca Future-Tech FM3 mikrosertlik cihazı kullanılarak ve 25 g yük, 15 saniye uygulanarak ölçülmüştür. Bu çalışmanın bir diğer çıktısı olarak ölçülen işlenmiş yüzeylere ait kristal yapıdaki değişim ve faz dönüşüm analizleri 1,54060 Å dalga boyuna sahip CuK α katot kullanılarak Bruker XRD cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Deneysel düzenek; kuru kesme (a), kesme sıvısı (b) ve kriyojenik kesme (c)



Şekil 2. 15-5 PH çeliği mikroyapı görüntüsü

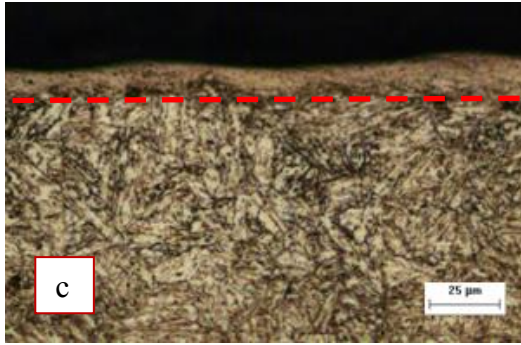
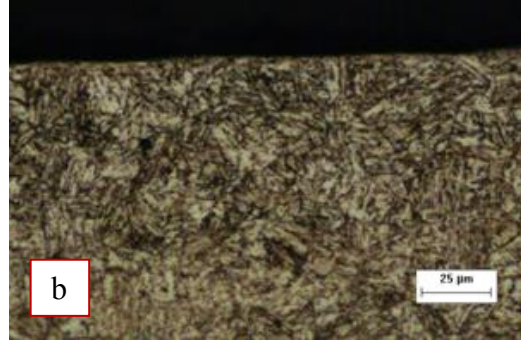
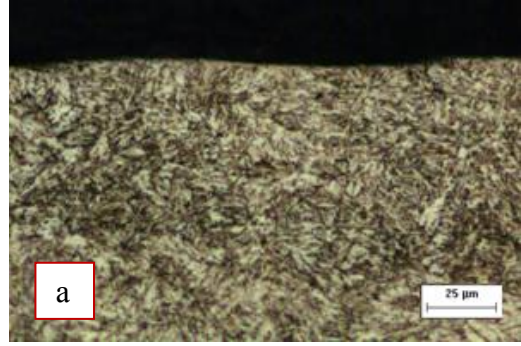
DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Mikroyapı Deformasyonu

Şekil 3'te kuru (a), kesme sıvısı (b) ve kriyojenik (c) kesme koşulları kullanılarak 30 m/dak kesme hızı değerinde gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen mikroyapı görüntüleri gösterilmektedir. Kuru ve kesme sıvısı yöntemleri kullanılarak işlenmiş iş parçalarına ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde optik mikroskop altında tane küçülmesi vb. etkiler gözlemlenmezken, kriyojenik yöntem ile işlenmiş iş parçası mikroyapısında $\sim 15-20 \mu\text{m}$ etkilenmiş alan meydana geldiği görülmektedir (Şekil 3 (c)).

Kriyojenik koşullar altında mekanik etkilerin daha baskın olmasının bir sonucu olarak meydana gelen beyaz tabaka (white layer) oluşumu (temperlenmemiş martenzit), küçülmüş tanelere veya faz dönüşümüne işaret edebilmektedir [22]. Öte yandan soğuk deformasyon ve kriyojenik sıcaklıkların bir sonucu olarak yapıda martenzit \rightarrow östenit faz dönüşümü meydana gelmesi muhtemeldir. Şekil 5'te gösterilen mikrosertlik değerinde meydana gelen artış, tane küçülmesine işaret etmektedir. Şekil 4'te 240 m/dak kesme hızı değerinde kuru (a), kesme sıvısı (b) ve kriyojenik (c) koşullar altında işlenmiş iş parçalarına ait mikro yapı görüntüleri gösterilmektedir.

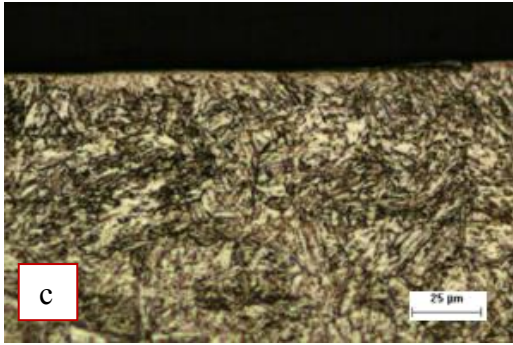
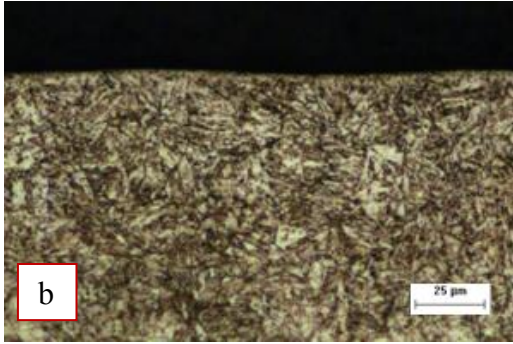
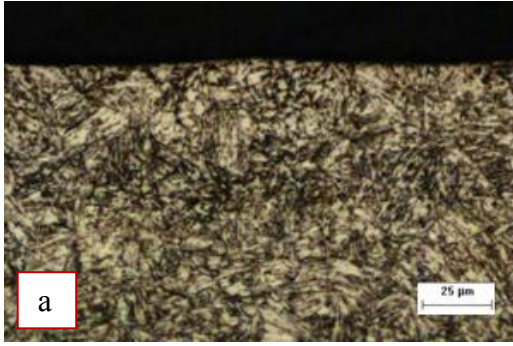
Şekil 4'te görüldüğü gibi kuru ve kesme sıvısı yöntemleri ile gerçekleştirilen talaşlı imalat süreci sonucu optik mikroskop incelemesi altında 30 m/dak kesme hızı değerinde elde edilen mikroyapı görüntülerine benzer şekilde etkilenmiş alan net olarak görülememektedir. Kriyojenik koşullar altında ise $\sim 3-5 \mu\text{m}$ derinliğinde etkilenmiş alan meydana geldiği anlaşılmaktadır. Görüldüğü gibi kriyojenik soğutma yöntemi düşük (30 m/dak) ve yüksek (240 m/dak) kesme hızlarında mikroyapıda tane deformasyonuna neden olmuştur. Ancak yüksek kesme hızlarında artan sıcaklık yüzey alanında meydana gelen plastik deformasyonun azalmasına neden olmaktadır. Bu durumda etkilenmiş derinlik düşük kesme hızına nazaran daha az olmaktadır.



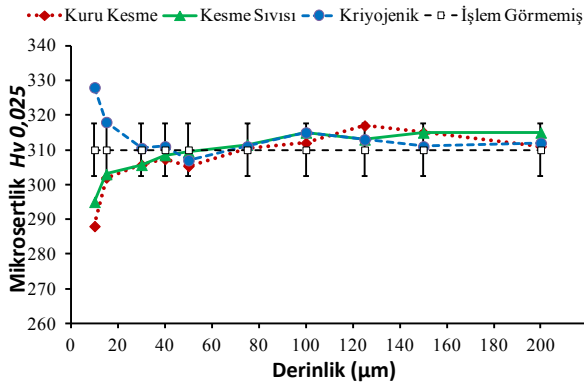
Şekil 3. 30 m/dak kesme hızı değerinde kuru(a), kesme sıvısı(b) ve kriyojenik(c) koşullar altında işlenmiş iş parçalarına ait mikroyapı görüntüleri

Mikrosertlik Değişimi

Talaşlı imalat prosesi termal ve mekanik etkilerin eş zamanlı olarak meydana geldiği ve bu süreç neticesinde iş parçasının yüzey ve yüzey altı özelliklerinde değişimin oluşabildiği bir üretim yöntemidir [12,23,24]. İşlenmiş parçaların mikrosertlik değerlerinde meydana gelen değişimler nihai ürünün fonksiyonel özelliklerinin kontrollünde önemli bir parametre olarak ön plana çıkmaktadır [24]. Şekil 5'te düşük kesme hızlarında (30 m/dak) kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik (sıvı CO₂) koşullar kullanılarak işlenmiş iş parçalarının yüzey ve yüzey altında meydana gelen mikrosertlik değişimleri gösterilmektedir.

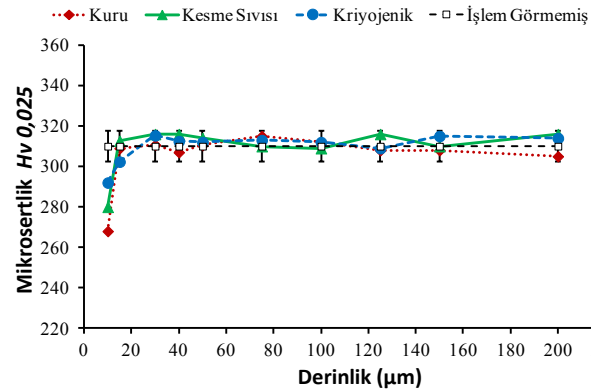


Şekil 4. 240 m/dak kesme hızı değerinde kuru(a), kesme sıvısı(b) ve kriyojenik (c) koşullar altında işlenmiş iş parçalarına ait mikroyapı görüntüleri



Şekil 5. 30 m/dak kesme hızı değerinde kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik koşullar ile işlenmiş iş parçalarında meydana gelen mikrosertlik değişimi

Şekilde görüldüğü gibi düşük kesme hızlarında (30 m/dak) her üç kesme koşulu kullanılarak işlenmiş iş parçalarının yüzeyden itibaren 10 µm bir derinlikte mikrosertlik değişimi meydana geldiği anlaşılmaktadır. Kuru kesme esnasında kesme bölgesinde talaş üzerinden ölçülen maksimum sıcaklık değeri 321°C olarak kaydedilmiştir. Bu sıcaklığın bir sonucu olarak işlenmiş iş parçası yüzeyinden itibaren 10 µm derinlikte bir alanda mikrosertlik değerinde %7 azalma meydana gelmiştir. Öte yandan kriyojenik koşul altında ise belirtilen maksimum sıcaklık değeri 110 °C olarak kaydedilmiş, işlenmiş iş parçasının sıcaklığı ise -20 °C olarak ölçülmüştür. Kriyojenik talaşlı imalat süreci 15-5PH martenzit çeliği malzemesinin yüzey altında pekleşme etkisine neden olmuştur. Bu koşullar altında soğuk deformasyonun bir sonucu olarak mikrosertlik değerinin işlenmiş yüzeyden itibaren 10 µm bir derinlikte %6 artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Mikrosertlik değerinde meydana gelen bu artış, malzemenin aşınma direnci, yorulma ve servis ömrünü etkilemektedir [25]. Şekil 6'da yüksek kesme hızlarında (240 m/dak) işlenmiş iş parçalarının mikrosertlik değerlerinde meydana gelen değişimler gösterilmektedir.

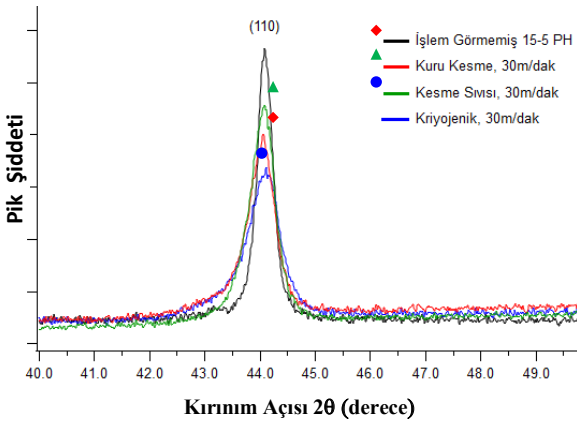


Şekil 6. 240 m/dak kesme hızı değerinde kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik koşullar kullanılarak işlenmiş iş parçalarında meydana gelen mikrosertlik değişimi

Şekilde görüldüğü gibi kesme hızının artması ve buna bağlı olarak kesme bölgesinde ısı konsantrasyonunun artması ile birlikte her üç kesme yöntemi ile işlenmiş iş parçalarının mikrosertlik değerlerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Mikrosertlik değerleri kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik koşullar için işlenmiş yüzeyden itibaren 10 µm derinlikte sırasıyla %14, %9, %6 oranlarında azalmıştır. Kesme bölgesinde ölçülen maksimum talaş sıcaklık değerleri kuru kesme için 391 °C olarak ölçülürken, kriyojenik yöntemde ise 178 °C olarak ve işlenmiş iş parçasının sıcaklık değeri 18 °C olarak ölçülmüştür.

Faz Dönüşüm Analizi

Talaşlı imalat sürecinde meydana gelen yüksek ısı oluşumu, plastik deformasyon ve gerilmelerin bir sonucu olarak işlenmiş parçalarda faz dönüşümü meydana gelebilmektedir [12]. Özellikle düşük kesme hızlarında (30 m/dak) kriyojenik koşullar altında mikroyapıda görülen etkilenmiş alan (Şekil 3c), mikrosertlik değerinde meydana gelen artış (Şekil 5), tane küçülmesi ve beyaz tabaka oluşumu gibi etkiler, işlenmiş iş parçasında martenzit-östenit faz dönüşümüne yol açmış olabilir. Bahsi geçen etkilerin ve kristal kafeste meydana gelen deformasyonun anlamlandırılabilmesinde X-Ray faz analizi önemli rol oynamaktadır. Şekil 7’de ön işlem görmemiş iş parçası ve kuru, kesme sıvısı, kriyojenik kesme koşulları kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucu işlenmiş parçaların kristalografik dokusundaki değişim ve faz dönüşümü gösterilmektedir.



Şekil 7. 30 m/dak kesme hızı değerinde kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik koşullar altında işlenmiş iş parçalarının kristal dokusunda meydana gelen değişim

Görüldüğü gibi 15-5 PH malzemesine ait $2\theta = 44^\circ$ ve (110) düzleminde bulunan Hacim Merkezli Kübik (HMK) yapıdaki martenzit ana pikinde değişken soğutucu ve yağlayıcılar ile gerçekleştirilen imalat operasyonu sonucu martenzit-östeniz faz dönüşümü gerçekleşmediği görülmektedir. Kriyojenik koşullar altında yoğun mekanik etkilere bağlı olarak pik büyüklüğünde (intensity) belirgin bir azalma görülmektedir.

Kesme sürecinde kuru ve kriyojenik koşullar ile gerçekleştirilen deneyler esnasında meydana gelen kesme sıcaklıklarının 15-5PH çeliği için geçerli olan östenit başlangıç ve bitiş sıcaklık değerlerine ($A_s=462^\circ\text{C}$ ve $A_f=645^\circ\text{C}$) ulaşamadığı görülmektedir. Kesme sıvısı yönteminde ise kesme bölgesinde sıcaklık ölçülemediği olup, meydana gelen kesme sıcaklığı değerinin kuru ve kriyojenik kesme

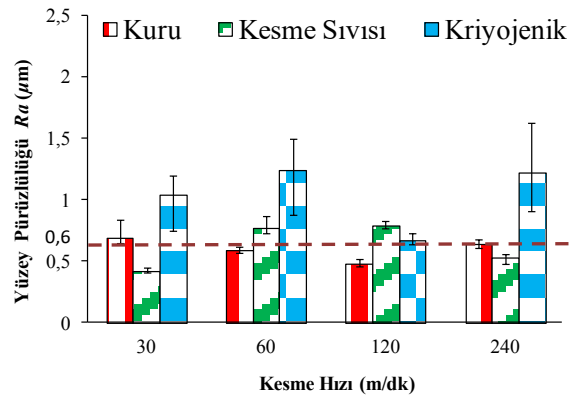
koşulları ile elde edilen sıcaklık değerleri arasında olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda ölçülen kesme sıcaklığı ve sertlik değerlerinde meydana gelen değişimlerin bu koşullar altında 15-5 PH malzemesinde doğrudan bir faz dönüşümüne neden olmadığı görülmektedir.

Yüzey Pürüzlülüğü

Talaşlı imalat yöntemi ile işlenmiş parçaların yüzey pürüzlülüğü, nihai ürünün yorulma ve korozyon özelliklerine doğrudan etki edebilmesinden [12] dolayı pek çok araştırmacı tarafından en çok odaklanılan yüzey bütünlüğü karakteristiklerinden birisi olarak ön plana çıkmaktadır [26].

Havacılık ve savunma sanayilerinde kullanılan ve birbirleri ile temas halinde çalışan hassas parçaların çoğu zaman belirli bir yüzey kalitesi değerini aşmaması tasarım kriterleri açısından tercih edilir.

Şekil 8’de farklı kesme hızı ve kesme koşulları kullanılarak işlenmiş iş parçalarının ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri gösterilmektedir.



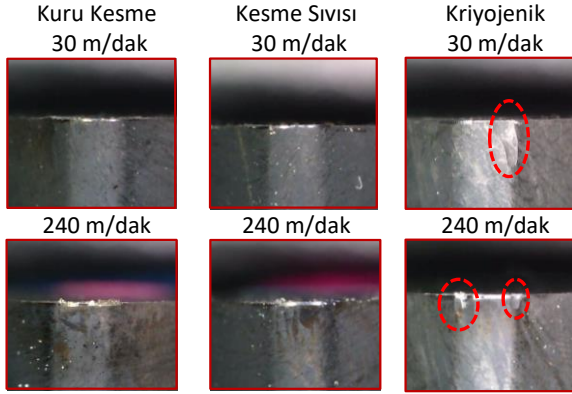
Şekil 8. Farklı kesme parametre ve koşulları kullanılarak işlenmiş iş parçalarında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü

Kuru ve kesme sıvısı yöntemleri ile farklı kesme hızı değerlerinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin $0,8 \mu\text{m}$ değerinin altında olduğu görülmektedir. Ayrıca tüm kesme koşulları için oluşan yüzey pürüzlülüğü değerleri ile kesme hızı arasında net bir korelasyonun oluşmadığı görülmüştür. Teorik olarak değerlendirildiğinde yüzey pürüzlülüğü değerinin ilerleme (f) ve kesici takım burun radiusüne (r_c) bağlı olduğu bilinmektedir [27]. Deneysel yüzey pürüzlülüğü değerleri denklem 1’de [27] yer alan ampirik olarak geliştirilmiş ifade kullanılarak değerlendirilmiştir.

$$R_a = \frac{0.0321xf^2}{r_c} \quad (1)$$

Bu denklem aracılığıyla, çalışmada kullanılan ilerleme (0,12 mm/dev) ve kesici uç burun radiusü (0,8 mm) parametreleri kullanılarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri $\sim 0,6 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmaktadır. Kuru ve kesme sıvısı yöntemleri kullanılarak elde edilen deneysel yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, teorik olarak hesaplanan değere yakın olduğu görülmektedir. Kriyojenik soğutma yöntemi ile işlenmiş parçalarda meydana gelen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ise genel olarak $1 \mu\text{m}$ değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Kriyojenik talaşlı imalat sürecinin yüzey pürüzlülüğünde neden olduğu artışın anlamlandırılabilmesi aşamasında kesici takımında meydana gelen aşınma mekanizmaları önemli bir rol oynamaktadır.

Şekil 9'da 30 ve 240 m/dak kesme hızı değerlerinde kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucu kesici takım burun bölgelerinde meydana gelen aşınma mekanizmalarına ait görüntüler gösterilmektedir.



Şekil 9. 30 ve 240 m/dak kesme hızı değerlerinde kuru, kesme sıvısı ve kriyojenik yöntemler ile gerçekleştirilen deneyler sonucu kesici takım burun bölgelerine ait görüntüler

Kriyojenik yöntem ile gerçekleştirilen deneylerde kesici takım burun bölgesinde lokal kırılmaların meydana geldiği görülmekte ve bunun bir sonucu olarak burun yarıçap bölgesinde hacimsel anlamda meydana gelen değişimin yüzey pürüzlülüğü değerinde artışa yol açtığı görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada havacılık ve savunma sanayilerinde kullanılan 15-5 PH martenzit çelik malzemesinin kriyojenik talaşlı imalat sürecinin yüzey bütünlüğü (surface integrity) karakteristiklerinden mikroyapı deformasyonu, mikrosertlik değişimi, yüzey pürüzlülüğü ve faz dönüşümü üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiş, elde edilen bulgular

literatür ve endüstride yaygın olarak kullanılan kuru ve kesme sıvısı yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

Kriyojenik soğutma koşulu ile özellikle düşük kesme hızı (30 m/dak) değerinde gerçekleştirilen deneyler sonucu işlenmiş iş parçası mikroyapısında yüzeyden itibaren $\sim 15-20 \mu\text{m}$ derinliğe kadar olan bir alanda tane deformasyonu meydana gelmiştir. Kuru ve kesme sıvısı yöntemlerinde ise optik mikroskop altında etkilenmiş alan görülebilmiştir. Yüksek kesme hızlarında (240 m/dak) ise etkilenmiş alan net olarak gözlemlenememiştir. Bu bağlamda taramalı elektron mikroskopu (SEM) gibi daha ileri yöntemlere başvurularda deforme olmuş taneler görülebilir.

Çalışma kapsamında incelenen bir diğer yüzey bütünlüğü karakteristiği işlenmiş parçaların mikrosertlik değişimi olmuştur. Düşük kesme hızı (30 m/dak) değerinde kriyojenik talaşlı imalat sürecinin bir sonucu olarak $10 \mu\text{m}$ derinlikte mikrosertlik değerinde artış meydana gelmiş, kuru ve kesme sıvısı yöntemlerinde ise kesme bölgesinde meydana gelen yüksek kesme sıcaklığının sonucu olarak mikrosertlik değerinde azalma meydana gelmiştir. Yüksek kesme hızlarında (240 m/dak) ise her üç kesme koşulu için termal yumuşamaya bağlı olarak mikrosertlik değerinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Mikroyapı ve mikrosertlik değerlerinde meydana gelen değişimlerin işlenmiş iş parçalarında muhtemel martenzit-östenit faz dönüşümüne yol açmış olabileceği için X-ray analizi gerçekleştirilmiştir. (110) hacim merkezli kübik (HMK) yapı korunurken, mekanik etkilerin bir sonucu olarak pik şiddetlerinde azalma ve tane küçülmesinin bir sonucu olarak piklerde yanlara doğru genişleme (peak broadening) gözlemlenmiştir. Piklerde meydana gelen değişim doğrudan bir faz dönüşümü meydana gelmediğini göstermesine karşın, yapıda yüzdesel anlamda kalıntı östenit oluşumu daha ileri analizler ile belirlenebilecektir.

Gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü analizlerinde tüm kesme koşulları için yüzey pürüzlülüğü değerlerinde meydana gelen değişim ile kesme hızı arasında korelasyonun bulunmadığı gözlemlenmiştir. Kriyojenik soğutma yöntemi ile gerçekleştirilen deneyler neticesinde kesici takım burun bölgesinde meydana gelen lokal kırılmaların yüzey pürüzlülüğünde artışa yol açtığı gözlemlenmiştir. Kriyojenik koşullarda yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen bu artış önleyebilmek amacıyla daha büyük burun yarıçapına sahip kesici uçlar ile işlem yapılmasının bu şartlar altında daha olumlu sonuçlar vereceği bulgusuna ulaşılmıştır.

ANALYSIS OF SURFACE INTEGRITY IN CRYOGENIC MACHINING OF 15-5 PH STEEL

Machining process is widely used in production of many components which are used in aerospace and defense industries. The thermal and mechanical effects that occur during the manufacturing processes can cause microstructural transformations in the manufactured materials and this may affect the fatigue life, corrosion resistance and functional performance of the final product. In this study, the effects of cryogenic machining process of 15-5 PH steel on surface integrity were investigated experimentally. The obtained results were compared with dry and flood cutting strategies. In cryogenic machining at low cutting speeds, microhardness increases on account of grain deformation of microstructure. In cryogenic conditions, poor surface roughness occurred due to the local fracture on the nose region of the cutting tool.

Keywords: Cryogenic Machining, Surface Integrity, Martensitic Steel

KAYNAKÇA

- Stephenson DA, Agapiou JS. *Metal cutting theory and practice*: CRC press; 2016.
- Lee C. Phase transformations accompanying low-temperature carburization of martensitic stainless steels under paraequilibrium conditions: Case Western Reserve University; 2012.
- Kumar A, Balaji Y, Prasad NE, Gouda G, Tamilmani K. Indigenous development and airworthiness certification of 15-5 PH precipitation hardenable stainless steel for aircraft applications. *Sadhana* 2013,**38**:3-23.
- Garrison W. Ultrahigh-strength steels for aerospace applications. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society* 1990,**42**:20-24.
- Mondelin A, Valiorgue F, Rech J, Coret M, Feulvarch E. Modeling of surface dynamic recrystallisation during the finish turning of the 15-5PH steel. *Procedia CIRP* 2013,**8**:311-315.
- Mondelin A, Valiorgue F, Coret M, Feulvarch E, Rech J. Surface integrity prediction in finish turning of 15-5PH stainless steel. *Procedia Engineering* 2011,**19**:270-275.
- Ganta V, Chakradhar D. Multi objective optimization of hot machining of 15-5PH stainless steel using grey relation analysis. *Procedia Materials Science* 2014,**5**:1810-1818.
- Okushima K, Kakino Y. Study on the generating process of machined surface. *Bulletin of JSME* 1969,**12**:141-148.
- Chomienne V, Verdu C, Rech J, Valiorgue F. Influence of surface integrity of 15-5PH on the fatigue life. *Procedia Engineering* 2013,**66**:274-281.
- Debnath S, Reddy MM, Yi QS. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. *Journal of cleaner production* 2014,**83**:33-47.
- Kaynak Y, Karaca H, Noebe R, Jawahir I. Tool-wear analysis in cryogenic machining of NiTi shape memory alloys: A comparison of tool-wear performance with dry and MQL machining. *Wear* 2013,**306**:51-63.
- Kaynak Y, Lu T, Jawahir I. Cryogenic machining-induced surface integrity: a review and comparison with dry, MQL, and flood-cooled machining. *Machining science and technology* 2014,**18**:149-198.
- Pereira O, Rodríguez A, Fernández-Abia A, Barreiro J, de Lacalle LL. Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304. *Journal of Cleaner Production* 2016,**139**:440-449.
- Chomienne V, Valiorgue F, Rech J, Verdu C. Influence of Part's Stiffness on Surface Integrity Induced by a Finish Turning Operation of a 15-5PH Stainless Steel. *Procedia CIRP* 2016,**45**:19-22.
- Palanisamy D, Senthil P. Machinability Study of Laser Surface Treated 15-5 PH Stainless Steel. *Materials and Manufacturing Processes* 2016,**31**:1755-1762.
- Braghini Junior A, Diniz AE, Filho FT. Tool wear and tool life in end milling of 15-5 PH stainless steel under different cooling and lubrication conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2009,**43**:756-764.
- Chomienne V, Valiorgue F, Rech J, Verdu C. Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2016,**13**:90-96.
- Machai C, Biermann D. Machining of β -titanium-alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: Cooling with carbon dioxide snow. *Journal of Materials Processing Technology* 2011,**211**:1175-1183.
- Montevecchi F, Grossi N, Takagi H, Scippa A, Sasahara H, Campatelli G. Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy. *Procedia CIRP* 2016,**46**:476-479.
- Holland RA, Kirschvink JL, Doak TG, Wikelski M. Bats use magnetite to detect the earth's magnetic field. *PLoS One* 2008,**3**:e1676, 1671-1676.
- Nayak S, Yip K, Ahrens L, Montag C. Calculation of mechanical and thermal stress in

- the RHIC beam dump windows. In: CA/AP/456 2012 by IEEE—cc Creative Commons Attribution 3.0 (CC BY 3.0)—cc Creative Commons Attribution 3.0 (CC BY 3.0); 2012.
22. Li J, Umemoto M, Todaka Y, Tsuchiya K. A microstructural investigation of the surface of a drilled hole in carbon steels. *Acta Materialia* 2007,**55**:1397-1406.
 23. Pusavec F, Hamdi H, Kopac J, Jawahir I. Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy—Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology* 2011,**211**:773-783.
 24. M'Saoubi R, Outeiro J, Chandrasekaran H, Dillon Jr O, Jawahir I. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. *International Journal of Sustainable Manufacturing* 2008,**1**:203-236.
 25. Jawahir I, Pu Z, Yang S, Rotella G, Kaynak Y, Lu T, *et al.* Cryogenic processing of materials for enhanced product life, performance and sustainability. In: *Proc. of 15th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, Wollongong, Australia*; 2012.
 26. Ulutan D, Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2011,**51**:250-280.
 27. Groover MP. *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*: John Wiley & Sons; 2007.