

Talaşlı İmalat Süreçlerinde Kriyojenik Soğutma Uygulamaları Üzerine Bir Araştırma

Necati Uçak ve *Adem Çiçek

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Özet

Günümüzde, kesme performansını iyileştirmenin yanı sıra, çevre dostu, insan sağlığına zararlı olmayan ve düşük maliyetli imalat süreçlerinin gerçekleştirilmesi anlamına gelen sürdürülebilir imalat büyük önem kazanmıştır. Kriyojenik soğutma, kriyojenik sıvı veya gazlar kullanılarak gerçekleştirilen, imalatta sürdürülebilirliği sağlamak ve özellikle işlenebilirliği zor malzemelerde kesme performansını arttırmak amacıyla kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu çalışmada, literatürdeki farklı talaşlı imalat süreçlerinde kullanılan kriyojenik soğutma uygulamaları irdelenmiş, kesme performansı ve ürün kalitesi üzerine etkileri detaylı olarak incelenmiş ve tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir imalat, kriyojenik soğutma, kesme performansı.

A Survey on Cryogenic Cooling Applications in Material Removal Processes

Abstract

Sustainable manufacturing which means environmentally friendly, nonhazardous to human health and low cost manufacturing processes as well as improvement of cutting performance has recently a great importance. Cryogenic cooling is one of the methods used to achieve sustainability in manufacturing and to improve cutting performance in especially difficult-to-cut materials using cryogenic liquids or gases. In this study, cryogenic cooling applications used in different material removal processes in literature are reviewed, and their effects on cutting performance and product quality are analyzed and discussed in detail.

Keywords: Sustainable machining, cryogenic cooling, cutting performance.

1. Giriş

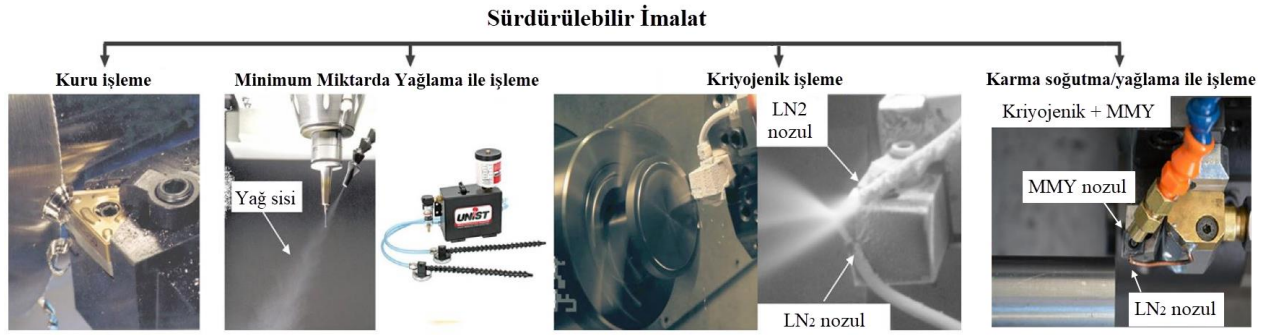
İmalatta sürdürülebilirlik, verimliliğin artırılması, maliyetlerin düşürülmesi, atık malzemelerin azaltılması, çevreye duyarlı teknolojilerin kullanılması, ve sağlık ve güvenlik şartlarının optimal bir şekilde sağlanabilmesi anlamına gelmektedir [1]. Son yıllarda, yeni ürün geliştirilmesinde sürdürülebilir imalat prensiplerine uygun süreçler kullanılması, güncel ve önemli bir araştırma konusudur. İmalat süreçlerinde sürdürülebilirliği artırıcı yöntemlerden biri de kriyojenlerin (azot, oksijen, helyum, hidrojen, vb.) farklı uygulama yöntemleri ile kullanımıdır. Genel olarak, -150°

*Corresponding author: Adem ÇİÇEK. Address: Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, Ankara Yıldırım Beyazıt University, 06010, Ankara TURKEY. E-mail address: acicek@ybu.edu.tr, Phone: +903129062295

C'nin altındaki çok düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen bu uygulamalar, kriyojenik işlem ve kriyojenik soğutma/işleme olarak iki farklı şekilde imalatta kullanılmaktadır [2]. Birincisi, çeşitli mühendislik malzemelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi amacı ile uygulanan, malzemelerin kriyojenik sıcaklıklara kademeli olarak soğutulması, bu sıcaklıklarda 24 saat gibi uzun bekleme sürelerinde bekletilmesi ve sıcaklığın tekrar oda sıcaklığına kademeli olarak getirilmesi ile gerçekleştirilen bir ısıl işlem türüdür [3]. Diğeri ise, özellikle süper alaşımlar [4], titanyum alaşımları [5], paslanmaz çelikler [6] ve sertleştirilmiş çelikler [7] gibi işlenmeleri sırasında yüksek sıcaklık problemleri yaşanan mühendislik malzemelerinde, etkili soğutma özelliği sayesinde kesme ve talaş kaldırma hızlarını arttırabilmek, daha uzun takım ömrü ve daha iyi yüzey kalitesi elde edebilmek, böylece verimliliği arttırarak işleme maliyetlerini düşürebilmeyi başarmak amaçlarıyla kullanılmaktadır. Bu noktada, işleme performansını arttırıcı ve çevre dostu bir yöntem olarak tercih edilen kriyojenik soğutma yöntemi, çeşitli mühendislik malzemelerinin tornalama [6], frezeleme [1], delme [8], gibi temel talaş kaldırma işlemlerinin yanı sıra, raybalama [9], taşlama [10], parlatma [11], elektro erozyon [12], vb., birçok imalat sürecinde geleneksel yöntemlerde kullanılan soğutma/yağlama ortamlarının yerine uygulanmaktadır. Bu yöntemde kriyojenik akışkan, farklı uygulama yöntemleri ile doğrudan veya dolaylı olarak iş parçasına, kesme bölgesine, kesici takıma veya bunların farklı kombinasyonlarına uygulanmaktadır. Bu açıdan kriyojenik soğutma, soğutma ve/veya yağlama amaçlı kullanılan geleneksel kesme sıvılarının yerine tornalama, frezeleme, delme, vb. işleme operasyonlarında, kullanılarak; elektro erozyon gibi mekanik temas olmadan yüksek sıcaklıkların oluştuğu imalat yöntemlerinde ise dolaylı olarak uygulanarak sürdürülebilir imalat ortamının oluşturulması ve işleme performansının artırılması amaçları ile farklı uygulama yöntemlerinde gerçekleştirilmektedir.

Sıvı azot (LN_2), kriyojenik soğutma uygulamalarında en çok tercih edilen kriyojendir [5]. Kaynama noktası $-195.80^\circ C$ olan azot (N_2), atmosferde en çok bulunan (%78.03) gazdır [13]. Havadan daha hafif olduğu için kriyojenik soğutma uygulamalarında buharlaşma ve dağılıma eğilimi göstermektedir [14]. Bu sebepten dolayı kriyojenik soğutma uygulamaları mevcut sistemler ile karşılaştırıldıklarında çevre dostu, insan sağlığı açısından bir tehlike oluşturmayan ve imalatta sürdürülebilirliği arttırıcı bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. 1950'lerden beri farklı imalat süreçlerinde uygulanan kriyojenik soğutmanın [14] yeşil imalat yöntemlerinden birisi olmasının dışında, kesici takım ömrünü artırması [15], daha iyi yüzey kalitesi sağlaması [16], imalat sonrası işlenmiş yüzeyin altında meydana gelen mikroyapıdaki deformasyonu [1] ve beyaz katman oluşumunu azaltması [7], bazı çalışmalarda kesme kuvvetlerini düşürmesi [17], vb. gibi sağladığı birçok avantaj literatürdeki birçok çalışmada yer almakta ve mevcut soğutma ortamlarının yerine kullanılması için en iyi alternatif olarak bahsedilmekte, ayrıca işlenebilirliği arttırıcı bir yöntem olarak nitelendirilmektedir.

İmalat işlemlerini kuru şartlarda gerçekleştirerek hedeflenen imalat performansına ulaşabilmek, araştırmacılar tarafında arzu edilse de yukarıda bahsi geçen işlenmesi zor malzemeler için istenilen takım ömrü ve ürün kalitesini soğutucu ve/veya yağlayıcılar kullanmaksızın sağlamak mümkün gözükmemektedir [14]. Güncel çalışmalara bakıldığında kriyojenik soğutmanın kuru, geleneksel kesme sıvısı, minimum miktarda yağlama (MMY) ve karma soğutma/yağlama sistemleri (kriyojenik+MMY) ile ilgili farklı imalat süreçlerinde performans kıyaslamasının yapıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Şekil 1, sürdürülebilir imalatta kullanılan başlıca dört yöntemi göstermektedir.



Şekil 1. Sürdürülebilir imalat yöntemleri [18, 19].

Sürdürülebilir imalat yöntemlerinden kriyojenik soğutma, etkili soğutma özelliği ile kuru işlemeye göre daha üstün performans göstermektedir. MMY'nin yağlama özelliğinden dolayı kriyojenik soğutma ile beraber kullanımıyla karma soğutma/yağlama ile işleme, son yıllarda önem kazanmıştır. Bu farklı soğutma/yağlama stratejilerinin sürdürülebilirlik ve performans açısından kıyaslaması Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1. Farklı soğutma/yağlama yöntemlerinin performans ve sürdürülebilirlik açısından karşılaştırmaları [18].

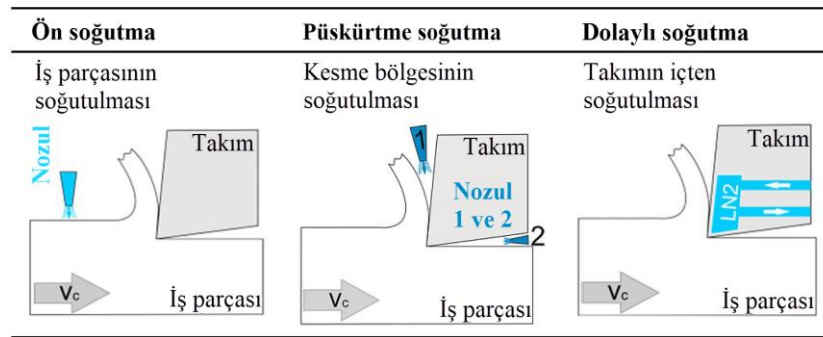
Soğutma ve yağlama yöntemlerinin etkileri	Islak (su/yağ çözeltisi)	Kuru (basıncılı hava)	MMY (yağ)	Kriyojenik (LN ₂)	Karma (MMY+LN ₂)
Soğutma	İyi	Kötü	Orta	Çok iyi	Çok iyi
Yağlama	Çok iyi	Kötü	Çok iyi	Orta	Çok iyi
Talaş kaldırma	İyi	İyi	Orta	İyi	İyi
Ürün kalitesi (Yüzey bütünlüğü)	İyi	Kötü	Orta	Çok iyi	Çok iyi
İş parçasını soğutma	İyi	Kötü	Kötü	İyi	İyi
Toz/parçacık kontrolü	İyi	Kötü	Orta	Orta	İyi
<i>Sürdürülebilirlik açısından problemler</i>	Su kirliliği, mikrobik enfestasyon ve yüksek maliyet	Termal etkilerden dolayı kötü yüzey bütünlüğü	Zararlı yağ buharlaşması	Başlangıç maliyeti	Başlangıç maliyeti, yağ buharlaşması

Bu çalışmada kriyojenik soğutma ortamlarının nasıl oluşturulduğundan ve uygulama yöntemlerinden bahsedilecek ve kriyojenik soğutmanın, son yıllarda farklı imalat süreçlerindeki uygulamaları ve işleme performansına etkileri tartışılacaktır.

2. Kriyojenik soğutma

Mevcut çalışmalarda kriyojenik soğutma genel olarak işlenebilirliği artırıcı ve yeşil imalat yöntemlerinden biri olarak açıklanmıştır. Ancak bu yöntemi kullanarak optimum sonuçlar elde edebilmek için, ilgili imalat prosesinde kriyojenlerin farklı teknikler ile uygulanması gerekmektedir. Bunun sebebi farklı imalat süreçlerinde her bir operasyon için farklı mekanizmalarda talaş kaldırma işleminin gerçekleşmesi, ayrıca farklı iş parçası ve kesici takım

malzemelerinin kriyojenik soğutma ortamında farklı performans sergilemesidir. Bu sebeplerden dolayı kriyojenik soğutma ile gerçekleştirilen çalışmalarda optimum performans elde edebilmek amacı ile çeşitli mühendislik malzemelerinin çeşitli imalat süreçlerinde farklı yöntemler ve kriyojenler uygulanmaktadır. Şekil 2, farklı kriyojenik soğutma yöntemlerini şematik olarak göstermektedir. Görüldüğü üzere ön soğutma ile iş parçasını soğutma, püskürtme soğutma ile kesme bölgesinin soğutulması ve dolaylı soğutma ile kesici takımın soğutulması yöntemleri kullanılarak kriyojenik soğutma uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir [13]. İş parçasının soğutulması yönteminde, iş parçasının bir kriyojenin içine batırılarak kriyojenik banyo uygulaması veya kriyojenin, işleme sırasında, talaş kaldırma işleminden hemen önce iş parçasının üzerine püskürtülmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir [2]. Kriyojenik banyo ile ön soğutma yönteminin viskoelastik polimer gibi yüksek elastisite ve yapışma özelliği olan malzemelerin işlenebilirliğini arttırdığı [20]; iş parçasının işlenmeden önce kriyojen püskürtülmesinin de kriyojenin nüfuz etmesi ile işleme sırasında oluşan talaş gevrekleştirdiği, böylece sünek malzemelerin işlenmesinde talaş oluşumunu kolaylaştırdığı [21] literatürdeki bazı çalışmalarda belirtilmiştir. Diğer yöntem olan kesme bölgesinin soğutulması dışarıdan bir veya daha fazla nozul kullanılarak kriyojenin kesme bölgesine püskürtülmesi [1, 16, 22] veya kesici ucun [6, 23, 24] veya takım tutucunun [25] içerisinden kriyojen gönderilmesi şeklinde iki farklı uygulama ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemde asıl amaç kesme bölgesindeki sıcaklığı azaltarak kesici takımın iş parçası malzemesine kimyasal ilgisini azaltmak, böylece daha az yapışma ve difüzyon sağlayarak işleme performansını arttırmak ve iş parçası malzemesinde yüksek sıcaklıklardan dolayı meydana gelebilecek hasarları önlemektir [2]. Dolaylı soğutma yönteminde ise kriyojen sadece kesici takımdan geçirilerek kesici takımın ve dolaylı olarak kesme bölgesinin veya iş parçasının soğutulması amaçlanmaktadır. Bu yöntemde kriyojen, kesme bölgesinde oluşan sıcaklığı düşürmekte ve buharlaşmaktadır [2]. Kriyojen, iş parçası ile doğrudan temas halinde olmadığı için kriyojenik soğutmanın etkisi ile oluşabilecek boyutsal farklılıklar gibi negatif etkiler önlenmektedir [26]. Ancak bu kriyojenik soğutma metodunun etkili olması, yüksek oranda kesici takımın malzeme özellikleri ile ilişkilidir [2]. Elektro erozyon ile işleme [12] gibi mekanik temas olmaksızın gerçekleşen imalat yöntemlerinde de performans artırma amacıyla, dolaylı kriyojenik soğutma uygulamaları mevcuttur.

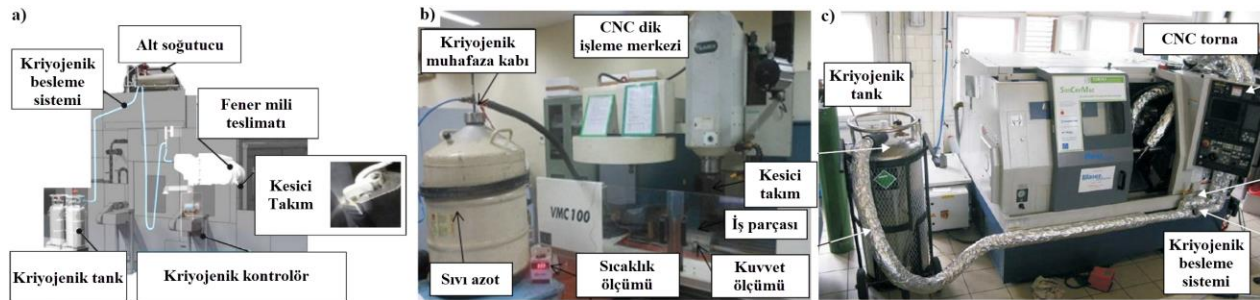


Şekil 2. Kriyojenik soğutma yöntemleri [27].

Tüm bu yöntemler göz önüne alındığında, herhangi imalat sürecinde işlenecek malzeme için uygun kriyojenik soğutma yönteminin seçilmesindeki en ekonomik ve etkili yol, işleme koşullarına bağlı olarak yeterli miktarda kriyojenin uygun yöntem ile sadece ilgili noktaya püskürtülerek nüfuz

ettirilmesidir [28]. Ti6Al4V alaşımının farklı soğutma yöntemleri uygulanarak gerçekleştirilen kriyojenik tornalama çalışmasında [28] soğutma koşulları kötüden iyiye doğru; kuru, kesici ucun kriyojenler ile dolaylı soğutulması, geleneksel kesme sıvısı ile soğutma, iş parçasını kriyojenler ile ön soğutma, kesici uç yan yüzeyinin kriyojenik soğutulması, kesici uç talaş yüzeyinin kriyojenik soğutulması ve yan ve talaş yüzeylerinin aynı anda kriyojenik soğutulması şeklinde belirlenmiştir. Dolayısı ile kesme bölgesinin etkili soğutulması bu alaşımın işlenebilirliğini artırmıştır. Bunlara ek olarak kriyojenik soğutma, malzeme özelliklerini ve kesici takım ve iş parçası arasındaki sürtünme katsayısını da etkilemektedir. Kullanılan iş parçası ve kesici takım malzemesine bağlı olarak yağlama etkisini geliştirebilmekte veya kötüleştirilebilmektedir [29]. Bu sebeple gerçekleştirilecek imalat yöntemine ve kesici takım ve iş parçası malzemelerine göre optimal sonuçların elde edilebileceği bir kriyojenik soğutma yönteminin uygulanması kritiktir.

İmalat süreçlerinde kullanılan kriyojenik soğutma sistemleri, ticari ekipman olarak kullanıma hazır bir şekilde [11] temin edilebileceği gibi, bir kompresör yardımıyla kriyojen akışının basınçlandırılması [22] veya kendinden basınçlı kriyojenik tanklar kullanılması [30] şeklinde de araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. Şekil 3, farklı kriyojenik ekipman uygulamalarını göstermektedir. Kriyojenik soğutmada sistemlerinde kriyojenler, araştırmacılar tarafından farklı basınç ve debilerde uygulanabilmektedir.



Şekil 3. İmalat süreçlerinde kullanılan kriyojenik soğutma sistemleri; a) ticari [31], b) kompresör yardımıyla basınçlandırılmış [22], c) kendinden basınçlı [32] kriyojenik ekipmanlar.

Kriyojenik soğutma ortamlarında en yaygın kullanılan kriyojen LN₂ olmakla beraber, karbondioksit (CO₂) kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar da [33–35] literatürde sıkça yer almaktadır. Bazı araştırmacılar [35] LN₂ kullanılarak gerçekleştirilen kriyojenik soğutmanın çok düşük sıcaklıklarda (-196°C) gerçekleşmesi sebebiyle iş parçasının mekanik ve fiziksel özelliklerini olumsuz etkilediğini bu sebeple LN₂'ye göre daha yüksek kaynama sıcaklığına (-78.5°C) sahip olan CO₂ kullanılması gerektiğini savunmaktadır. Diğerleri [14], CO₂ kullanımında, CO₂'nin katı hali olan kuru buz oluşumunun kontrolünün zor olduğunu, havadan ağır olduğu için kullanımı sonucu çalışanlar üzerinde oksijen yetersizliğine neden olacağını, ayrıca sera etkisi yaratarak küresel ısınmayı kötü etkileyeceğini belirtmektedir. Ayrıca, LN₂'nin havadan daha hafif olması sebebiyle buharlaşarak havada dağılacığını, atmosferde en bol bulunan gaz olduğunu ve CO₂'ye göre daha düşük sıcaklıkta kaynama noktasına sahip olmasının bir avantaj olduğunu belirtmektedirler. Tüm bunlara ek olarak LN₂ kullanılırken dikkat edilmesi gereken önemli hususlar bulunmaktadır. Bu noktada LN₂ kullanılarak gerçekleştirilen imalat süreçlerinde; LN₂ kullanımı ile ortamda azalan % oksijen miktarı nedeniyle oksijen yetersizliğinin yaşanmaması için

çalışma ortamının uygun bir şekilde havalandırılması, LN₂'nin yüksek genleşme karakteristiği (1:693) nedeniyle yüksek basınç altında bulunan kriyojenik soğutma ekipmanında yeterli basınç dengesini sağlayacak ve yüksek basınçlara çıkılmasını engelleyecek bir emniyet valfinin bulunması, kriyojenik sıcaklıklarda gerçekleşebilecek olası iş sağlığı ve güvenliğini tehdit edici unsurlardan etkilenmemek amacıyla uygun kriyojenik koruma ekipmanları ile kriyojenik soğutma sisteminin kullanılması gerekmektedir [32].

Son zamanlarda, etkili soğutmanın yanında yeterli yağlama ortamının da sağlanabilmesi amaçlanan karma soğutma/yağlama yöntemleri önem kazanmıştır. Ekonomik ve çevre dostu bir yöntem olarak kullanılan MMY, kesme bölgesinde oluşan sürtünmeyi ve sıcaklığı azaltmak amacıyla kullanılan [36] bir diğer imalatta sürdürülebilirliği artırıcı yöntemdir. MMY ile beraber LN₂ [19] veya CO₂ [19, 36] kullanılarak oluşturulan karma soğutma sistemleri, çeşitli imalat yöntemlerinde kriyojenik soğutma yönteminin etkili soğutma özelliğinin yanında yağlama özelliğini geliştirmek amacıyla uygulanmaktadır.

3. Kriyojenik soğutmanın işlenebilirlik üzerine etkileri

Talaşlı imalat süreçlerinde meydana gelen kesme kuvvetleri, güç tüketimi ve genel imalat giderlerini doğrudan etkilemektedir. Kriyojenik soğutma ortamında iş parçası malzemesi düşük sıcaklıklar altında gevrekleşmekte ve mukavemetinde artış gözlenebilmektedir. Bu durum kesme kuvvetlerinde bir artışa sebep olmaktadır [37]. Diğer taraftan kriyojenik soğutmanın yağlama etkisi göstererek kesme kuvvetlerinde bir azalma sağladığı da literatürde yer almaktadır [38]. Kriyojenik soğutmanın etkileri imalat sürecinde kullanılan iş parçası-kesici takım malzemelerine ve soğutma tekniğine bağlı olarak oldukça değişmektedir. Bu sebeple kriyojenik soğutmanın genel olarak kesme kuvvetlerini arttırdığı veya azalttığı söylenemez [2]. Literatürde farklı imalat süreçlerinde kriyojenik soğutmanın kesme kuvvetlerinin artmasına [1, 23, 37] veya azalmasına [15, 22, 37] sebep olduğu çalışmalar mevcuttur. Ayrıca kesme kuvvetlerinin artması sonucu takım ömrünün azalmasının, takım geometrisinin kriyojenik şartlara göre modifiye edilmesi ile aşılabileceği öngörülmektedir [24].

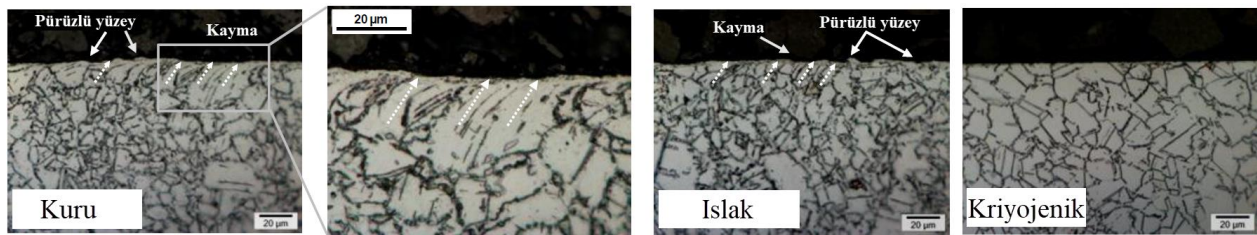
Takım aşınması, kesici takımın orijinal şeklini kaybederek imalat sürecinin durmasına, işleme veriminin düşmesine ve işlenmiş yüzey kalitesinin kötüleşmesine neden olmaktadır. Kriyojenik soğutma, özellikle titanyum alaşımları ve nikel bazlı süper alaşımlar gibi düşük termal iletkenlik ve kesici takım malzemeleri ile yüksek kimyasal ilgi gibi nedenlerden dolayı işlenebilirliği zor mühendislik malzemelerinin imalat süreçlerinde, kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkları düşürmek, işlenebilirliği geliştirmek, talaş kaldırma hızını arttırmak ve kesici takım ömrünü iyileştirmek amaçlarıyla kullanılan yöntemlerden biridir. Ti6Al4V'un işlenmesi ile ilgili bir çalışmada [38] bu durum, kriyojenik soğutmanın daha kısa talaş oluşumu sağladığından dolayı sürtünme sonucu oluşan sıcaklığı azalttığı ve takım-talaş temas uzunluğunu kısaltarak kesici takıma geçen ısı miktarını düşürdüğü şeklinde açıklanmıştır. Ayrıca kriyojenik soğutmanın kesme bölgesindeki yüksek sıcaklıkları düşürmesi ile kesici takım-iş parçası arasındaki termal etkiyi azalttığı böylece yapışma eğilimi ve sürtünmenin azaldığı söylenebilir [39]. Şekil 4, kuru, MMY ve kriyojenik ortamlarında NiTi şekil hafızalı alaşımın 5 dk süre ile işlenmesinden sonra meydana gelen aşınma mekanizmalarını göstermektedir. Kesici takımın hem talaş yüzeyi hem de yan yüzeyinden aynı anda LN₂ gönderilerek gerçekleştirilen kriyojenik soğutmanın belirtilen işleme

şartlarındaki takım aşınması üzerine olumlu etkileri açık bir şekilde görülmektedir. Çeşitli mühendislik malzemelerinin kriyojenik soğutma ile işlenmesinde tornalamanın yanı sıra frezeleme [39], delme [22], elektro erozyon ile işleme [12] gibi farklı imalat süreçlerinde de takım aşınmasını iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ancak kriyojenik şartlardan dolayı kısa takım ömrü ile sonuçlanan çalışmalar [24] olmakla beraber karma soğutma/yağlama yöntemlerinin takım aşınmasının iyileştirilmesinde kriyojenik soğutmadan daha etkili olduğu da literatürdeki bazı çalışmalarda [19] belirtilmektedir.



Şekil 4. Farklı işleme ortamlarında NiTi şekil hafızalı alaşımın 5 dk işlenmesinden sonra oluşan yan yüzey aşınma miktarlarının kıyaslanması [40].

Yüzey pürüzlülüğü, sertlik, kalıntı gerilmeler, işlenmiş yüzeyin altında meydana gelen mikroyapısal değişiklikler, vb. özellikler, işlenmiş nihai ürünün servis ömrünü belirleyen yüzey bütünlüğü kriterleridir [4]. Kriyojenik soğutmanın farklı imalat süreçlerinde yüzey bütünlüğüne etkileri ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalarda, geleneksel soğutma koşullarına göre yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği [41], daha az boyutsal hata sağladığı [23], işleme sonucu oluşan çekme kalıntı gerilmelerini ve yüzey çatlaklarını azalttığı [42] belirtilmiştir. Şekil 5, Inconel 718'in farklı ortamlarda frezelenmesi sonrasında işlenmiş yüzey altında meydana gelen mikroyapıdaki değişimleri göstermektedir. Yüksek işleme sıcaklıklarından dolayı kuru işleme şartları, tane yapısının deforme olmasına sebep olmuştur. Öte yandan kriyojenik şartlarda gerçekleştirilen deneylerde plastik deformasyon azalmış ve yüzey pürüzlülüğü iyileşmiştir. LN₂'nin kesme bölgesine nüfuz etmesi yüzey bütünlüğünü iyileştirmiştir [1].



Şekil 5. Farklı işleme ortamlarında Inconel 718'in işlenmiş alt yüzey mikroyapı görüntüleri [1].

4. Sonuç

Kriyojenik soğutma, çevre dostu ve işlenebilirliği artırıcı bir yöntem olarak uzun yıllardan beri kullanılmaktadır, ancak bu konuda şimdiye kadar yapılan çalışmaların yaklaşık %59'u 2000'li yıllarda sonra gerçekleştirilmiştir. Kriyojenik soğutma için ticari kriyojenik işleme ekipmanları bulunmasına rağmen bu teknik şu an için sanayiciler arasında popüler bir uygulama değildir. Bunun nedeni çoğu çalışmanın tornalama operasyonu üzerine olması ve kısıtlı malzemelerde

gerçekleştirilmesi şeklinde açıklanabilir [2]. Ayrıca kriyojenik soğutmada, geleneksel kesme sıvılarının kullanımında olduğu gibi kesme sıvısının tekrar kullanımı mümkün değildir ve LN₂, yüksek genleşme karakteristiği nedeniyle kullanılmasa dahi buharlaşmaktadır. Kriyojenik soğutma sistemlerine geçiş için başlangıç maliyetlerinin yüksek olması da bu tekniğin yaygınlaşmasını etkilemektedir. Ancak yapılan çalışmalar bu soğutma yönteminin birçok mühendislik malzemesinin farklı imalat süreçlerinde talaş kaldırma hacmini ve verimliliği arttırdığını ve nihai ürün kalitesini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca bu yöntem, geleneksel kesme sıvılarının çevreyi kirleten ve sağlığa zarar veren etkilerini ortadan kaldırmaktadır. Bu sebeplerle, kriyojenik soğutmanın ekonomik ve etkili kullanımının ilgili işleme operasyonu ve iş parçası-kesici takım malzemeleri için net olarak belirlenmesi bu tekniğin yaygınlaşmasında etkili olacaktır. Tornalama operasyonlarının yanında, frezeleme ve delme gibi sıklıkla kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinde ve geleneksel olmayan imalat yöntemlerinde farklı mühendislik malzemelerinin kriyojenik soğutma ortamındaki işleme performanslarının araştırılması, bu çevre dostu, işlenebilirliği artırıcı ve sürdürülebilir imalat yönteminin yaygınlaşmasında ve sanayiciler tarafından tercih edilmesinde önemli katkı sağlayacaktır. Ayrıca kriyojenik soğutmanın yağlayıcı etkisinin arttırılması amacıyla kullanılan karma soğutma/yağlama yöntemlerinin işlenebilirliğin arttırılmasındaki etkilerinin farklı imalat yöntemlerinde araştırılmasına da ihtiyaç bulunmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Aramcharoen, A., Chuan, SK., An experimental investigation on cryogenic milling of inconel 718 and its sustainability assessment, *Procedia CIRP*, 14, 529–534, 2014.
- [2] Shokrani, A., Dhokia, V., Munoz-Escalona, P., Newman, ST., State-of-the-art cryogenic machining and processing, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26, 616–648, 2013.
- [3] Gunes, I., Cicek, A., Aslantas, K., Kara, F., Effect of Deep Cryogenic Treatment on Wear Resistance of AISI 52100 Bearing Steel, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 67, 909–917, 2014.
- [4] Pusavec, F., Hamdi, H., Kopac, J., Jawahir, IS., Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy-Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 773–783, 2011.
- [5] Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, ST., Comparative investigation on using cryogenic machining in CNC milling of Ti-6Al-4V titanium alloy, *Machining Science and Technology*, 20, 475–494, 2016.
- [6] Dhananchezian, M., Kumar, M.P., Sornakumar, T., Cryogenic Turning of AISI 304 Stainless Steel with Modified Tungsten Carbide Tool Inserts, *Materials and Manufacturing Processes*, 26, 781–785, 2011.
- [7] Umbrello, D., Yang, S., Dillon, OW., Jawahir, IS., Effects of cryogenic cooling on surface layer alterations in machining of AISI 52100 steels, *Materials Science and Technology*, 28, 1320–1331, 2012.
- [8] Ahmed, LS., Govindaraju, N., Pradeep Kumar, M., Experimental Investigations on Cryogenic Cooling in the Drilling of Titanium Alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 31, 603–607, 2016.
- [9] Ahmed, S., Kumar, P., Performance evaluation of cryogenic cooling in reaming titanium alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 32, 302–308, 2017.

- [10] Elanchezhian, J., Pradeep Kumar, M., Manimaran, G., Grinding titanium Ti-6Al-4V alloy with electroplated cubic boron nitride wheel under cryogenic cooling, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29, 4885–4890, 2015.
- [11] Yang, S., Umbrello, D., Dillon, OW., Puleo, DA., Jawahir, IS., Cryogenic cooling effect on surface and subsurface microstructural modifications in burnishing of Co-Cr-Mo biomaterial, *Journal of Materials Processing Technology*, 217, 211–221, 2015.
- [12] Srivastava, V., Pandey, PM., Performance Evaluation of Electrical Discharge Machining (EDM) Process Using Cryogenically Cooled Electrode, *Materials and Manufacturing Processes*, 27, 683–688, 2012.
- [13] Yildiz, Y., Nalbant, M., A review of cryogenic cooling in machining processes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48 (9), 947–964, 2008.
- [14] Hong, SY., Economical and Ecological Cryogenic Machining, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 123 (2), 331–338, 2001.
- [15] Magadam, S., Kumar, SA., Yoganath, VG., Srinivasa, CK., GuruMurthy, T., Evaluation of Tool Life and Cutting Forces in Cryogenic Machining of Hardened Steel, *Procedia Materials Science*, 5, 2542–2549, 2014.
- [16] Kaynak, Y., Evaluation of machining performance in cryogenic machining of Inconel 718 and comparison with dry and MQL machining, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72, 919–933, 2014.
- [17] Manimaran, G., Pradeep Kumar, M., Venkatasamy, R., Influence of cryogenic cooling on surface grinding of stainless steel 316, *Cryogenics*, 59, 76–83, 2014.
- [18] Jawahir, IS. et al., Cryogenic manufacturing processes, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65, 713–736, 2016.
- [19] Sartori, S., Ghiotti, A., Bruschi, S., Hybrid lubricating/cooling strategies to reduce the tool wear in finishing turning of difficult-to-cut alloys, *Wear*, 376–377, 107–114, 2017.
- [20] Kakinuma, Y., Kidani, S., Aoyama, T., Ultra-precision cryogenic machining of viscoelastic polymers, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61, 79–82, 2012.
- [21] Ahmed, MI., Ismail, AF., Abakr, YA., Amin, AKMN.: "Effectiveness of cryogenic machining with modified tool holder, *Journal of Materials Processing Technology*, 185, 91–96, 2007.
- [22] Ahmed, LS., Kumar, MP., Cryogenic Drilling of Ti–6Al–4V Alloy Under Liquid Nitrogen Cooling, *Materials and Manufacturing Processes*, 31, 951–959, 2016.
- [23] Xia, T., Kaynak, Y., Arvin, C., Jawahir, IS., Cryogenic cooling-induced process performance and surface integrity in drilling CFRP composite material, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 82, 605–616, 2016.
- [24] Outeiro, JC., Lenoir, P., Bosselut, A., Thermo-mechanical effects in drilling using metal working fluids and cryogenic cooling and their impact in tool performance, *Production Engineering*, 9, 551–562, 2015.
- [25] Park, KH. et al., The effect of cryogenic cooling and minimum quantity lubrication on end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V, *Journal of Mechanical Science and Technology*. 29, 5121–5126, 2015.
- [26] Wang, Z.Y., Rajurkar, K.P., Cryogenic machining of hard-to-cut materials, *Wear*. 239, 168–175, 2000.
- [27] Dix, M., Wertheim, R., Schmidt, G., Hochmuth, C., Modeling of drilling assisted by cryogenic cooling for higher efficiency, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63, 73–

- 76, 2014.
- [28] Hong, S.Y., & Ding, Y., Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41, 1417–1437, 2001.
 - [29] Hong, S.Y.: "Lubrication mechanisms of LN2 in ecological cryogenic machining, *Machining Science and Technology*, 10, 133–155, 2006.
 - [30] Bordin, A., Bruschi, S., Ghiotti, A., Bariani, P.F., Analysis of tool wear in cryogenic machining of additive manufactured Ti6Al4V alloy, *Wear*, 328–329, 89–99, 2015.
 - [31] Grzesik, W., *Advanced Machining Processes*, 2nd ed., Oxford: Elsevier, 2016.
 - [32] Pusavec, F., Stoic, A., Kopac, J., The role of cryogenics in machining processes, *Technical Gazette*, 16, 3-10, 2009.
 - [33] 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*, 211 (6), 1175–1183, 2011.
 - [34] Cordes, S., Hübner, F., Schaarschmidt, T., Next generation high performance cutting by use of carbon dioxide as cryogenics, *Procedia CIRP*, 14, 401–405, 2014.
 - [35] Dilip Jerold, B., Pradeep Kumar, M., Experimental investigation of turning AISI 1045 steel using cryogenic carbon dioxide as the cutting fluid, *Journal of Manufacturing Processes*, 13, 113–119, 2011.
 - [36] Aslantas, K., Cicek, A., Uzun, I., Percin, M., Hopa, H.E., Performance Evaluation of a Hybrid Cooling-lubrication System in Micro-milling of Ti6Al4V Alloy, *Procedia CIRP*, 46, 492–495, 2016.
 - [37] Hong, S.Y., Ding, Y., Jeong, W., Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41, 2271–2285, 2001.
 - [38] Bermingham, M.J., Kirsch, J., Sun, S., Palanisamy, S., Dargusch, M.S., New observations on tool life, cutting forces and chip morphology in cryogenic machining Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51, 500–511, 2011.
 - [39] Aramcharoen, A., Influence of Cryogenic Cooling on Tool Wear and Chip Formation in Turning of Titanium Alloy, *Procedia CIRP*, 46, 83–86, 2016.
 - [40] Kaynak, Y., Karaca, H.E., Noebe, R.D., Jawahir, I.S., Tool-wear analysis in cryogenic machining of NiTi shape memory alloys: A comparison of tool-wear performance with dry and MQL machining, *Wear*, 306, 51–63, 2013.
 - [41] Rotella, G., Dillon, O.W., Umbrello, D., Settineri, L., Jawahir, I.S., The effects of cooling conditions on surface integrity in machining of Ti6Al4V alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71, 47–55, 2014.
 - [42] Paul, S., Chattopadhyay, A.B., A study of effects of cryo-cooling in grinding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35, 109–117, 1995.