



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Çeliklerin işlenebilirliği: kimyasal bileşim, mikroyapı, mekanik özellikler ve işlenebilirlik ilişkisi

Machinability of steels: the relationship between machinability and chemical composition, microstructure and also mechanical properties

Yazar(lar) (Author(s)): Yusuf ÖZÇATALBAŞ

ORCID: 0000-0002-4256-8492

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Özçatalbaş Y., “Çeliklerin işlenebilirliği: kimyasal bileşim, mikroyapı, mekanik özellikler ve işlenebilirlik ilişkisi”, *Politeknik Dergisi*, 23(2): 457-482, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.550000

Çeliklerin İşlenebilirliği: Kimyasal Bileşim, Mikroyapı, Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik İlişkisi

Derleme Makalesi / Review Article

Yusuf ÖZÇATALBAŞ

Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Böl., Gazi Üniversitesi, 06500, Beşevler/Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 05.04.2019 ; Kabul/Accepted : 05.11.2019)

ÖZ

“İşlenebilirlik” işlenen malzemenin bir özelliğidir ve ancak malzemenin nitelikleri değiştirilerek işlenebilirliği değiştirilebilir. Bu durum ise, malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerindeki değişimle sağlanır. Derleme niteliğindeki bu çalışma ile “İşlenebilirlik” kavramını kapsamlı şekilde açıklamak ve çeliklerin işlenebilirliğini geliştirmek amaçlı yapılan çalışmaları tartışmak amaçlanmıştır. İşlenebilirlik değerlendirmelerinde, genel olarak çeliklerin mekanik özellikleri ve esasen sertlikleri dikkate alınır. Sertliği arttıran esas element olan karbon miktarı ve ısıtma işlemleriyle oluşturulan mikroyapılarına bağlı işlenebilirlik değerlendirilir. Bununla birlikte, mekanik özelliklerde belirgin bir değişiklik oluşturmaksızın işlenebilirliği artıran S, Pb, Bi ve Te gibi elementlerin ilavesi, talaşlı işlenebilirliği önemli oranda geliştirir. İşlenebilirlik değerlendirmesi ise, talaş kaldırma sürecinde oluşan kesme kuvveti, takım ömrü, yüzey kalitesi ve talaş biçimi dikkate alınarak dercelendirilir. Kimyasal bileşim ve mikroyapının çeliklerin işlenebilirlik derecelendirmesine etkisi, malzeme ve metalürji bilimi alanında en çok çalışılan konulardan biridir. Çeliğin üretim sürecindeki değişkenlerinin yanında, ısıtma işlemleriyle oluşturulan mikroyapıya bağlı işlenebilirlik değerlendirmeleri de önemlidir. Belirtilen işlemlerle sağlanan mikroyapıdaki fazların heterojen dağılımları, işlenebilirlik değerlendirmelerinde göz ardı edilmemelidir.

Anahtar Kelimeler: Çelik, otomat çelikleri, alaşım elementleri, ısıtma işlemleri, mikroyapı, işlenebilirlik.

Machinability of Steels: The Relationship Between Machinability and Chemical Composition, Microstructure and also Mechanical Properties

ABSTRACT

Machinability is a feature of the material being processed and can only be changed by changing the properties of the material. This is achieved by changes in the chemical and physical properties of the material. The aim of this compilation study is to explain the machinability concept extensively and to discuss the works done to improve the machinability of the steels. When evaluating the machinability of steels, their mechanical properties and especially their hardness are taken into consideration. The machinability depending on the microstructures formed by heat treatments and the amount of carbon which is the main element that increases the hardness are evaluated. However, the addition of S, Pb, Bi and Te etc. elements increase the machinability without significant changes in the mechanical properties of steel. The machinability is graded by taking into consideration of the cutting force, tool life, surface quality and chip shape generated during the machining process. The effect of chemical composition and microstructure on machinability of steels is one of the most investigated subjects in the field of materials and metallurgical science. In addition to the variables in the production process of steel, microstructure-based machinability assessments generated by heat treatments are also important. The heterogeneous distribution of the phases in the microstructure provided by the mentioned processes should not be ignored in the machinability assessments.

Keywords: Steel, free cutting steels, alloying element, heat treatment, microstructure, machinability.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüz yılı aşkın süredir mühendislik malzemelerinin en önemlisi olan ve üretim sektöründe yaygın kullanılan çelik malzemelerin işlenebilirliği ve geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar halen devam etmektedir. Konu hakkında yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunun, ilklerin belirlendiği bulgular ve kuramlar üzerine oturtulduğu görülmektedir. Bununla birlikte, genele münhasır

bilgilerin dışında ve kısmen genel bilinene aykırı verileri içeren çalışmalar da gözden kaçmamaktadır. Detaylı araştırmalarla bu verilerin de delillendirilmesiyle aslında “Talaşlı İşlenebilirliğin”, işlenen malzemenin mikro ve hatta atomik boyutta değişen özelliklerine ne kadar bağlı olduğu görülmektedir. İşlenen malzemenin mikro yapısının homojen ve özelliklerinin izotropik olduğu varsayılarak ulaşılan işlenebilirlik sonuçlarının, aslında yine işlenen malzemenin heterojen mikroyapısına bağlı olarak da önemli oranda değiştiği görülmüştür.

Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : yusufoz@gazi.edu.tr

Bu çalışmada, farklı yaklaşımlarla da izah edilmeye çalışılan “İşlenebilirlik” kavramının olması gereken malzeme bilimi ve mühendisliği bakış açısıyla izahına çalışılmıştır. Ayrıca çeliklerin işlenebilirliğinin metalürji bilimi ve mühendisliği yaklaşımıyla da izahı amaçlanmıştır. Bu sayede, genel bilinenlerin dışında başlangıçta aykırı gelebilecek mekanik özellik-ışlenebilirlik ilişkisi, mikro yapısal özellik-ışlenebilirlik yaklaşımlarıyla açıklanmaya çalışılmıştır. Geniş bir literatür taramasıyla sunulan bu çalışma ile gerek konuyla ilgili akademik araştırmalara ve gerekse sektörel çalışmalara önemli bilgi desteği sağlanacağı düşünülmektedir.

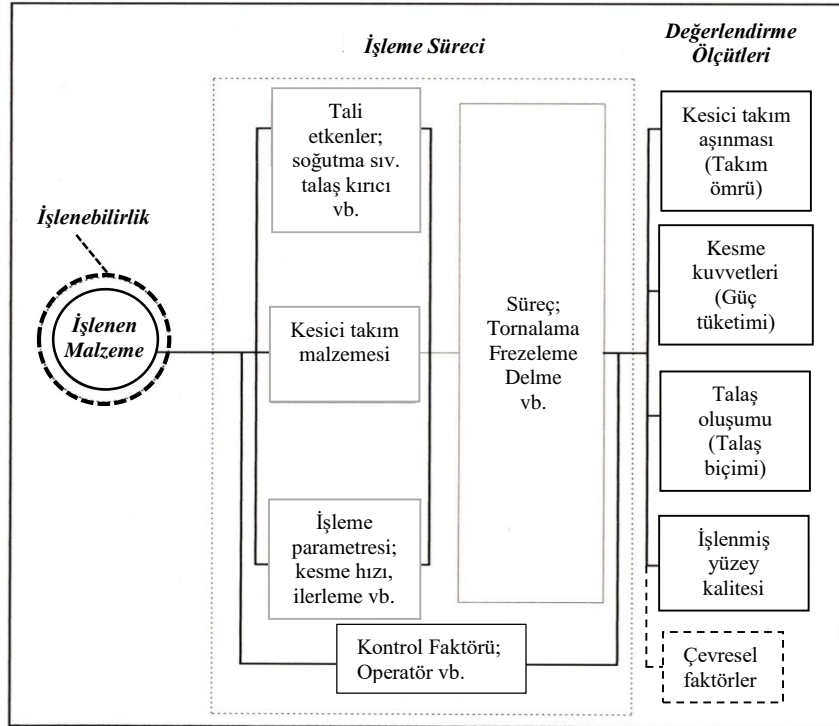
1.1. Talaşlı İmalat (Machining)

Talaşlı imalat süreçleri, modern üretimin vazgeçilmez aşamalarından biridir. Şekillendirilen ürünlerin % 80'ninden fazlasının tamamlanmadan önce işlendiği tahmin edilmektedir [1]. Gardner Business Media Inc.'e göre dünya çapında yıllık takım tezgâhları üretimi (metal kesme ve metal şekillendirme) 2012 yılında yaklaşık 93 milyar ABD doları olmuştur [2]. Aynı şirket, bu süre boyunca taşlama diskleri ve diğer aşındırıcılar da dahil olmak üzere metal kesme takımları için 3,6 milyar dolar harcadığını belirtmektedir [3]. Bir metal kesme veya işleme sürecinin kesin bir tanımını bulmak zor olsa da

kısaca, talaş formundaki istenmeyen bir malzemeyi iş parçasından ayırmak için gerekli işleme süreci olarak belirtilebilir [4]. Talaşlı imalat işlemleri tornalama, frezeleme, delme, broşlama ve raybalama işlemleri gibi sayılabilir. Talaşlı imalat alanındaki araştırmaların yüzyıldan fazla bir süredir gerçekleştirilmesine ve yıllar boyunca önemli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen, modern bilim insanları tarafından da halen benzer amaçlar için çalışmalara devam edilmektedir. Tüm imalat işlemleri üzerine yapılan araştırmalara göre, parçanın işlenmesiyle ilgili araştırmaların amacı daha düşük üretim maliyetiyle yüksek kalitede ürünler üretmektir. Buna ek olarak, yeni geliştirilen malzemelerin sürekli pazara eklenmesiyle birlikte, talaşlı imalat alanında da sürekli araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır [5].

1.2. İşlenebilirlik Kavramı (Concept of Machinability)

İşlenebilirlik kavramı içindeki en genel mana, talaş kaldırma sırasında meydana gelen kayıpların yüksek veya düşük olacağını ifade eder [6]. Şekil 1'de gösterildiği gibi işlenebilirlik işlenen malzemeye özgü bir özelliktir ve bir malzemenin işlenebilirliğini ancak kimyasal bileşimi, mikroyapısı, mekanik özellikleri vb. değişkenler etkiler [7].



Şekil 1. Kontrol halkası şeklinde gösterilen talaş kaldırma süreci ve işlenebilirlik (Machinability and chip removal process shown as control ring) [7]

Talaş oluşumu, takım aşınması, işlenmiş yüzeyin kalitesi ve kesme kuvvetleri gibi işleme karakteristikleri ile mühendislik malzemelerinin işlenebilirliği belirlenebilir [8-10]. Bununla birlikte, özellikle son yıllarda, bir

malzemenin talaşlı imalatı sürecinde oluşan çevresel etkiler de (alerjik etkiler, gürültü seviyesi, kesme sıvıları vb.) dikkate alınarak işlenebilirlik değerlendirmesi de yapılabilmektedir. [10]. Kısacası iyi veya kötü

işlenebilirlik şeklinde değerlendirme subjektiftir ve göz önünde bulundurulmuş en önemli değerlendirme ölçütüne bağlıdır [11,12].

İşleme sürecindeki değişkenlerin (takım malzemesi, kesme hızı, takım geometrisi, soğutma sıvısı vb.) işlenebilirlik değerlendirme ölçütlerini etkilemesi, işlenen malzemenin işlenebilirliğini değiştirdiği anlamına gelmez. Şekil 1’de verilen kontrol halkası, özgün bir işlenebilirlik özelliğine sahip malzemenin talaşlı imalat sürecini, değerlendirme ölçütlerinden biri veya birkaçını dikkate alarak optimize etmek için de kullanılır. Bu sayede malzemenin sahip olduğu işlenebilirlik özelliğine uygun kesme parametreleri, takım malzemesi vb. seçilerek kesme kuvvetleri ve takım aşınması minimize edilip yüzey kalitesi iyileştirilebilir. Ancak işleme parametrelerindeki değişkenlerle sağlanan değerlendirme ölçütlerindeki iyileşme, işlenen malzemenin işlenebilirliğinin de iyileştiği anlamına gelmez. Zira işlenebilirlik ancak işlenen malzemenin özellikleri değiştirilerek değiştirilebilir. İşlenebilirlik özelliği, malzemenin sahip olduğu sertlik özelliği gibidir. Sertlik ölçme metodunun değişmesiyle değişen sertlik verileri, malzemenin sahip olduğu sertliğin değiştiği anlamına gelmez. Ancak, malzemenin sertliğine uygun bir metotla sertliğinin ölçülmesi gerekliliği vardır.

Bir malzemenin işlenebilirliği kimyasal bileşimine, üretim yöntemlerine ve uygulanan ısıl işlemlere göre oluşan mikroyapıların, sabit işleme süreçleri için değerlendirme ölçütlerinde meydana getirdiği etkilere göre tanımlanır [6]. Genel olarak bir malzemenin işlenebilirliğini tanımlamada kullanılan sertlik, akma ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikler bazen yetersiz kalır. Zira, yaklaşık aynı mekanik özelliklerde ancak içerdiği kimyasal bileşim ve mikroyapı bakımından farklılık gösteren malzemeler çok daha farklı işlenebilirlik özellikleri gösterebilirler. Bunun en iyi örneği otomat (kolay işlenebilen) çeliklerdir [13,14]. Ayrıca, benzer kimyasal kompozisyon veya mikroyapıda olmasına rağmen ve yaklaşık aynı mekanik özellikleri veren malzemelerin mikroyapılarındaki homojensizlikten kaynaklanan anizotropik durum, işlenebilirlikte de farklı sonuçlar doğurabilmektedir [15-19]. Malzemelerin üretim proseslerinden kaynaklanan

ve/veya mikro segregasyonların meydana getirdiği mikroyapısal heterojenliğin sebep olduğu işlenebilirlikteki düzensizlik ve anizotropi halen araştırılan konulardandır [20-23].

Derleme niteliğindeki bu çalışmada, “işlenebilirlik” kavramının netleştirilmesi ve çeliklerin işlenebilirliği bakımından bilinen genel literatür verileriyle birlikte, kimyasal bileşim ve ısıl işlemlerle değiştirilen mikroyapının çeliklerin işlenebilirliğine etkisi açıklanmaya çalışılmıştır. İşlenebilirlik değerlendirmeleri ağırlıklı olarak talaş oluşumu, yüzey kalitesi, talaş kaldırma kuvvetleri ve takım ömrü dikkate alınarak yapılmıştır.

2. KİMYASAL BİLEŞİM VE MİKROYAPININ İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİ (EFFECT OF CHEMICAL COMPOSITION AND MICROSTRUCTURE ON MACHINABILITY)

2.1. Karbonun Etkisi (Effect of Carbon)

Çelikte sertliği arttıran esas element karbondur. Karbon miktarındaki değişim işlenebilirliğin de değişmesine sebep olur. Ötektoid altı çeliklerde sementit (Fe_3C) çeliğin sünekliğini azaltır. Arttırılan sertlikle, süneklikteki azalmaya rağmen işlenebilirlikte ilerleme sağlanır. Yumuşak çelikteki düşük işlenebilirlik, talaş kaldırma sırasında önemli bir deformasyona izin veren metalin sünekliğinden kaynaklanır. Bu deformasyon için aşırı güç tüketimi gereklidir ve önemli miktarda ısı oluşur [24]. Ticari saflıktaki Al, Cu, Ni ve Fe gibi çoğu metallere talaş kaldırılması sırasında meydana gelen kesme kuvvetleri çok yüksektir. Bu metallere işlenirken, takım-talaş arayüzündeki temas alanı çok büyük, kesme düzlemi açısı küçüktür. Geniş temas alanı metallere sünekliği ile ilgilidir [25]. Yüksek kesme kuvvetlerinin geniş temas alanı ile ilgili olduğu özel olarak biçimlendirilmiş (temas alanı azaltılmış) kesici takımlarla yapılan deneylerle gösterilebilir. Çizelge 1’de verilen bu ilişki çok düşük karbonlu bir çeliğin 91,5m/dak kesme hızında, 0,25mm/dev ilerleme ve $a=1,25mm$ talaş derinliği ile işlenmesi sırasında belirlenmiştir.

Çizelge 1. Takım/Talaş temas uzunluğunun talaş kaldırma mekaniğine etkisi (Effect of tool / chip contact length on cutting mechanics) [26]

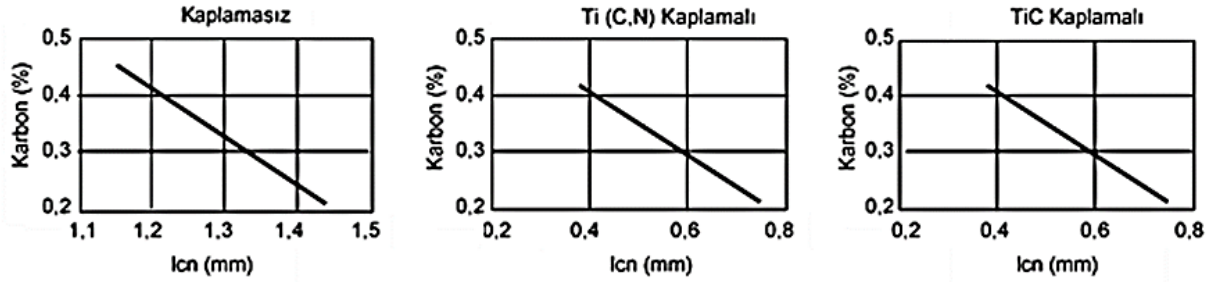
	Normal takım	Temas uzunluğu kısaltılmış takım
Kesme Kuvveti, F_c	1400 N	670 N
İlerleme Kuvveti, F_f	1310 N	254 N
Kesme Düzlemi açısı, ϕ	7 ° 58'	21 ° 39'
Talaş kalınlığı, t_c	1,83 mm	0,66 mm

Araştırmalara göre [26-28], kesme kuvvetini ve takım aşınmasını etkileyen takım-talaş temas uzunluğu, takım ve iş malzemesinin mekanik özelliklerinin bir

fonksiyonudur. Kesici kenarın yapışma bölgesine kadar temas uzunluğundaki azalma takım sıcaklığında, kesme kuvvetlerinde ve her iki yüzey (talaş ve yan yüzey)

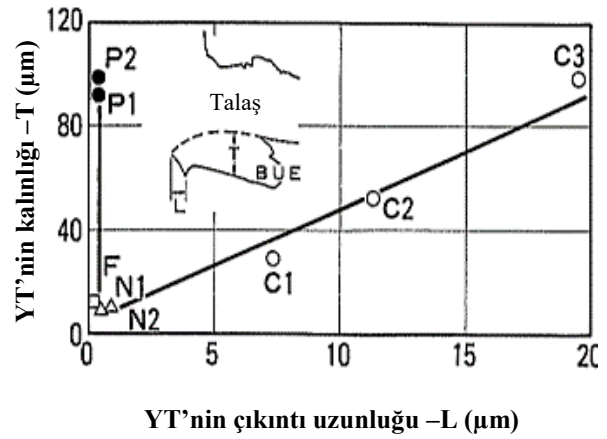
aşınmasında azalmaya sebep olur. Temas uzunluğunun yapışma bölgesinden kısa olması halinde, maksimum sıcaklık bölgesi takımın esas kesme kenarına doğru kayar. Bu durum, takımın plastik şekil değişim miktarındaki artışla birlikte parça-takım yan yüzeyi arasındaki temas alanını da artırır ve daha fazla yan yüzey aşınması meydana gelir. Bu olay, özellikle yüksek kesme hızlarında meydana gelir. Şekil 2’de kaplamalı ve

kaplamasız sert metal takımla $V=250$ m/dak, $f=0,28$ mm/dev ve $a=2,5$ mm kesme şartlarında gerçekleştirilen deneyde, malzemelerin karbon miktarı ile tabii temas uzunluğu (l_{cn}) arasındaki ilişki gösterilmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere, artan karbon miktarı takım-talaş temas uzunluğunu kısaltır ve ayrıca seramik kaplı takımlarla işlemek, temas uzunluğunu %70 oranında azaltılabilir.

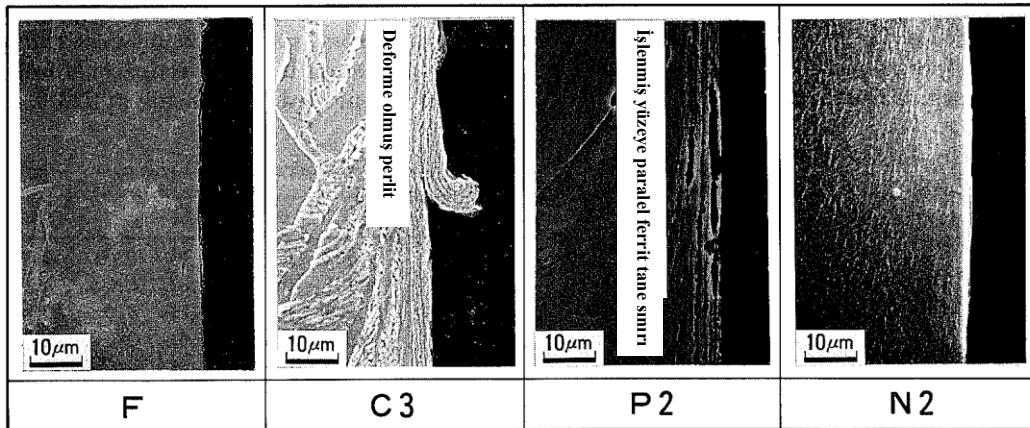


Şekil 2. Kaplamalı/kaplamasız takımlar ve çelikteki karbon miktarı ile tabii temas uzunluğu ilişkisi (Relationship between the amount of carbon in steel and the coated/ uncoated tools and also the contact length) [26].

Çelikte artan karbon miktarı ile birlikte ikincil sert fazın miktarı da artar. Ferrit - Sementit gibi çift fazlı yapıya sahip bir çelikte fazların her birinin sünekligindeki aşırı farklılık nedeniyle kesme sırasında mikro çatlak oluşumu, fazların arayüzeyleri boyunca meydana gelir. Kesme işlemi daima takımın talaş yüzeyi üzerinde başlamaz ve mikro çatlak/mikro boşlukların yoğun olduğu daha ileri bölgede kesme olabilir. Bu durumda artan mikro çatlaklarla talaştan kopan parçacıklar takım ucunda sinterlenerek yığılıp, yığıntı talaşı (YT) (Built-Up Edge-BUE) meydana getirirler [29, 30]. Oluşan yığıntı talaşın kalınlığından (T) ziyade çıkıntı uzunluğundaki (L) artmayla birlikte yüzey pürüzlülüğü de artar. Bu durum saf demir (F), çelikteki karbon miktarı (C1-C3), azot miktarı (N1, N2) ve fosfor miktarı (P1, P2) ile bağıntılı olarak Şekil 3 ve Şekil 4. C3 (% 0,38 C içerir) ’de taramalı elektron mikroskop (SEM) fotoğrafları ile gösterilmiştir [29, 31].

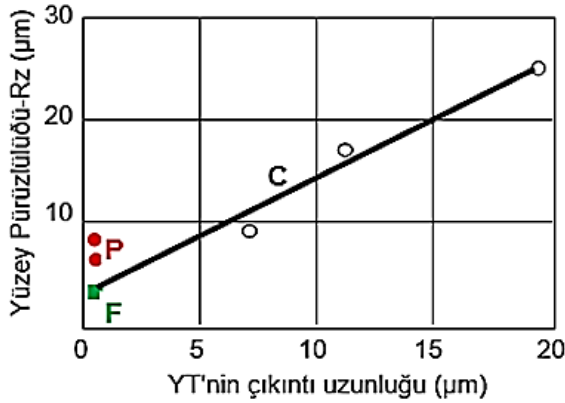


Şekil 3. YT boyutuna alaşım elementlerinin etkisi (Effect of alloying elements on BUE size) [29, 31]



Şekil 4. İşlenmiş yüzey kesitinin SEM görüntüleri (SEM images of machined surface section) [29]

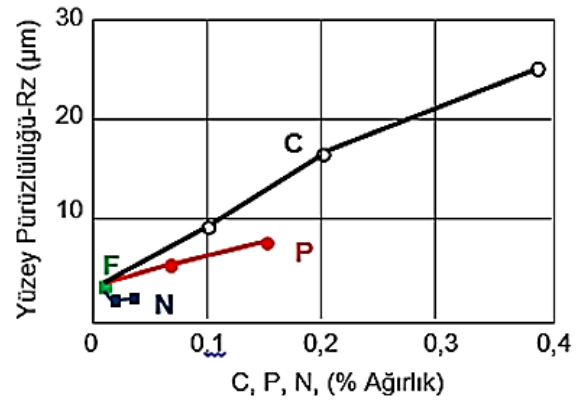
Bitirme yüzeyinin pürüzlülüğü ve işlenen parça boyutundaki artış, yığıntı talaşın parçaya yapışmasına bağlanır (Şekil 4.C3) [17, 29-31]. İlerlemedeki azalış ve kesme hızındaki artışla yığıntı talaş oluşumu azalacağından yüzey pürüzlülüğü de azalır [30]. Detaylı araştırmalar, işlenen yüzeyin pürüzlülüğünün daha çok yığıntı talaşın çıkıntı uzunluğuna (L) bağlı olduğunu ve kalınlığı (T) ile ilişkili olmadığını gösterir (Şekil 5).



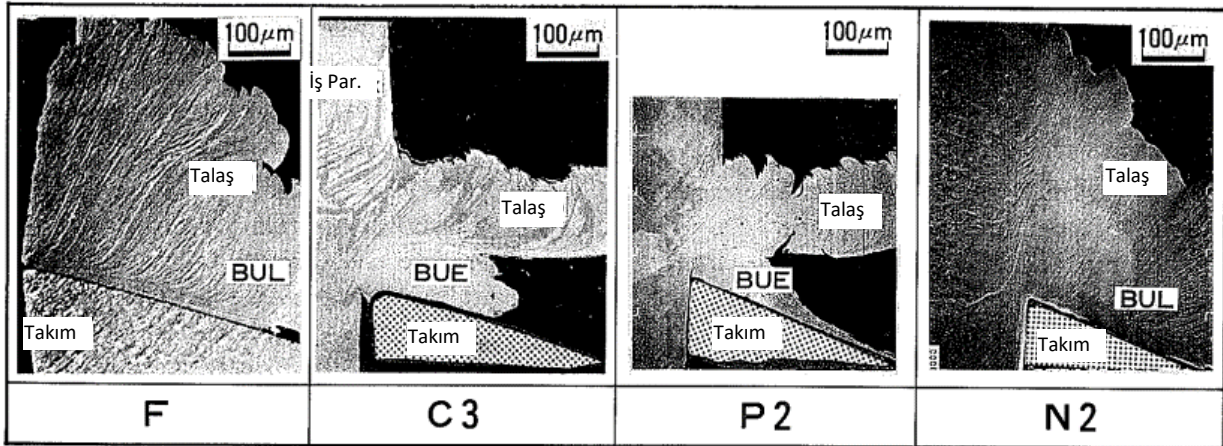
Şekil 5. YT çıkıntı uzunluğunun yüzey pürüzlülüğüne etkisi [28, 30] (Effect of BUE projection length on surface roughness)

En sünek ve yumuşak saf demirin yüzey pürüzlülüğü minimumken, alaşım elementlerinden özellikle C ve P'nin ağırlıkça oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğü de artar, ancak azot katkısının saf demire göre yüzey

pürüzlülüğünü daha da iyileştirdiği belirlenmiştir (Şekil 6). Şekil 7'de verilen talaş kökü SEM incelemesinde, saf demirin ve %0,037 N katkılı malzemenin işlenmesinde YT oluşmadığı ancak yığıntı tabaka (YTB) (Built-Up Layer-BUL) meydana geldiğini görülmektedir [29, 31]. Ancak, karbon (C3) katkılı malzemede ise, önemli boyutta kalınlığa ve çıkıntı uzunluğuna sahip YT talaş formu oluşmuştur. % 0,15 fosfor (P2) katkılı malzemelerde ise çıkıntı uzunluğu bulunmayan belirli kalınlıkta YT oluşumuna rastlanmıştır. Bu tespitler esasen, işlenen yüzeyin pürüzlülüğüne yığıntı talaşın kalınlığından ziyade çıkıntı uzunluğunun önemli etkisinin olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Karbon, fosfor ve azot miktarının Yüzey pürüzlülüğüne etkisi [28,30] (Effect of carbon, phosphorus and nitrogen contents on surface roughness)



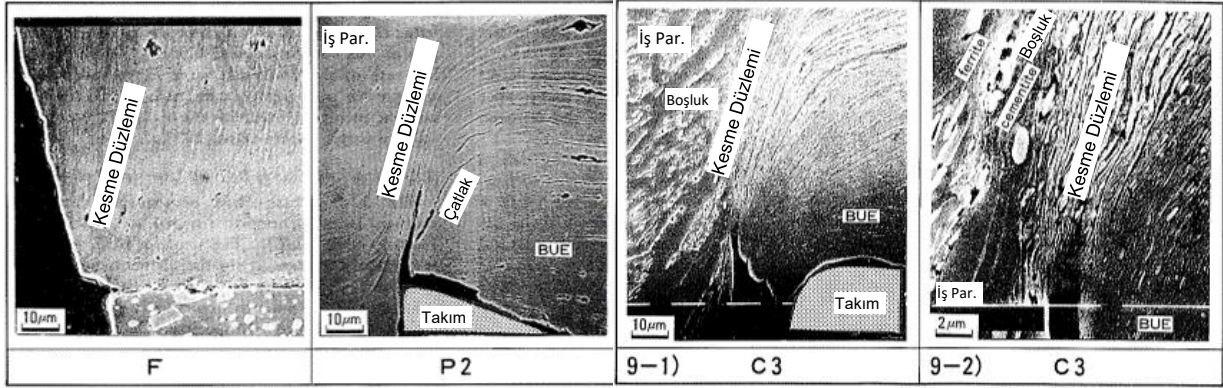
Şekil 7. Takım ve talaş arasındaki yapışmanın SEM görüntüleri [29, 31] (SEM photographs of adhesions between tool and chip)

Bu alaşım elementlerinin YT oluşumuna ve morfolojisine etkisi incelendiğinde ise, Şekil 8'deki SEM görüntülerinden de anlaşılacağı gibi, saf demirin kesme düzleminde mikro çatlak oluşumuna rastlanmaz, fosfor katkısının ise (P2) ancak kesme düzlemi üzerinde (talaş tarafında) mikro çatlaklara sebep olduğu ve bu durumun çıkıntı uzunluğu oluşturmayan bir YT meydana getirdiği görülmektedir. Saf demire karbon katkısı ile birlikte meydana gelen sert fazın (Fe_3C) oranı artar.

Birincil deformasyon bölgesindeki plastik deformasyonun etkisiyle, ferrit ve sementit arayüzeyinde meydana gelen mikroboşluk ve çatlakların kesme düzlemi üzerinde oluşmasının yanında, bu düzlemin altında da (iş parçası tarafı) meydana gelir. Kesme düzleminin altında meydana gelen mikro çatlaklar ise YT'nin kesici takımın altına doğru bir çıkıntı şeklinde büyümesine sebep olmaktadır (C3/9-1 ve 9-2). Bu durum da, C3 malzemenin işlenmesinde oluşan YT

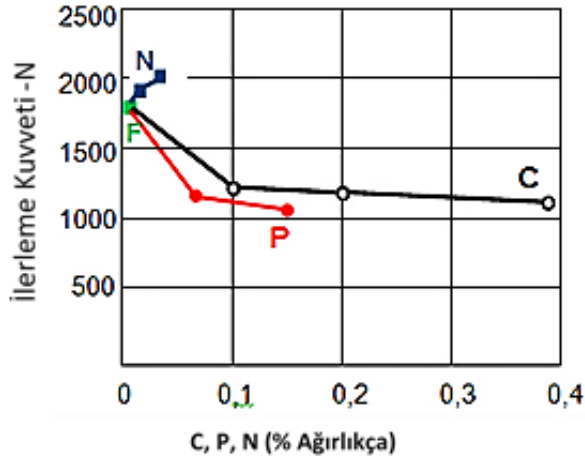
çinkıntılarının işlenen yüzeye batması ve işleme geometrisini bozmasıyla yüzey pürüzlülüğü artar [31].

Şekil 4’de verilmiş olan SEM görüntüleri de bu sonuçları doğrular.



Şekil 8. Birincil deformasyon bölgesine komşu mikro çatlaklar ve mikroyapılar [29,31] (Micro cracks and microstructures in neighborhood of primary deformation zone)

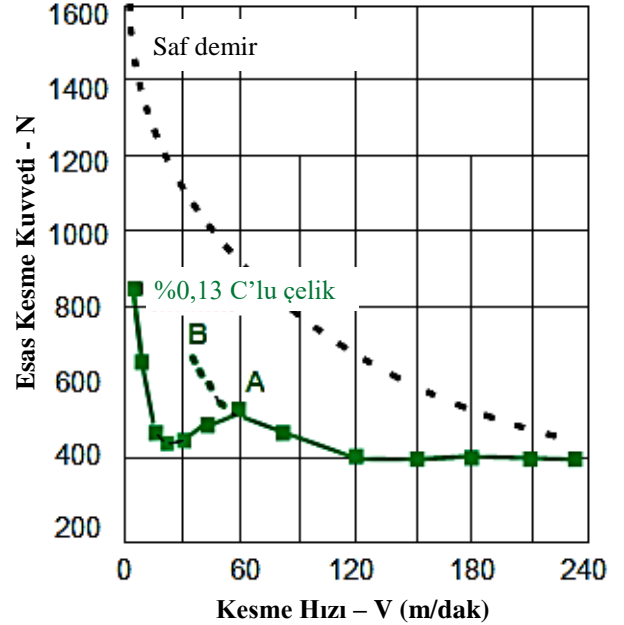
Şekil 9’da saf demire ilave edilen C, N, P gibi alaşım elementlerinin tornalama sürecindeki ilerleme kuvvetine etkisi gösterilmiştir [29, 31]. Burada, azot katkısının sağladığı etkinin tersine, C ve P oranındaki artışla birlikte yatay (ilerleme) kuvvetinin düştüğü görülmektedir. Bu durum, birincil deformasyon bölgesindeki gerilim konsantrasyonu sebebiyle boşluk ve mikro çatlakların başlangıcını oluşturan karbon ve fosfor içerikli ikincil fazların varlığına bağlanabilir. Demir içindeki azot varlığının ilerleme kuvvetini artırma etkisi ise, ikincil faz oluşturmaksızın, azotun arayer katı eriği olarak demir kafesindeki deformasyona karşı direnciyle ilgilidir.



Şekil 9. C, P, N, miktarı ile ilerleme kuvveti arasındaki ilişki [29]. (Effect of C, P and N contents on horizontal force)

Saf demir ve % 0,13 karbonlu bir çeliğin 6°'lik talaş açısıyla işlenmesi sırasında tespit edilen kesme kuvveti eğrileri Şekil 10’da verilmiştir. Karbonlu çelik eğrisinde orta hız aralığındaki sapma yığıntı talaş etkisini gösterir. Bu olay saf metallerde olmayan fakat çift fazlı alaşımların işlenmesi sırasında gözlenen olağan dışı bir sapmadır. Kararlı yığıntı talaş durumunda kuvvetler genellikle anormal olarak düşer. Yığıntı talaş, takım temas yüzeyini kısaltmış gibi davranır ve takım - talaş

temas alanındaki azalma, kesme kuvvetlerinde azalmaya sebep olur [32].



Şekil 10. Karbon oranının esas kesme kuvvetine etkisi [31] (Effect of carbon content on main cutting force)

Ağırlıkça % 0,13 karbonlu çeliğin kesme işleminin başında takım üzerinde YT oluşur. Birkaç cm’lik kesme sonunda 60 m/dak üzerindeki kesme hızında YT giderilir. Bu hızın altında kesme işlemi boyunca yığıntı talaş devam eder. Üzerindeki hızlarda ise, yumuşak çeliğin davranışı kesme kuvvetindeki düşüş bakımında saf demirle benzer ilişkiyi gösterir. % 0,13 C’lu çelik saf demirle karşılaştırıldığında takım-talaş temas uzunluğunun azaldığı ve kesme düzlemi açısının arttığı vurgulanır. Kesme hızı 60 m/dak civarında iken yumuşak çelik için kesme düzlemi açısı 14°, saf demir için ise 6,5°’dir. Bu kesme kesme hızında, talaş kalınlıklarındaki düzensizlik ve ikincil deformasyon bölgesinin kalınlığında artış mevcuttur. Kesme hızındaki artışla

daha düzenli bir talaş ve daha düşük kesme kuvveti ile birlikte, ikincil deformasyon bölgesi kalınlığı azalır. Düşük kesme hızında ise % 0,13 C'lu çelik, saf demire göre farklılık gösterir. 1,5 m/dak'da kesme kuvveti bağıl olarak yüksektir ve talaş dilimlidir. Kesme hızındaki artışla birlikte kesme kuvvetinde hızlı bir düşüş vardır. Sürekli talaş oluşumunun yanında 4,5 ila 6 m/dak civarında takım üzerinde YT oluşur. Düşük kesme hızlarında YT kalınlığı fazladır 60 m/dak'a kadar boyutu giderek azalır ve yaklaşık 60 m/dak'da kaybolur. Takımın etkin talaş açısını artıran yığıntı talaş, takım-talaş temas uzunluğunu azaltarak kesme kuvvetini düşürür. Fakat aynı zamanda YT, kesme enerjisini artıran kör bir takım gibi kesmeye de neden olabilir. Eğer yığıntı talaş oluşmasaydı kesme kuvveti Şekil 10'da BA ile gösterilen eğriyi takip edecektir.

Kesme hızı ve talaş açısındaki artışla mikro çatlakların oluşuma eğilimi azalır [26-30]. Kesme hızı/kesme kuvveti ilişkisi saf veya alaşım malzemelere göre değişkenlik göstermektedir. Tek fazlı saf malzemelerde genellikle artan kesme hızına rağmen kesme kuvvetlerinde düşüş görülür. Bu durum, talaş kaldırma sürecinde birincil deformasyon bölgesindeki iç sürtünme ve ikincil deformasyon bölgesindeki iç ve dış sürtünme kaynaklı ısı oluşumuna ve takım-talaş temas uzunluğunun kısalmasına bağlanır. Zira artan kesme hızı ile birlikte birim zamanda artan sürtünme işi daha fazla ısı oluşumuna ve dolayısıyla talaş kaldırma sıcaklıklarının artmasına sebep olur. Artan sıcaklıkla birlikte, birincil ve ikincil deformasyon bölgelerindeki malzeme mukavemetinin azalması kesme gerilmesini ve sürtünme katsayısını düşüreceğinden [25, 33, 34] kesme kuvvetlerinde azalma görülür. Ancak çok fazlı veya alaşım malzemelerde kesme hızı/kesme kuvveti ilişkisi daha farklı olur. Kesme hızı ve malzemenin alaşımlanması sonucu akma mukavemetindeki artışla kesme düzlemi açısı da artar. ikincil deformasyon bölgesinin kalınlığı ve takım-talaş temas uzunluğu, malzemenin mukavemetindeki ve kesme hızındaki artışla birlikte azalır [16]. Bu durum ise talaş kaldırma kuvvetlerinde azalmaya sebep olur.

2.2. Diğer Alaşım Elementlerinin Etkisi (Effect of The Other Alloying Elements)

Talaşlı işlenebilirliği en çok artıran yumuşak ikincil fazları oluşturan elementlerdir. Bunların arasında en etkili olanı kurşun ve MnS parçacıklarıdır. Ağırıkça % 0,1 - 0,35 S veya % 0,1 - 0,35 Pb veya bunların her ikisinin ilavesi ile üretilen otomat çeliklerinde kesme kuvvetleri, kesme sıcaklıkları ve takım aşınma miktarı azalır [7-13, 35-38].

MnS kalıntılarının işlenebilirlikle ilgili rolü aşağıdaki gibi özetlemiştir [35];

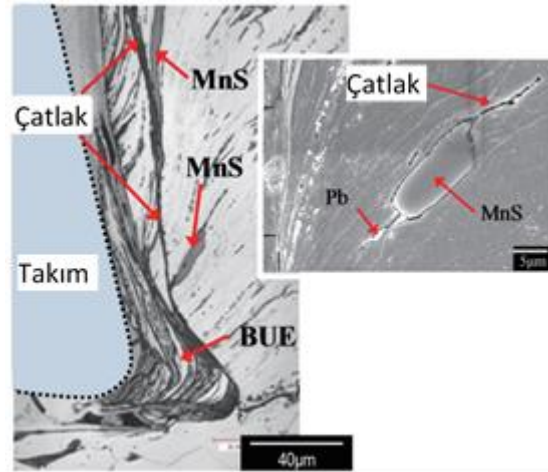
1) Birincil deformasyon bölgesindeki kesme düzlemi içinde çatlak oluşturarak kırılgan talaş meydana getirmek için bu düzlemde gerilimi artırıcı rol oynamalı,

2) İkincil deformasyon bölgesinde metalin akışına katılmalı fakat talaşın plastik akışını bozmamalı ve takım yüzeyini sürtünerek aşındırmamalı,

3) Kesme esnasında takım-talaş arayüzeyi sıcaklığında takım yüzeyinde difüzyonlu bir bariyer (tabaka) biçiminde bulunmalı,

4) Kesici takım yan yüzeyinin sürtünerek aşınmasına ve iş parçasında pürüzlü yüzey üretimine engel olmalıdır.

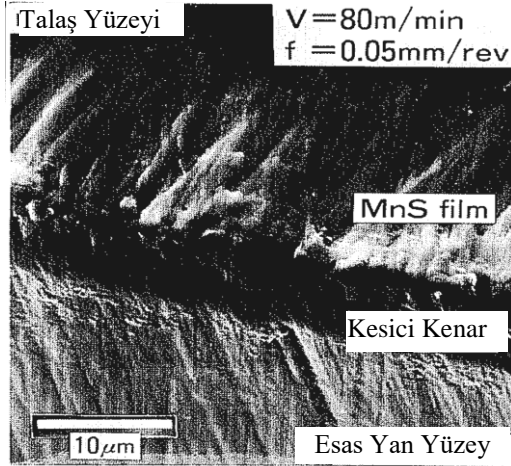
Çeliğe yeterli ve yüksek miktarlarda katılan (Mn) ve kükürt (S), MnS şeklinde bağlanarak kalıntılar (inklüzyonlar) oluştururlar. MnS kalıntıları talaş oluşum sürecinde birincil deformasyon bölgesinde mikro çatlaklar oluşturarak (Şekil 14) kesme gerilmesini düşürür. Böylece kesme kuvvetlerindeki düşüşe paralel olarak tezgâh güç tüketimi azalır [39-42]. Ayrıca, talaş kaldırma sıcaklığı düşürülerek takım ömrü artırılır. Talaş gevrekleştirilerek kısa talaş oluşumu sağlanır. Yüksek deformasyon yeteneği sonucu MnS'ler takım-talaş temas yüzeyinde tabaka oluşturarak (Şekil 15) katı yağlayıcı görevinde bulunur. Takım yüzeyinde bu tip tabaka oluşumu sürtünme katsayısını düşürür. Fakat yüzeyde oluşan tabaka talaş yoluyla uzaklaştırıldığından, tabaka oluşumu sürekli tekrarlanmalıdır [13, 36, 37].



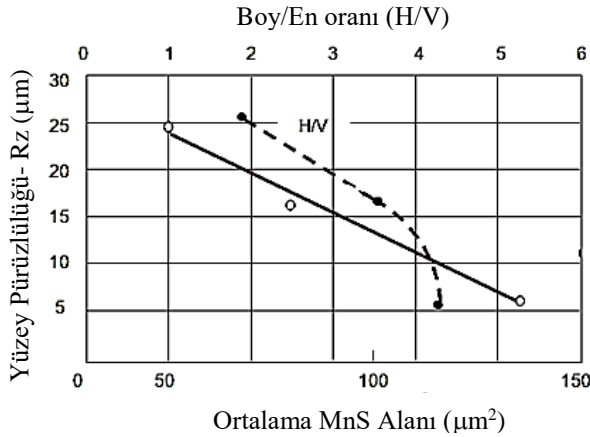
Şekil 14. Pb'li çeliğin I. Deformasyon bölgesinde MnS ve mikro çatlak [39] (MnS and microcrack in I. Deformation zone of steels with Pb)

Talaş kaldırılan kesitteki ortalama MnS alanının artması ve bu yumuşak inklüzyonların boy/en oranındaki artışla birlikte işlenen yüzeyin pürüzlülüğü azalır (Şekil 16). Bu durum, MnS'ün plastik deformasyon kabiliyetinin düşük olduğunu gösterir [44]. Sürekli dökümle üretilen kükürtlü otomat çelikleri ingot döküme göre hemen hemen aynı işlenebilirliğe sahiptir. Fakat mikroskobik hataya sahip olmaması bakımından otomat tezgâhtaki işlenebilirlik deneyine göre [45], sürekli dökümle üretilen otomat çeliğinin işlenebilirlik özelliği daha iyidir [46, 47]. Yumuşak çelik ile kükürtlü otomat çeliğinin işlenmesinde kesme kuvvetleri kıyaslandığında kükürtlü çelikte kesme kuvvetleri daha düşüktür. Bu olay,

kükürtlü çeliğin deformasyon bölgesindeki mikro çatlakların fazlalığı ile ilgilidir [48, 49]. Genel olarak işlenebilirlik değerlendirilmesi yapıldığında ise, küresel forma yakın MnS inklüzyonunun işlenebilirliği arttırdığı, çeliğin deformasyon işlemleri sürecinde çubuksu forma dönüşen inklüzyonların ise göreceli işlenebilirlik sayısını düşürdüğü söylenebilir (Şekil 17) [50].



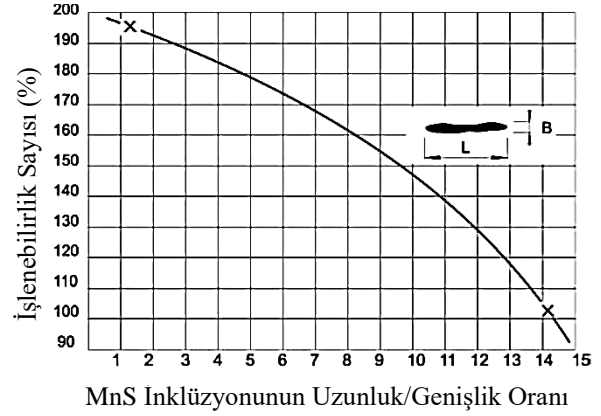
Şekil 15. ZrO₂ takımın talaş yüzeyinde MnS tabakası [43] (MnS layer on rake face of ZrO₂ tool)



Şekil 16. MnS oranı ve biçiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi [48] (Effect of MnS shape and rate on surface roughness)

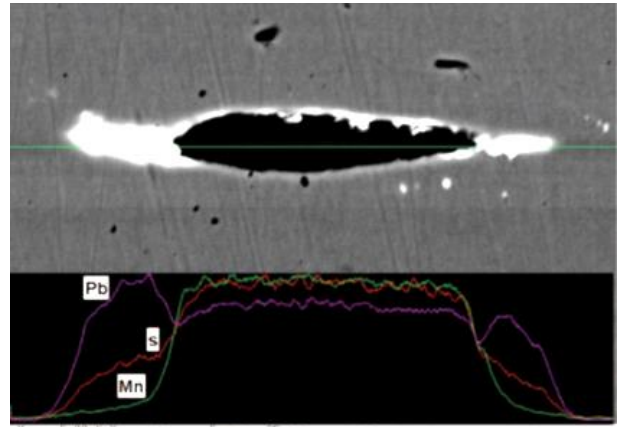
Çeliklerinin yüzey pürüzlülüğü takım malzemesinden de etkilenmektedir. Otomat çeliklerinin farklı kesicilerle işlenmesinde, minimum yüzey pürüzlülüğü ZrO₂ esaslı takımla işlerken oluşur. Daha büyük yüzey pürüzlülükleri sırasıyla, TiN, ZrN, Al₂O₃, TiC, HfO₂, WC+Co, La₂O₃ ve Fe₃C içeren takımlarla işleme ile meydana gelir. MnS kalıntılarının tercihen ZrO₂, TiN, ZrN ve Al₂O₃ takım malzemelerine yapışma eğilimi fazladır. Bu sayede, takım yüzeyinde MnS filmi rahatlıkla oluşur (Şekil 16). Diğer yandan HfO₂, WC+Co, Fe₃C ve La₂O₃ içeren takım yüzeyine ferrit fazının yapışma ve yığıntı talaş oluşma eğilimi görülür. TiC ise kuvvetli şekilde MnS kalıntılarına ve ferrit fazına yapışır. Takımlara MnS kalıntılarının yapışması,

takımların sadece fiziksel özelliklerine bağlı olmayıp kimyasal bileşimine de bağlıdır. Kimyasal etkileşim, çelikteki çok az MnS kalıntısı için dahi takım yüzeyinde MnS tabakası oluşturmayı sağlayabilir [44].



Şekil 17. Çeliklerin işlenebilirlik sayısına MnS biçiminin etkisi [50] (Effect of MnS shape on machinability rate of steels)

Çözünürlüğün olmaması nedeniyle kurşun, çelik mikroyapısı içerisinde küçük taneçikler şeklinde dağılır. Katılaşma sırasında genelde MnS tanelerine takılır ve haddeleme de benzer bir uzama göstererek MnS'lerin çevresini sarar ve/veya uçlarına tutunur (Şekil 18).



Şekil 18. Pb ile sarılmış MnS inklüzyonu [50] (Pb enveloping an MnS inclusion)

Kurşun, yumuşak kalıntı karakteristiğine bağlı olarak işlenebilirliği (MnS'lerin etkisini arttıracak şekilde) olumlu etkiler. İlgili etki mekanizmaları kısmen değişiktir [12, 50];

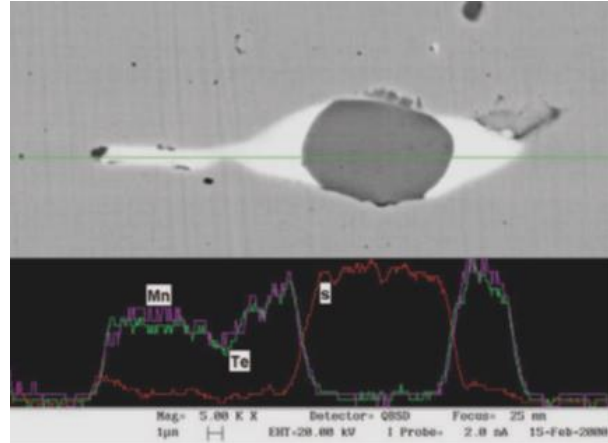
- Kurşunun oldukça düşük ergime sıcaklığı ve çok sünek olması, talaş kaldırma sürecinde kurşun taneçiklerinin yoğun plastik deformasyondan geçmesini ve ergimesini sağlar. Sıvı kurşun, çatlak oluşumunu kolaylaştırır. Oluşan talaş parçacıklarının tekrar kaynamasını engelleyerek avantajlı talaş oluşma eğilimini artırır [13].
- Takım/talaş arayüzeyinde oluşan sıvı kurşun sürtünmeyi azaltarak sürtünme aşınmasını

engeller. Düşük miktarlarda yapılan kurşun katkısıyla mangan sülfürün işlenebilirlik etkisi yoğun olarak artırılır.

- MnS ve Pb'nin takım talaş arayüzeyinde devreye girişi talaşların takım yüzeyine yapışarak yığıntı talaş oluşmasını ve krater aşınmasını geciktirir [51, 52].

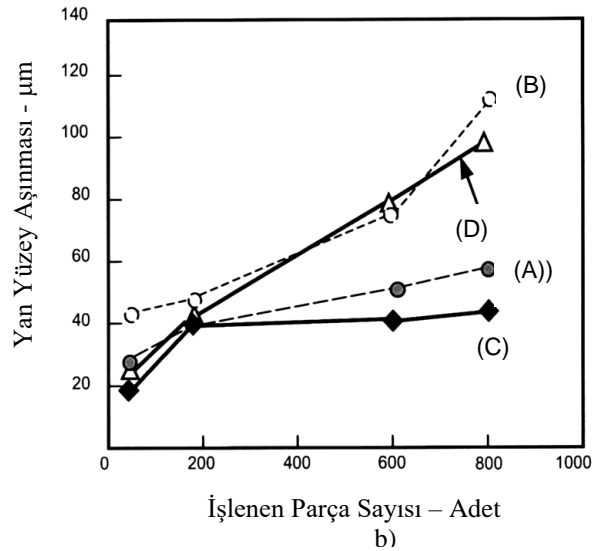
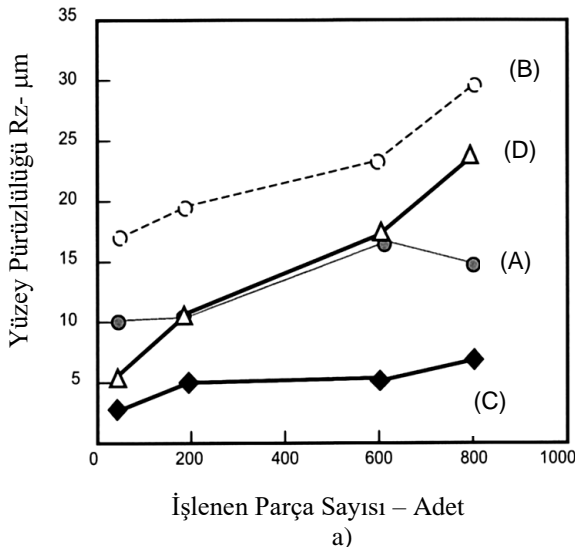
Kükürt ve kurşun ilavelerinden başka, fosfor (P), tellurium (Te), selenyum (Se) ve bismut (Bi) ilaveleri ile çeliğin işlenebilirliği artırılır. Karbon, fosfor ve azot (N)'un yüzey pürüzlülüğü ve yatay (ilerleme) kuvvet üzerine etkisi Şekil 9 ve 10'da verilmişti. Çelikteki Pb ve Bi miktarındaki artışla takım aşınma miktarı azalır [53]. Özellikle yüksek kesme hızlarında Bi, kurşundan daha faydalıdır. Fakat düşük kesme hızlarında durum tersinedir [54, 55]. Otomat çeliklerine Te ilavesi ile kesme kuvvetleri düşürülür ve takım ömrü artırılır [56].

Selenyum (Se) ve tellurium (Te) işlenebilirliği geliştirmede benzer mekanizmalara sahiptir. Bu mekanizma, MnS'nin sıcak deforme edilebilirliğini azaltarak morfolojisinin kontrol edilebilmesiyle ilgilidir. Çelik içindeki MnS Şekil 19' da görüldüğü gibi, mangantellürür (MnTe) veya PbTe ile birlikte MnS ötektik formda sarılabilir. Bu sayede sıvı kabuk yüksek gerilmeyi absorbe eder ve MnS'nin deformasyonunu kısıtlar. Bununla birlikte, bütün MnS'ler mangantellürür'le çevrelenmez ancak, etkin mekanizmanın esası Te'nin kükürtlerin küreleştirilmesini teşvik etmesine dayanır. Bu mekanizma, malzemenin mekanik özelliklerindeki anizotropiyi azaltmanın yanında işlenebilirliği artırır [50].



Şekil 19. Çelikteki MnTe tarafından sarılmış sülfid inklüzyonu [50] (An inclusion of sulphide surrounded by manganese telluride)

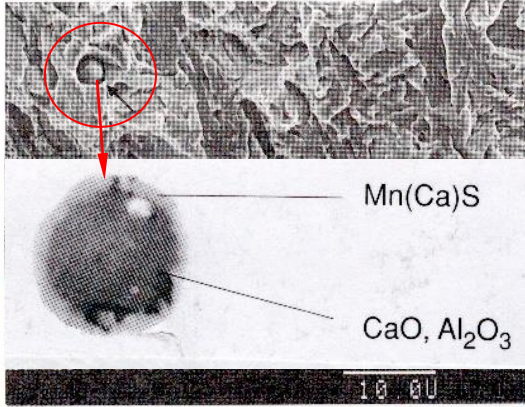
Bununla birlikte, son yıllarda çevreye olan duyarlılığın artması sebebiyle kurşunlu otomat çelikleri (A) yerine geliştirilmeye çalışılan kurşunsuz otomat çelikleri (B) ile ilgili yapılan çalışmalar Şekil 20'de gösterilmiştir [52]. Kurşunsuz otomat çeliklerdeki MnS boyutları ve dağılımlarını değiştirilerek geliştirilen (C) düşük karbonlu otomat çeliklerinin işlenebilirliğinde önemli avantajlar elde edilmiştir. Çelik üretim süreci kontrol edilerek sağlanan homojen dağılımlı çok küçük MnS inklüzyonları ile takım ömrü ve yüzey kalitesinde kaba ve heterojen dağılımlı MnS içeren (D) otomat çeliklerine göre önemli gelişmeler sağlamıştır. Şekil 20'de, iri ve heterojen dağılımlı MnS inklüzyonları içeren çelik ile kurşunsuz otomat çeliğinde yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım yan yüzey aşınma miktarının çok yüksek olduğu görülmektedir. Kurşun katkısı ile her iki olumsuz etki de minimize edilmiştir.



Şekil 20. MnS morfolojisinin otomat çeliklerin işlenebilirliğine etkisi [52] a) Yüzey kalitesine etkisi b) Takım aşınmasına etkisi (Effect of MnS morphology on machinability of free cutting steels a) Effect on surface roughness b) Effect on tool wear)

Ancak, kurşun içermemesine rağmen yalnızca MnS inklüzyonunun boyutları minimize edilerek homojen dağılım sağlanıp geliştirilen otomat çeliğindeki yağlayıcı etkisiyle takım ömründe avantaj sağlanır. Ayrıca, gerek kesme düzlemi boyunca homojen çatlak oluşturma etkisi ve gerekse çok daha küçük boyutlarda oluşan yığıntı talaş sebebiyle minimum yüzey pürüzlülüğü elde edilir.

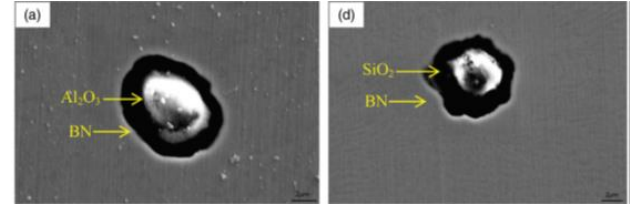
Çelikte işlenebilirliğin artırılmasının bir yolu da oksitlik kalıntıların boyut ve miktar olarak azaltılmasıdır. Artan oksijen miktarı ile birlikte oluşan oksit türü sert inklüzyonlar, takım ömrünü kısaltarak işlenebilirliği düşürür [57, 58]. Bu sebeple oksitler, daha yumuşak MnS'li bir kabuğun içine alınır. Çeliğe katılan kalsiyum'un (Ca) kükürde ve oksijene yüksek aktivitesinden dolayı alümina (Al_2O_3) taneciklerin etrafı Ca içerikli MnS ile sarılır [59-63]. Bu sayede oksit taneleri ile takım arası temas kaldırılır ve kükürt tanelerinin temas yüzeyinde yağlayıcı tabaka oluşturmasıyla işlenebilirlik artırılır (Şekil 21) [13, 64, 65]. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, hexagonal bor nitrid (h-BN) katkılı otomat çeliklerinin geliştirilmesinin [66, 67] yanında, benzer mekanizma ile Al_2O_3 ve SiO_2 gibi sert inklüzyonların, hegzagonal BN çökeltiler içinde kalacak şekilde kaplanmasının (Şekil 22) takım ömrünü arttırarak çeliğin işlenebilirliğini geliştirdiği belirlenmiştir [68, 69].



Şekil 21. Modifiye edilmiş Al_2O_3 kalıntısı [59] (Modified Al_2O_3 inclusion)

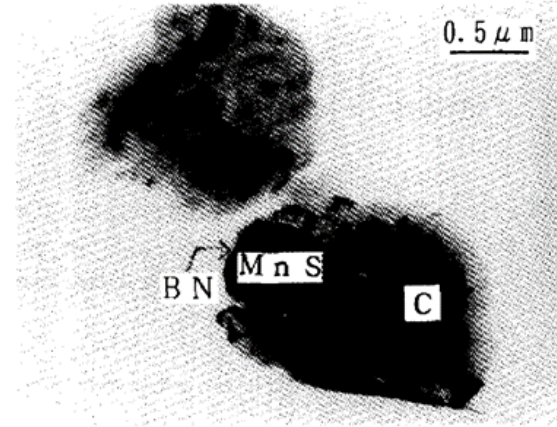
Grafit'in kesme düzleminde gerilmeyi arttırıcı ve takım yüzeyinde yağlayıcı etkisi sebebiyle işlenebilirliği geliştirdiği ve çeşitli dökme demirlerde grafit morfolojisinin işlenebilirliğe etkisi bilinmektedir. Bununla birlikte çeliklerde grafitin işlenebilirliğe etkisi de araştırma konusu olmuştur [70]. Orta karbonlu grafitik çeliklerin işlenebilirliği konusunda, yaklaşık %0,5 C'lu çeliğe ilaveten %1,2 Si ve %0,0025B ilavesiyle sağlanan alaşımlama ile üretilen döküm kütüğün, sıcak haddelenmesi ve akabinde uygulanan ısıl işlemlerle sağlanan grafit çökeltileri Şekil 23'de verilmiştir. Grafitik çelikler (G1-G2/115 VSD) ile, sade karbonlu makine imalat çeliği (S55C/188VSD), kükürtlü otomat çeliği (S/190VSD) ve kalsiyum içerikli kurşunlu otomat çeliğinin (PSC/196VSD) işlenebilirlikleri

kıyaslandığında, grafitin özellikle takım ömründe önemli avantajları mevcuttur [70].

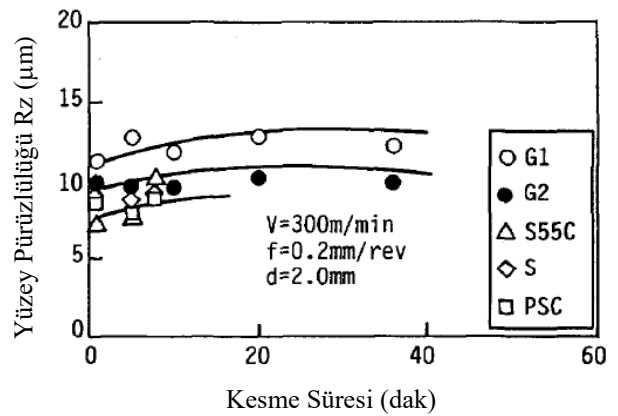


Şekil 22. a) BN- Al_2O_3 ve b) BN- SiO_2 bileşimi inklüzyonlar [68] (a-BN- Al_2O_3 and b-BN- SiO_2 inclusions)

Kaplamalı sementit karbür takımla yapılan tornalama sürecinde diğer otomat çeliklerine göre yüzey kalitesi kötü olan grafitli çeliklerden birkaç mikron daha ince grafit partikül içeren G2 çeliğinin yüzey pürüzlülüğünün diğerinden (G1) daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 24). Daha ince dağılımlı grafit çökeltileri ile yüzey pürüzlülüğü iyileştirilebilmektedir.



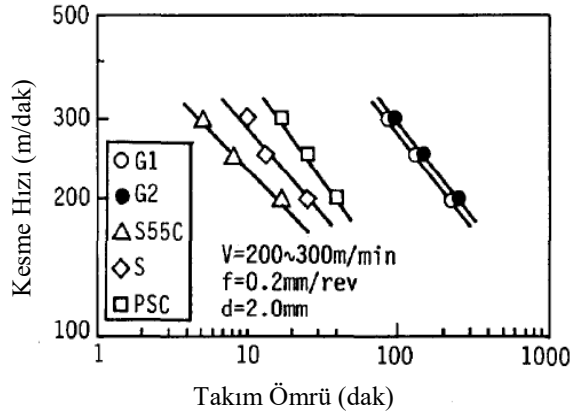
Şekil 23. Grafitlerin taramalı elektron mikroskop görüntüsü [70] (SEM micrographs of graphite)



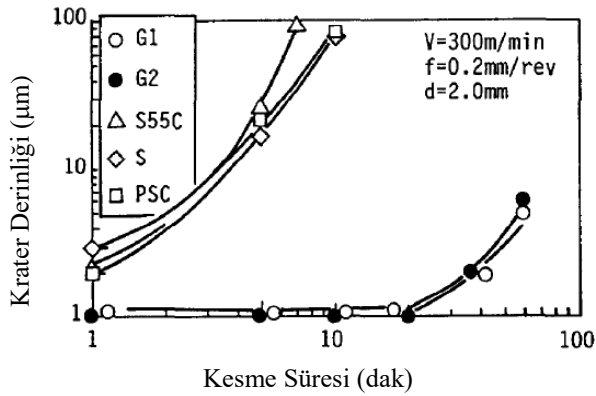
Şekil 24. Yüzey pürüzlülüğü – kesme süresi ilişkisi [70] (Surface roughness and cutting time relationship)

Şekil 25 ve Şekil 26'da ise üretilen grafitik çeliklerin kaplamalı sementit karbür kesici takımla işlenmesi sırasında yan yüzey ömrü kriterine ($VB=0,2mm$) ve krater aşınma miktarına (KT) bağlı kesme hızı ilişkileri

gösterilmiştir. Grafit çökeltili çeliklerin takım ömrüne olumlu etkileri açıkça görülmektedir. Grafit katkısı, sade karbonlu çelikten (S55C) yaklaşık 20 kez, kurşunlu otomat çeliğinden ise yaklaşık 7 kat takım ömrünü arttırmıştır. Grafit çökeltilerinin sertmetal kesicinin krater aşınmasına olumlu etkisi ise çok daha fazladır. Bu çeliklerin 300 m/dak kesme hızında işlenmesi sürecinde yaklaşık 20 dakikalık kesme süresine rağmen minimum krater aşınması oluşmuştur. Bu bakımdan diğer çelik ve otomat çelik türlerine göre süper takım ömrü sağlanmıştır.

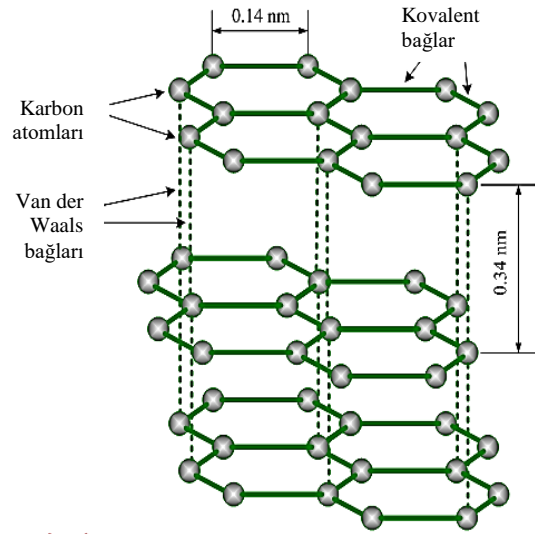


Şekil 25. Kesme hızı-takım ömrü ilişkisi (VB=0,2mm) [70] (Tool life and cutting speed relationship)



Şekil 26. 300 m/dak kesme hızında krater aşınması [70] (Crater wear at cutting speed of 300 m/min)

Bu sonuçlar, grafitin süper yağlayıcı etkisine bağlanır. Ferrit matris deki grafit oranının artmasıyla birlikte takım-talaş arayüzündeki sürtünme katsayısının da önemli oranda düşeceği bellidir ve bu durum grafitin kristal yapısıyla ilişkilendirilir. Karbonun hexagonal kristal kafes yapısındaki (Şekil 27) grafit hali ile oluşan atomik bağ yapıları yağlayıcı özelliğini geliştirir. Birbirlerine güçlü kovalent bağlarla bağlanmış karbon atomlarının oluşturduğu tabakalı düzlemlerin aralarındaki zayıf Van der Waals bağ kuvvetleri sayesinde katmanlar arasında kolayca klivaj kırılma meydana gelir.



Şekil 27. Grafitin Kristal Yapısı (Crystal structure of graphite) [71]

3. ISIL İŞLEMLER VE MİKROYAPININ İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİ (EFFECT OF MICROSTRUCTURE AND HEAT TREATMENT ON MACHINABILITY)

İşlenebilirliği geliştirmek amaçlı çeliklere uygulanan genel ısıl işlemler tam tavlama, küreselleştirme ve normalizasyon ısıl işlemi olarak sıralanabilir. Özellikle çelikteki karbon oranına göre belirlenen bu ısıl işlemlerden amaç, düşük karbonlu çeliklerde yüksek dayanım ve sertlik sağlayacak mikroyapı, yüksek karbonlu çeliklerde ise daha düşük dayanım ve sertlik sağlayacak mikroyapı elde etmek amaçlıdır [72, 73].

Çeliğin karbon miktarına bağlı işlenebilirliği için en uygun mikroyapıyı veren ısıl işlemler, aşağıdaki gibi özetlenebilir [74-77];

- 1) Düşük karbonlu ($\leq 0,15\%$ C) çelikler normalleştirilmiş veya soğuk çekilmiş durumda en iyi işlenebilirliğe sahiptir. Küçük ferritik tane boyu ve soğuk deformasyon yoluyla artırılan sertlik işlenebilirliği iyileştirme eğilimindedir.
- 2) Yumuşak çelikler ($0,15\%$ C - $0,45\%$ C) tam tavlama veya normalleştirme ısıl işlemi sonunda maksimum işlenebilirlik gösterir. Bu işlemler lamelli perlitik yapıyı meydana getirir. Küreselleştirilmiş bir yapı, özellikle yüzey kalitesi ve talaş biçimi bakımından kötü işlenebilirlik gösterir.
- 3) Orta karbonlu ($0,45\%$ C - $0,80\%$ C) çelikler en iyi işlenebilirlik için düşük sertlik sağlayan kaba perlitik ve küreselleştirilmiş karbür yapıya sahip olmalıdır.
- 4) Yüksek karbonlu ($> 0,85\%$ C) çelikler, tamamen küreselleştirilmiş mikroyapıda en iyi işlenebilirliği verir.

- 5) Küçük östenitik tane boyutlu bir çelik, işleme sırasında daha fazla güç absorbe eder. Ancak ince taneli çelikler bitirme tornalamalarında iyi yüzey kalitesi gösterir.
- 6) Heterojen faz dağılımına sahip bantlı ve kaba görünümdeki mikro yapılar kötü bitirme yüzeyleri ve kısa takım ömrüne sebep olur.

Açıkçası bu veriler genel olarak çeliklerin işlenebilirliğini optimize etmek için uygulanan işlemleri tanımlar ve bilinen genel literatür verileridir. Önerilen bu ısıl işlemlerle birlikte malzemelerin sertlikleri kısmen artırılır veya sertlik de önemli derecede düşüş sağlanır. Bir çeliğin işlenebilirlik değerlendirmesi yapılırken genel yaklaşım, sertlik değerinin dikkate alınmasını içerir ve artan sertlikle birlikte takım aşınması artacağı için takım ömrü bakımından işlenebilirliğin kötüleştiği belirtilir. İşte bu genel yaklaşım çerçevesinde artan veya azalan sertlikle birlikte takım aşınması da artıp azalacağından işlenebilirliğin de azalıp artmasından bahsedilir. Ancak takım ömrünün dikkate alındığı işlenebilirlik değerlendirilmelerinde işlenen malzemenin sertliği yeter değerlendirme kriteri değildir. Zira aynı sertlikte ve aynı fazları içeren farklı mikroyapı dağılımına sahip malzemelerin takım ömürlerinin değişkenliği ile birlikte, takım aşınma mekanizmalarının da farklı olduğu görülebilmektedir. Bazen aynı kimyasal kompozisyonda ve fakat ısıl işlemlerle daha düşük sertlik sağlanan farklı mikroyapıdaki aynı çelik malzemenin takım ömrünü kısalttığı da görülebilmektedir. Bu bakımdan, takım ömrü kriterleri ile işlenebilirlik değerlendirilmesi yapılırken işlenen malzemenin sertliğinden ziyade mikroyapısı dikkate alınmalıdır [24, 25, 81]. Bu konuya ilk örnek, takım ömrü bakımından haddelenmiş durumdaki malzeme (SAE 4120), küreselleştirilmiş daha yumuşak malzeme ile kıyaslandığında, en az takım aşınması hadde malzemede tespit edilmiştir. Yani, küreselleştirme ısıl işlemi sonrası sağlanan sertlik düşük olmasına rağmen takım ömrü kısalmıştır. Düşük kesme hızında ferritik-perlit mikroyapıdaki numuneler, ısıl işlemsiz ferritik-beynitik hadde numune ile kıyaslandığında genellikle düşük işlenebilirlik gözlenir. Fakat yüksek kesme hızı aralığında farklılık oluşur [19].

Bu bölümde dikkat çekilmek istenen husus, yukarıda belirtilen ve çok önemsenmeyen mikroyapının homojensizliği, yani belirtilen mevcut ısıl işlemlerle istenen mikroyapılar elde edilmiş olsa dahi, mikroyapıdaki fazların heterojen dağılımının işlenebilirliği de karmaşık hale getirdiğidir. Zira, çeliğin karbon miktarına uygun seçilen ve uygulanan ısıl işlemlerle sağlanan ferrit+perlit bantlı yapısındaki değişkenlik ve/veya perlit kolonilerinin heterojen dağılımı, takım ömrü ve yüzey kalitesi bakımından işlenebilirliği iyileştirmek yerine kötüleştirir. Bu konuda araştırmacıların yaptığı çalışmalar, uygulanan ısıl işlemlerle elde edilen mikroyapı ve sertlik değişimlerinin her zaman uygun veriler sağlamadığı ve

çelişkili işlenebilirlik sonuçları içerdiği yönündedir [15-19, 78-81].

3.1. Takım Ömrü (Tool Life)

Talaşlı imalat öncesi ısıl işlem gerekliliğini genellikle çelikte bulunan karbon oranı belirler. Düşük karbonlu çeliklerde normalizasyon ısıl işlemi ile artırılan mekanik özelliklerle birlikte çeliğin işlenebilirliği geliştirilirken, orta veya yüksek karbonlu çelikler için uygulanan tam tavlama veya küreselleştirme işlemleri ile takım ömrü artırılarak işlenebilirlik geliştirilir. Genellikle bu ısıl işlemlerle orta ve yüksek karbonlu çeliğin sertliğini azaltacak bir mikroyapı sağlanarak takım aşınma oranı minimize edilmeye çalışılır [37, 45]. Sade karbonlu çeliklerde karbon miktarına bağlı olarak kaba perlitik yapı veya küresel sementitli mikroyapı takım ömrü bakımından iyi işlenebilirlik özellikleri sağlar [32,72]. Dolayısı ile sementit fazının oranı ve morfolojisi takım ömrünü etkileyen önemli bir faktördür. Özellikle takımın abrasiv (çizilme) aşınma direncini belirleyen bu fazın plakalı veya küresel şekil ve morfolojisindeki değişkenlik, ferrit fazının da oran ve morfolojisini değiştireceğinden takımın difüzyon, yapışma ve yorulma ile aşınma dirençlerini de belirler [16,19,75,82]. Son yıllarda çeliklerin işlenmesinde yaygın olarak kullanılan kübik bor nitrür (CBN), kesicilerin yanında Si₃N₄, Al₂O₃, ve SiAlON esaslı seramik kesiciler yüksek aşınma dirençleri nedeniyle tercih sebebi olmaktadır. Çeliklerin işlenmesi sürecinde sertmetal ve sermet gibi karbür kesicilerin tersine genellikle abrasiv, yapışma ve difüzyon aşınma mekanizmalarına karşı yüksek dirençleri sert çeliklerin işlenmesinde de kullanım imkanı sağlamaktadır. Bununla birlikte işleme şartlarında, işlenen malzeme ile kesici arasındaki etkileşime bağlı oluşan kimyasal ve mekanik/ısıl etkilerle aşınmalar da meydana gelmektedir [83-85]. Çelik ve kesici takım malzemesi arasındaki etkileşimle oluşan aşınmalar, Co veya Ni bağlayıcı matrisle üretilen sertmetal (WC-Co) veya sermet (TiC/TiN-Co,Ni) kesicilerde daha yaygındır. Çeliklerin işlenmesinde yoğun olarak kullanılan bu kesicilerin abrasiv aşınma ve ısıl direncini artırmak için %90 'ı geçen oranlarda tungsten karbür (WC) ve/veya titanyum karbonitrür (TiCN) seramik parçacıklar kullanılır. Parçacıkları bağlayan matris malzemesi olarak ise kobalt (Co) veya nikel (Ni) mevcuttur. Kullanılan WC'inn en önemli karakteristiği diğer sertmetallere göre süper tokluğa sahip olmasıdır. İkinci önemli karakteristik özelliği ise, kobalt, nikel ve demirle iyi ıslatabilirliğe ve birleşme eğilimine sahip olmasıdır. Bu elementlerle yüksek ıslatabilirliği, WC' ün kompozit yapı oluşturmasını mümkün kılar [86-90]. Kobalt oranı %4-28 arasında değişir. Günümüze, 4-10 µm'lik kaba denilebilecek parçacık boyutlarından 0,5-0,8 µm parçacık boyutuna kadar inceltilmiş mikroyapı içeren ticari kaliteleri bulunmaktadır. Bu seramik katkıların oranlarındaki artışla sağlanan yüksek sıcaklık sertliği ve abrasiv aşınma dirençlerine rağmen, Co bağlayıcılar, takımın abrasiv etki dışında diğer aşınma mekanizmalarına karşı zafiyetini oluşturmaktadır. Özellikle çelik malzemelerin işlenmesinde kullanılan Co

matrisli kesicilerde oluşan difüzyon ve yapışma etkili aşınma mekanizmaları, abrasiv aşınmadan daha etkin olabilmektedir [91-95]. Bu durumda, genel bilinen aykırı bir ilişki içinde, çeliğin sertliği ile takım aşınması veya ömrü arasında manidar bir ilişki olmayabilir. Yani, daha yumuşak bir çelik işlenirken abrasiv aşınmadan ziyade difüzyon veya yapışma mekanizmalarıyla sertmetal takım daha fazla aşınabilmektedir. Benzer şekilde, tam tavlama ısıl işlemi ile sertlik düşürülmesine rağmen, artan perlit+ferrit bantlaşma oranı ve bantlar arası mesafe, kesici takımında yorulma ile aşınmayı da etkin mekanizma haline getirebilir. Bu konunun ilk örneği % 0,45C'lu dövme çelikle yapılan işlenebilirlik çalışması olabilir [96, 97]. Orta karbonlu bu çeliğe uygulanan normalleştirme ısıl işlemi ile ince perlit ve ferrit yapısı oluşturulmuştur. Ferrit miktarı % 60 civarındadır ve sertlik 183 BSD'dir. Aynı çeliğe sürekli soğutma ısıl işlemi uygulanarak kaba perlitik yapı, % 40 ferrit oranı ve 199 BSD elde edilmiştir. İşlenebilirlik deneyleri sonunda 199 BSD'deki mikroyapıda daha uzun takım ömrü elde edilmiştir.

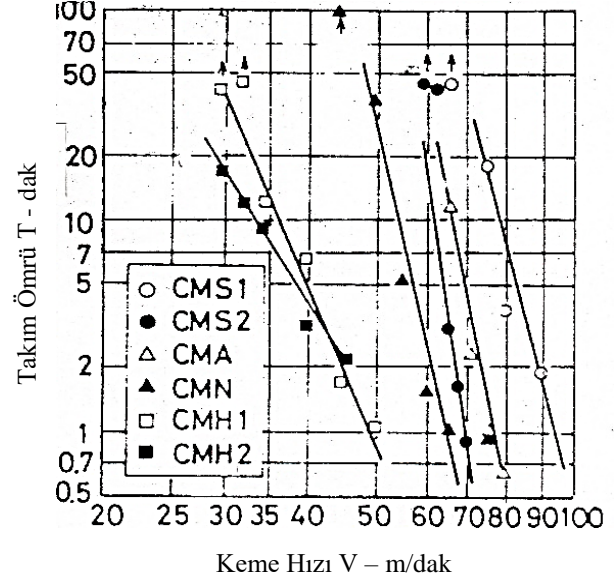
Benzer etki, 5120 çeliğine uygulanan izotermal tavlama ile sağlanan mekanik özelliklere bağlı işlenebilirlik çalışmasında da belirlenmiştir [15]. Bu malzemenin 15 dak'lık takım ömrü için kesme hızlarına (V_{15}) göre işlenebilirlik değerlendirmeleri Çizelge 2. de verilmiştir. Burada, işlenen malzemelerin sertlik değişimleri ile takım ömrüne dayalı işlenebilirlikleri kıyaslandığında anlamlı bir ilişki ortaya konmamaktadır. Zira, en düşük sertliğe sahip (149 BSD) çeliğin işlenmesinde 15 dak'lık takım ömrü kriterine yaklaşık 8 m/dak kesme hızında ulaşılrken, daha yüksek sertliğe (171 BSD) sahip farklı ısıl işlemli aynı çelik malzeme için de aynı kesme hızında takım ömrü kriterine ulaşılmıştır. Bu durumda, ısıl işlemlerle sertliği değiştirilen 5120 çeliğinin işlenebilirliğinin de sertlik değişimiyle manidar ilişki içinde olduğu söylenemez.

Çizelge 2. Çeşitli ısıl işlemlerle sağlanan sertliğe bağlı işlenebilirlik ilişkisi[15] (Relationship between machinability and hardness provided by various heat treatments)

Sertlik (BSD)	V_{15} (m/dak)
149	8
150	11
154	6
158	10
171	8
195	7

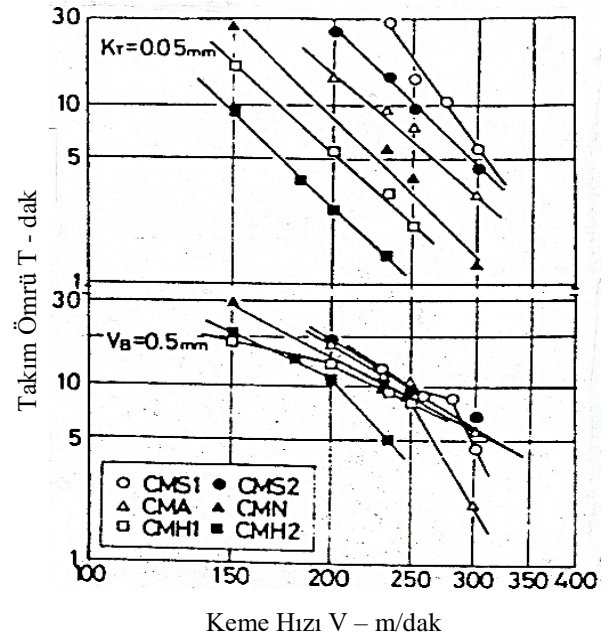
Diğer bir örnekte ise, 4135 çeliğine uygulanan ısıl işlemlerle sağlanan değişik mikroyapı ve mekanik özelliklere bağlı kesme hızı (V), takım ömrü (T) ilişkileri Şekil 28 ve Şekil 29'da verilmiştir [16]. Burada, HSS takım için (Şekil 28) en uzun takım ömrü,

küreselleştirilmiş (CMS1/146BSD ve CMS2/153BSD) mikroyapı ve minimum sertlik değerindeki malzeme işlenirken belirlenmiştir.



Şekil 28. HSS takım için mikroyapı ve sertliğe bağlı V - T ilişkileri [16, 97] (V-T relationships depend on microstructure and hardness for HSS tool)

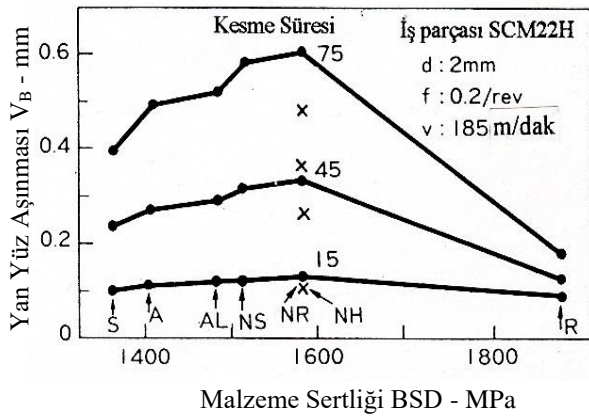
Tavllanmış (CMA/150BD), normalize edilmiş (CMN/187BSD) ve sertleştirilmiş/temperlenmiş (CMH1/238BSD, CMH2/308BSD) numunelerin sertliğindeki artışla birlikte azalan takım ömrü görülmektedir. İşlenen malzeme sertliği ile takım ömrü arasında genel olarak bilinen ve konuyla ilgili handbook'larda dahi belirtilen ilişki budur [16, 97, 98].



Şekil 29. P20 sertmetal takım için mikroyapı ve sertliğe bağlı V - T ilişkileri [16] (V-T relationships depend on microstructure and hardness for P20 tool)

Bununla birlikte aynı araştırmacının [16] aynı malzemeleri, sertmetal (P20) takım ile işleme sırasında krater aşınma kriteri ($KT=0,05\text{mm}$) için belirlenen V-T ilişkisi, HSS takımın V-T ilişkisi ile benzerlik göstermekle birlikte, ısıtma işlem türüne göre V-T sıralamalarında farklılık görülür (Şekil 29). Dikkat çekici en önemli husus ise, ısıtma işlemlerle sağlanan mikroyapı ve sertlik farklılığının, P20 takımın yan yüz aşınması ömür kriterine ($VB=0,5\text{mm}$) göre V-T ilişkisinde anlamlı sonuçların ortaya çıkmasıdır. Zira, 250 m/dak kesme hızı civarında, uygulanan ısıtma işlemle sağlanan sertlik değişimine bağlı takım ömründe anlamlı bir değişim belirlenmemiştir. En düşük sertlikteki CMS1 numunesi ile çok daha yüksek sertlikteki CMH1 numunesinin takım ömürlerinin çok yakın olduğu ve artan kesme hızı ile bu ilişkinin çok daha karmaşık hale geldiği görülmektedir.

İşlenen malzemenin özelliklerine göre farklı kesici takım malzemelerinin farklı aşınma dirençleri ve takım ömürleri gösterecekleri açıktır. Takım ömrü, takım - talaş arayüzündeki ortalama sıcaklık, kesme açısı ve YT oluşma eğilimi, açıkça belli olmamakla birlikte ısıtma işlemle değiştirilen mukavemet ve süneklik yoluyla kontrol edilir. ısıtma işlemi uygulanan düşük alaşımlı bir çelik, sertmetal takım ile işlendiğinde, aktif bir difüzyon aşınmasından dolayı krater aşınması takım/talaş arayüz sıcaklığı ile kontrol edilir [16]. Bu veriler aynı zamanda, çelik malzemelerin ısıtma işlemle değiştirilen sertlikleriyle ilişkili ve anlamlı bir takım ömrü gösteremeyebileceğini de ifade etmektedir.

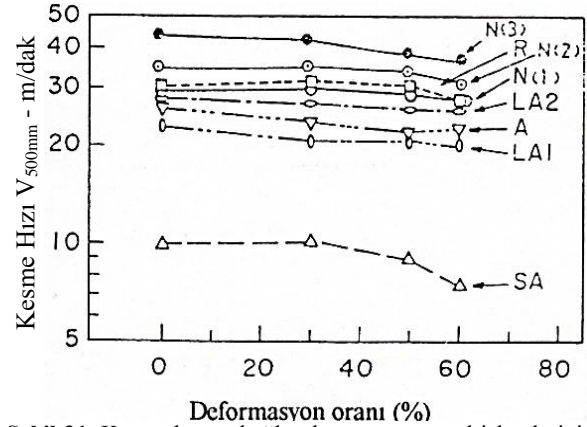


Şekil 30. Homojen olmayan mikroyapının yan yüz aşınmasına etkisi [18] (Effect of heterogeneous microstructure on flank wear)

Sıcak haddelenmiş (R) benzer 4122 çeliği için yapılan çalışmalarda, mikroyapıya bağlı frezelemedeki işlenebilirlikle ilgili bulgular Şekil 30'da verilmiştir [18]. Tavlama (A, Al), küreselleştirme (S) ve normalleştirme (NH, NR) ısıtma işlemleri ile oluşturulan değişken sertlik değerlerine göre yan yüz aşınma miktarına bağlı sonuçlar gayet açıktır ki, bantlı yapıya (ferrit + perlit) sahip (S, A, Al, NS, NH ve NR) numunelerin S'de R'ye kadar sertliğindeki artışa rağmen takım aşınmasında

anlamlı bir ilişki yoktur. Numunelerin artan sertlikleriyle birlikte takım aşınma miktarının da artması beklenir. Ancak, en yüksek sertlikteki orijinal hadde durumundaki (R) malzeme için takım aşınma miktarı en az bulunmuştur. Bu olayın, ısıtma işlem görmüş numunelerdeki perlit bantları arasındaki mesafeyle, ferrit tane boyutuyla ve takım aşınmasında etkili olan numunenin hadde eksenine dik doğrultudaki mekanik özellikleriyle ilgili olduğu düşünülür ve bu konuda daha ileri araştırmaların yapılması gerekliliğini vurgulanır [18].

Şekil 31'de görüldüğü gibi bu örnekleri farklı kesici ve işleme işlemleri için çoğaltmak mümkündür. Zira, 5120 çeliği için de yukarıda belirtilen ısıtma işlemleri uygulanmış ve soğuk çekme işlemi ile % deformasyon miktarına bağlı HSS (SKH 9) matkap ucu kullanılarak işlenebilirliği kontrol etmiştir [17]. 5000 mm'lik delme işlemindeki sabit takım ömrü için bağlı kesme hızına ($V_{500\text{mm}}$) bağlı ilişkileri tespit etmiştir. Gayet açıktır ki, minimum kesme hızı en düşük sertliğe sahip küreselleştirilmiş (SA) mikroyapılı malzeme için belirlenmiştir. Sonra sırasıyla tavlama (LA1, A, LA2), normalleştirme (N) ve hadde (R) numunelerde artan sertlikle birlikte en yüksek kesme hızları yani minimum takım aşınması elde edilmiştir. Soğuk deformasyon miktarındaki artışla birlikte özellikle SA numunede kesme hızının azaldığı, yani takım ömrünün kısaldığı belirlenmiştir.

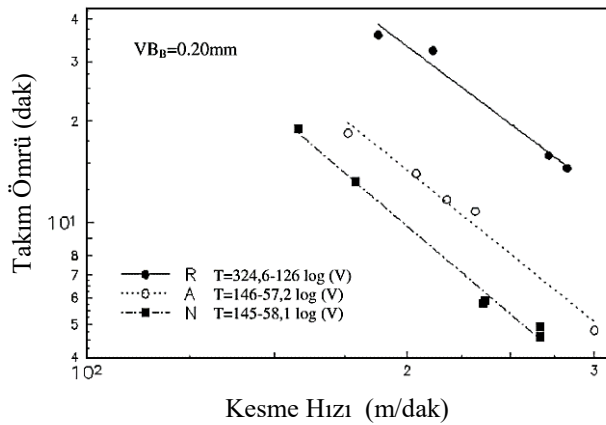


Şekil 31. Kesme hızına bağlı takım ömrüne ısıtma işlemlerinin etkisi [17] (Effect of heat treatment on tool life depend on cutting speed)

Bu çalışma sonuçları göstermektedir ki, düşük alaşımlı çeliğin işlenebilirliği üzerine mikroyapının etkisini ayırt etmek genellikle güçtür. Takım ömrü ve mikroyapılar karşılaştırıldığında, küresel sementit yapının, lamelli sementite göre takım ömrünü arttırdığı görülür. Daha ince sementit aralığı daha az takım ömrü oluşturur [71, 99]. Küresel sementit takım - talaş arayüzünde kesme deformasyonu ile kolaylıkla ferrit matrisi içine gömülebilir. Ancak, ince lamelli veya kaba perlitik yapının takımın sürtünme yüzeyi üzerinde abrasiv etkiyi koruyacağı malumdur. Bununla birlikte adalaşmış (kolonileşmiş) perlitin deformasyon sertleşmesindeki

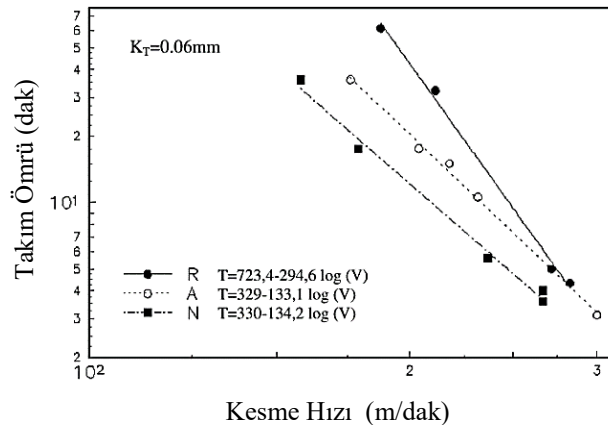
mikroskobik homojensizliği gerilmeyi arttırıcı bölgesel deformasyon sertleşmesine sebep olacak ve kesici takımın yorulma ile aşınma miktarı artacaktır [16, 81, 95].

Sıcak haddelenmiş (R) kısmi perlit+ferrit bantlaşması içeren 1050 çeliğine (204 VSD) uygulanan tam tavlama (A) işlemi ile, kısmi küresel sementitli kaba perlitik yapı ve iri bantlaşmış mikroyapı (171VSD) elde edilmiştir. Devamında uygulanan normalizasyon (N) ısıl işlemleri sonrası (207 VSD) ince perlitik mikroyapılı ve farklı mekanik özelliklerdeki çeliklerin kesme hızı-takım ömrü ilişkileri Şekil 32 ve Şekil 33’de verilmiştir [78].



Şekil 32. Yan yüzey takım ömrüne ısıl işlemlerin etkisi (Effect of heat treatment on flank wear) [78]

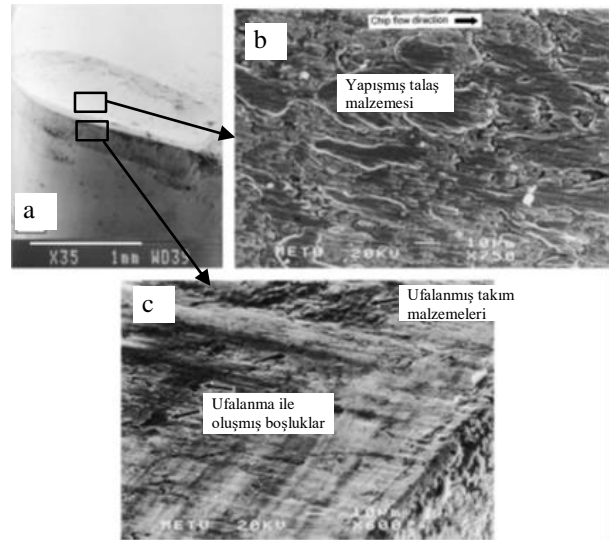
Tavlama işlemi ile düşürülen sertliğe rağmen, tavlı çeliğin işlenmesinde P10 sertmetal kesicinin gerek yan yüzey (Şekil 32) ve gerekse krater (Şekil 33) aşınma ömrünün kısaldığı görülür [78].



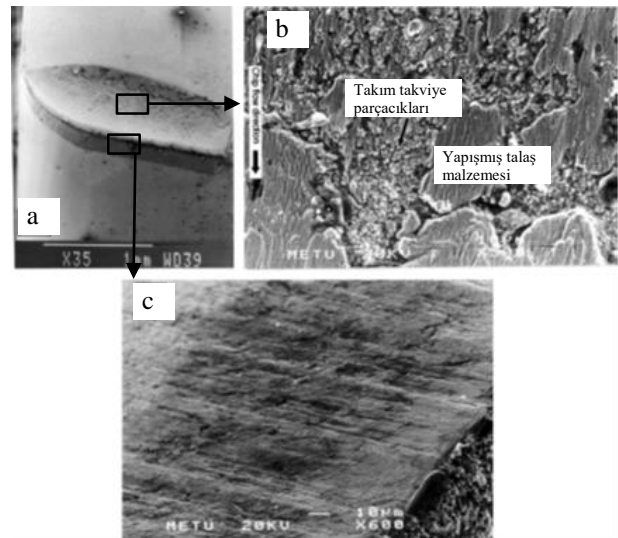
Şekil 33. Krater aşınması takım ömrüne ısıl işlemlerin etkisi (Effect of heat treatment on crater wear) [78]

Şekil 34 ve Şekil 35’de P10 kesicide oluşan aşınma mekanizmaları gösterilmiştir. Bahsedilen önceki örneklerde olduğu gibi bu durum, takım aşınmasında işlenen malzemenin sertliğinden ziyade mikroyapısının etkin olduğunu gösterir. Tavlama ısıl işlemi ile oluşan geniş ferrit+perlit bantlı yapının işlenmesi sürecinde, takımın özellikle yan yüzeyinde yorulma ile aşınma

mekanizmasının da etkinleştiği görülür (Şekil 34c). Bununla birlikte artan sünek faz oranı yapışma aşınmasını da artırır [75, 95]. Hadde malzemede etkin yapışma ve abrasiv aşınma mekanizması takım ömrünü belirlerken, tavlı malzemede yorulma aşınması da etkinleşmiştir. Normalize ile sağlanan ince taneli ve perlitik mikroyapı da ise, yan yüzeyde abrasiv aşınma ve kraterde difüzyon aşınmasının etkin hale geldiği görülmektedir (Şekil 35 b ve Şekil 35c).



Şekil 34. Tavlı (A) çeliğin işlenmesinde P10 kesicide oluşan aşınmalar [78] (Wear on P10 insert at machining of annealed steel)



Şekil 35. Normalize (N) çeliğin işlenmesinde P10 kesicide oluşan aşınmalar [78] (Wear on P10 insert at machining of normalized steel)

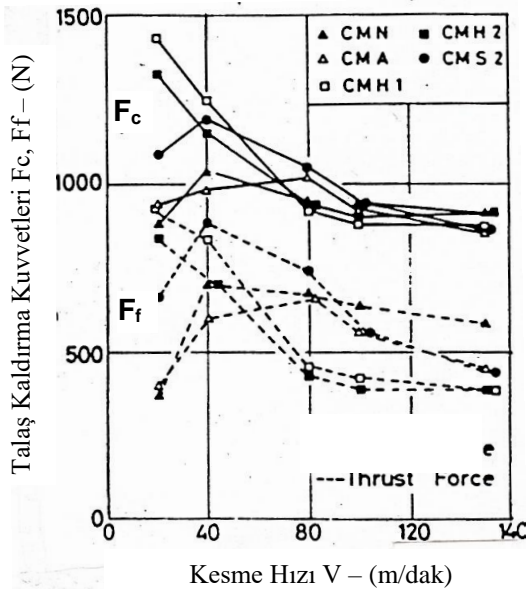
İşlenen malzeme ve kesici takımın tribolojik etkileşimleri takım aşınma mekanizmaları ve dolayısıyla takım ömrü için işlenen malzemenin sertliğinden çok daha önemlidir. İşlenen malzemenin artan sertliği genellikle takımın abrasiv aşınmasını arttırırken, bantlı görünümlü kaba perlitik yapı veya heterojen mikroyapı, sertmetal kesicide

yorulma aşınmasını da etkinleştirebilmektedir. Özellikle Co/Ni bağlayıcı ile üretilen kompozit kesicilerle çeliklerin işlenmesinde ferrit fazının yapışma eğilimi ve kobaltın ferrite difüzyonu ile de özellikle kraterde difüzyon aşınmasını abrasiv aşınmadan daha etkin hale getirebilmektedir [78, 95].

Çeliklerin işlenebilirliğinde önemli bir kriter olan takım ömrü (aşınması) değerlendirmelerinde, işlenen malzemenin sertliğinin yanında mikroyapısının da dikkate alınması gerekir. Kesici takım ve işlenen malzeme ilişkisinin metalürjik etkileşimleri, kimyasal aktivasyonları ve mikroyapının homojenliği/heterojenliği gibi takım ömrünü belirleyen önemli malzeme özellikleri olduğuna dikkat edilmelidir.

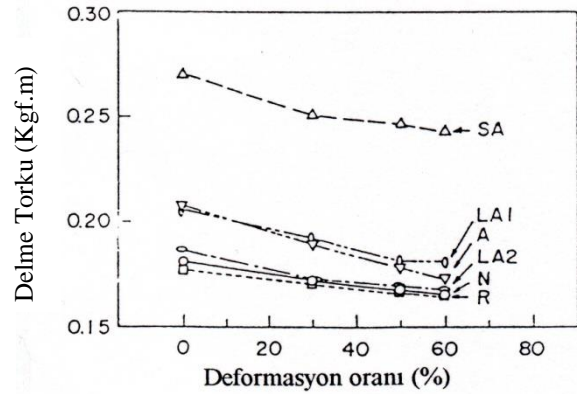
3.2. Kesme Kuvvetleri (Cutting Forces)

Şekil 36'de çeliklere uygulanan ısıl işlemlerle değiştirilen mikroyapı ve mekanik özelliklerin kesme kuvvetine etkileri gösterilmiştir. Gayet açıktır ki, esas kesme kuvveti (F_c) ve ilerleme kuvvetindeki (F_f) 40 m/dak altındaki değişkenlik bu hızlarda oluşan yığıntı talaşla ilişkilidir. Artan kesme hızı ile birlikte farklı mekanik özellik ve mikroyapılarda ki bu malzemelerin özellikle F_c kesme kuvvetinin önemli oranda azaldığı ve 140m/dak kesme hızı civarında, tavlama ve küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmış (CMA ve CMS2) çelikler ile sertleştirilmiş (CMH1 ve CMH2) çeliklerin F_c kuvveti değerlerinin yakın olduğu görülmektedir. İlerleme kuvvetlerinde ise ısıl işlemlerle değiştirilen mekanik özelliklere bağlı manidar bir ilişki olmadığı ve en sert malzemelerin yüksek kesme hızlarında ilerleme kuvvetlerinin diğerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir.



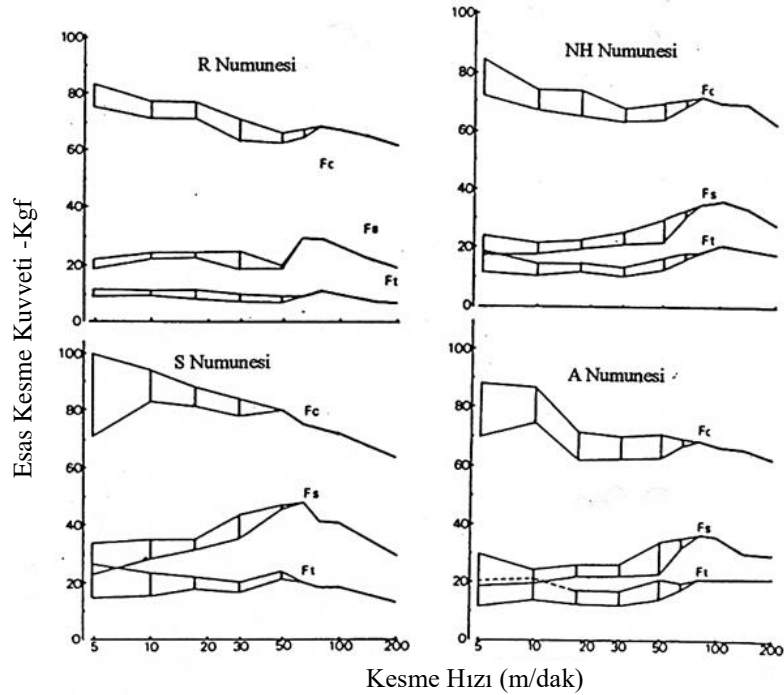
Şekil 36. Mikroyapı ve kesme hızına bağlı oluşan kesme kuvvetleri [16] (Effect of microstructure and cutting speed on cutting forces)

Bu durumda çeliklere uygulanan ısıl işlemlerle düşürülen sertlik ve akma mukavemetine rağmen, düşük kesme hızlarında değil ama, nihai kesme hızlarında mekanik özelliklerdeki farklılığın talaş kaldırma kuvvetlerinde önemli bir değişkenlik oluşturmadığı söylenebilir. Bu durum daha çok kesme parametrelerine ve takım-iş parçası ikilisine bağlı oluşan talaş kaldırma mekanizmasındaki değişkenliklere bağlıdır. Örneğin, Şekil 37'de gösterilen SAE 5120 çelik malzemenin mikroyapılarına ve deformasyon miktarına bağlı kesme torku ilişkilerini belirleyen araştırmacı, %0 deformasyon miktarında en büyük torku küreselleştirme ısıl işlemi uygulanan SA numunesi için tespit etmiştir. Kesme işlemi için gerekli tork, deformasyon miktarındaki artışla birlikte sırasıyla LA1, A, LA2, N ve R numunelerinde artan malzeme sertliğinin tersine giderek azalmıştır [17].



Şekil 37. Isıl işlem ve soğuk deformasyon miktarının delme torkuna etkisi [17] (Effect of heat treatments and cold forging on drilling torque)

Benzer çelik malzeme ile yapılan diğer bir işlenebilirlik çalışmasında (Şekil 38) [19], tavlama (A), normalleştirme (NH) ve küreselleştirme (S) ısıl işlemi uyguladıkları numunelerden A numunesinde aşırı bantlaşma mevcuttur. Hadde malzeme (R), daha yumuşak S, A ve NH ısıl işlemlerle karşılaştırıldığında, yüksek kesme hızlarındaki kesme kuvvetlerinde belirgin farklılığın oluşmadığı görülür. Düşük kesme hızlarında özellikle aşırı yumuşak malzemelerin (A ve S) talaş kaldırma kuvvetlerindeki aşırı sapma aralığı, daha çok karasız yığıntı talaş oluşumuna bağlanır. Ancak artan kesme hızına rağmen A numunesinde sapma aralığının fazla oluşu, bu malzemenin aşırı bantlı mikro yapısıyla ilgilidir. NH ve A numuneleri karşılaştırıldığında bantlı yapılı malzemelerin ilenmesinde oluşan kuvvetlerdeki geniş sapma aralığı açık bir şekilde belirlenmiştir. Talaşın kesme bölgesinde mikroyapının deformasyon davranışı incelendiğinde perlit+ferrit'e göre, beyrit+ferrit fazı daha dar bir bölge içinde aşırı sertleşir. Bu etki, yığıntı talaş ucundaki kayma bölgesi içinde daha yüksek sıcaklık artışı ile sonuçlanır ve sürtünme kuvvetinin özellikle ilerleme bileşeninin azalmasına sebep olur. Şekil 38'den, izah edilen bu durumun, düşük kesme hızları aralığında daha sert perlitik yapılı veya beyritik yapılı numunelerin işlenmesi sırasında meydana geldiği görülür.



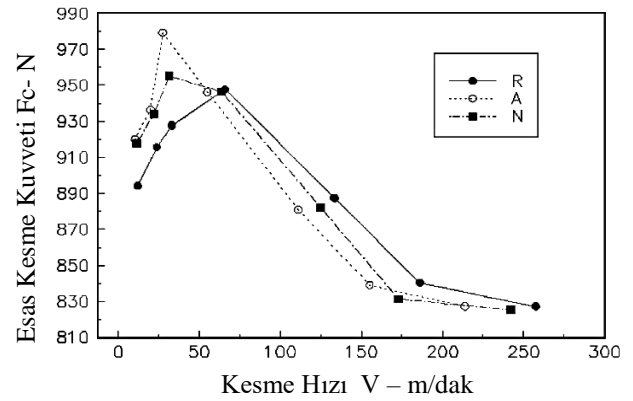
Fc : Kesme Kuvveti, Fs : İlerleme Kuvveti, Ft : Radyal Kuvvet, NH: F+ Perlit, R: F + Beynit, S: Küresel Fe₃C, A: Aşırı bantlı yapı

Şekil 38. Çeliklerin ısıtılma durumlarına bağlı kesme kuvvetleri (Cutting forces due to heat treatment of steels) [19].

Düşük karbonlu alaşımli çeliklerin işlenebilirliğinin mikroyapıya bağlılığı oldukça karmaşıktır. Bantlaşmış ferrit ve perlitten beynite doğru özelliklerde değişkenlik mevcuttur. Ferrit + beynitik mikroyapıya sahip R numunesi diğer yumuşak numunelerle karşılaştırıldığından, dubleks yapının deformasyon sertleşmesine bağlı kırılabilirliği sebebi ile, kolay talaş kırılabilirliği gösterir. Bununla birlikte hadde durumundaki R numunesi, kesme kuvvetleri bakımından kıyaslandığında daha iyi işlenebilirlik gösterme eğilimindedir.

Şekil 39’da ise, aynı ısıtılma işlemlerinin uygulandığı haddelenmiş SAE 1050 çeliğinin tornalanması sürecinde kesme hızına bağlı kesme kuvvetlerindeki değişim görülmektedir. Düşük kesme hızındaki düşük kesme kuvvetinin oluşumu tamamen kararlı YT’nin varlığı ve geometrisiyle ilgilidir. Düşük kesme hızlarında YT boyutundaki artış, kesici takımın etkin talaş açısını artırır. Kesici takım gibi davranan YT’nin geometrisinin talaş açısını artırma etkisi ise kesme kuvvetlerinde azalmaya sebep olur. Artan kesme hızıyla YT boyutundaki azalma, kesme kuvvetinde de artışa sebep olur. Özellikle R ve N mikroyapısına sahip malzemelerde yaklaşık 80 m/dak kesme hızına kadar azalan kararlı YT boyutu, kesme kuvvetinde de artışa sebep olmuştur. Bu kesme hızından sonra artan kesme hızıyla oluşan etkiler, YT’nin giderilmesi ve takımın kesici kenarının kesmeye başlamasıyla açıklanır. Sonrasında artırılan kesme hızıyla birlikte artan talaş kaldırma sıcaklıkları ve takım-talaş sürtünme etkileşimleri sebebiyle oluşan kesme

mekanizmadaki değişimler (deforme olmuş talaş kalınlığı, kesme düzlemi açısı, takım-talaş temas uzunluğu vb.) kesme kuvvetinin de azalmasına sebep olmaktadır [26, 30, 72, 73, 78, 100,101].

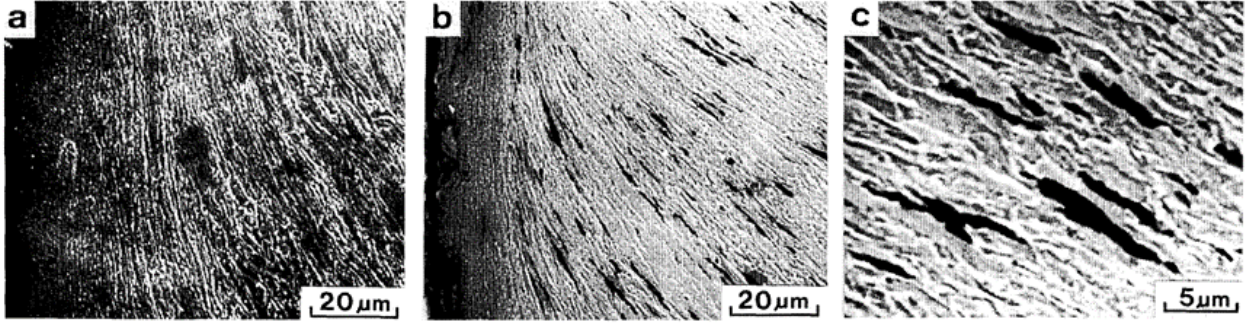


Şekil 39. Farklı mikroyapılı çeliklerde kesme hızı ve esas kesme kuvveti ilişkisi [81] (Cutting speed and principal cutting force relationship in steels with different microstructures)

Ferrit matris içinde ince dağılmış martenzit ve ince dağılmış grafit nodülleri içeren üç fazlı çeliğin işlenebilirliği çift fazlı çeliklerle kıyaslandığında; mikroyapıdaki nodüler grafitin etkisiyle kesme gerilmesi ve sürtünme açısının azaldığı ve bununla birlikte kesme düzlemi açısının artmasıyla kesme kuvvetlerinin azaldığı belirlenmiştir. Üç fazlı çeliklerdeki nodüler grafitin

kesici kenara yakın bölgede mikro çatlak oluşumunu teşvik etmesi sebebiyle (Şekil 40) azalan kesme

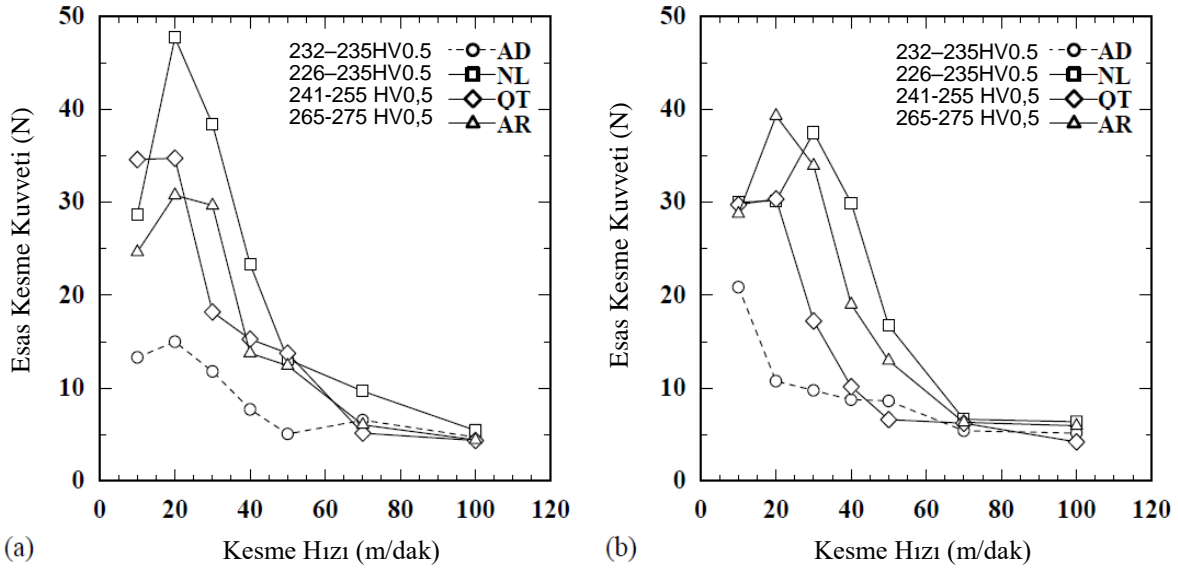
kuvvetlerine rağmen, yüzey pürüzlülüğü çift fazlı çeliklere göre kısmen daha kötüdür [102].



Şekil 40. Aynı kesme şartlarındaki talaş kesitinin SEM görüntüsü a) Çift fazlı çelik b ve c) Üç fazlı çelik [102] (SEM images of the chip section under the same cutting conditions, a-Double-phase steel, b and c- Three-phase steel)

Sıcak haddelenmiş (AR) SAE 4140 çeliğin sertliği 265-275 HV0.5 dir. Yağda su verilip temperlenen (QT), tavlانیp soğuk çekilen (AD) ve normalize edilen (NL) numunelerin sertlikleri yaklaşık birbirine yakın değerdedir. Yalnızca, karşılaştırma yapılacak sıcak hadde çeliğin sertliği bir miktar yüksektir. Farklı

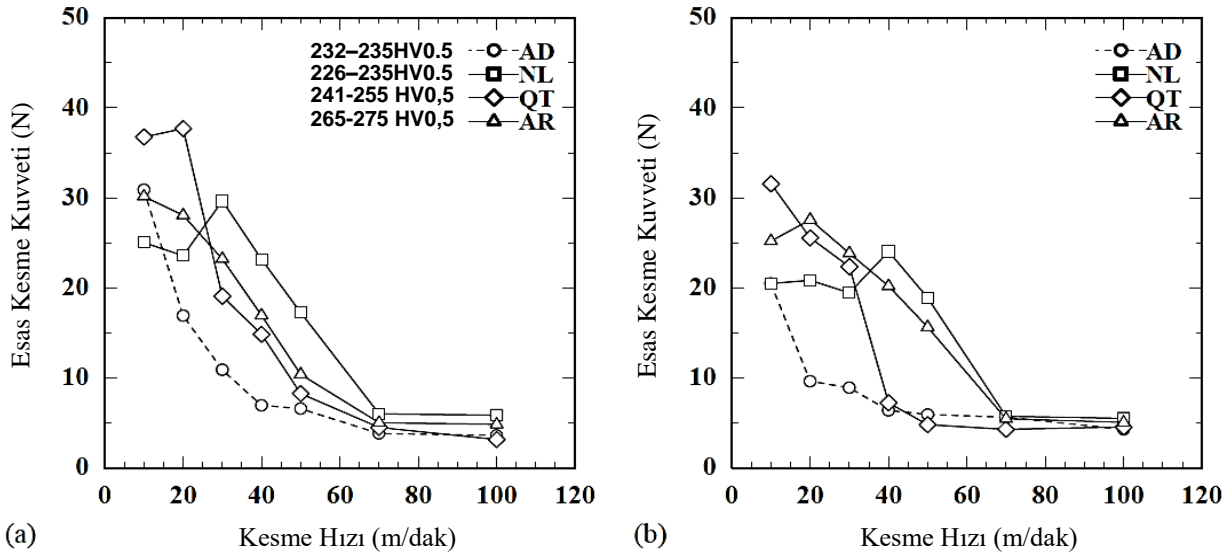
mikroyapılarda fakat benzer sertliklerdeki bu malzemelerin sertmetal (P20) ve sermet kesicilerle kuru ve ıslak tornalanması sırasında oluşan esas kesme kuvvetlerinin kesme hızına bağlı değişimi Şekil 41 ve Şekil 42’de verilmiştir [103].



Şekil 41. Kuru işlemede kesme hızının esas kesme kuvvetine etkisi a) Sermet kesici b) Sertmetal (P20) kesici [103] (Effect of cutting speed on principal cutting force in dry machining, a-Cermet tool b-Hardmetal tool, P20)

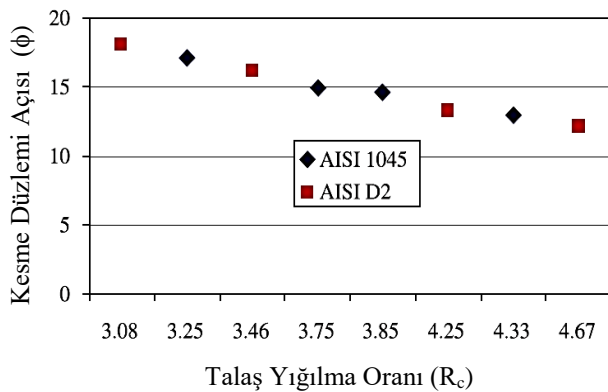
Farklı ısı veya mekanik işlemlerle oluşturulan mikroyapılara bağlı sağlanan sertlik değerlerinin özellikle 70 m/dak altındaki kesme hızında, belirgin değişikliklere sebep olduğu görülmektedir. Bu kesme hızından daha yüksek hızlarda oluşan esas kesme kuvvetlerinde, gerek malzemenin mikroyapısı ve sertliğinden kaynaklanan ve gerekse kesici takım farkı veya kuru/ıslak kesme şartlarından kaynaklanan farklılıkların kesme kuvvetine etkisi ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu durum, alaşım malzemelerde yüksek kesme hızlarında oluşan kesme kuvvetlerinin mikroyapıdan ve mekanik özelliklerden bağımsız

olabileceğini göstermektedir. Benzer sonuçlar diğer bazı araştırmacılar tarafından da açıklanmıştır [16, 19, 72, 73]. Bu durumun, çeliğin ısı ile işlemlerle değiştirilen mikroyapı ve mekanik özelliklerine rağmen, talaş kaldırma sırasında takım-talaş arayüzünde meydana gelen sürtünme etkilerindeki farklılıklardan kaynaklanan; takım-talaş temas uzunluğu, talaş yığılma faktörü, kesme düzlemi açısı vb. gibi kesme mekaniğini değiştiren etkilerdeki değişkenlerden kaynaklandığı bilinmektedir.



Şekil 42. Islak işlemede kesme hızının esas kesme kuvvetine etkisi a)Sermet kesici, b) Sertmetal (P20) kesici [103] (Effect of cutting speed on principal cutting force in wet machining, a-Cermet tool b-Hardmetal tool, P20)

Zira, talaş yığılma oranı (R_c =Deforme edilmiş talaş kalınlığının, deforme edilmemiş talaş kalınlığına oranı) ile kesme düzlemi arasındaki ilişkide, yığılma oranını artıran takım-talaş arayüzündeki sürtünme etkileri kesme düzlemi açısını düşürür [104]. Şekil 43’de gösterilen bu etkileşim, farklı mekanik özelliklerdeki iki malzeme için yaklaşık benzer sonuçları verir. Ancak artan ilerleme değeriyle (deforme olmamış talaş kalınlığı) birlikte özellikle daha yumuşak ve sünek malzemede artan yığılma oranı, kesme düzlemi açısını belirgin miktarda düşürür. Azalan kesme düzlemi açısıyla birlikte artan kesme alanı ise kesme kuvvetlerini arttıran bir faktördür.

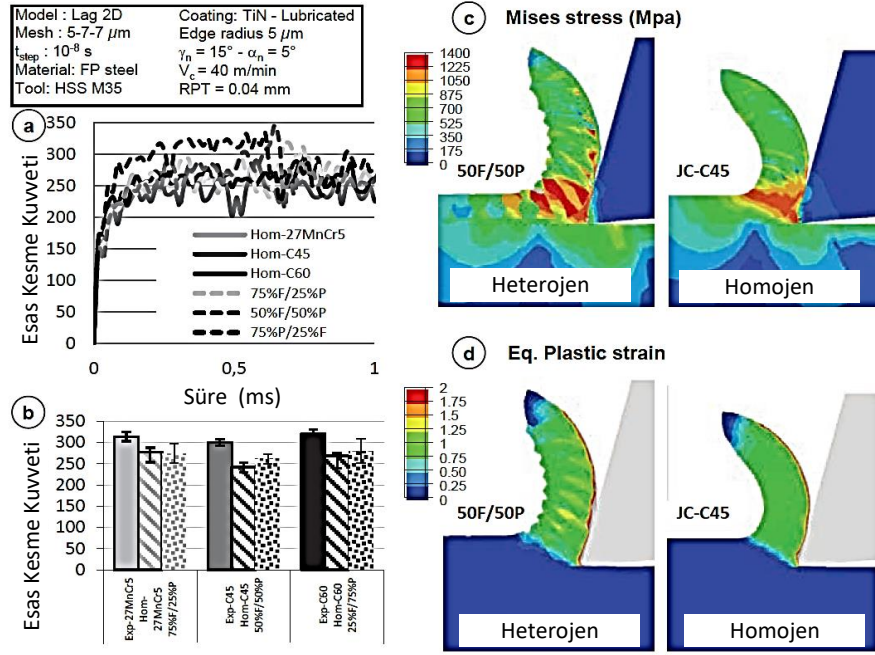


Şekil 43. Talaş yığılma oranına bağlı kesme düzlemi açısındaki değişim [104]. (Experimental shear plane angle versus chip compression ratio)

Kısaca, işlenen malzemenin mekanik özelliklerindeki değişikliklerden kaynaklanan özgül kesme kuvvetindeki (gerilmesindeki) değişkenlik, kesme mekaniğini değiştiren etkiler sebebiyle dengelenmektedir. Bu sayede farklı sertlik ve mikroyapılara rağmen orta kesme hızlarının üzerinde

işlenen çelik malzemelerin esas kesme kuvvetleri benzerlik göstermektedir. Yaklaşık 40 m/dak kesme hızına kadar var olan kesme kuvvetindeki sapmalar ise, her bir çeliğin farklı mikroyapılarından kaynaklanmaktadır. Bu çeliklerin işlenmesi sürecinde yığıntı talaş oluşma eğilimi ve kesme hızına bağlı yığıntı talaş morfolojisindeki değişkenlikler kesme kuvvetlerinde de önemli değişkenlikler meydana getirir [12]. Bu kesme hızına kadar (60 m/dak) her bir mikroyapıdaki malzemenin (Örn. Şekil 41’de NL ve AR numunelerinde ve Şekil 42’de AR ve NL) işlenmesinde kesme kuvvetindeki belirgin sapmalar, tamamen büyük boyutlu YT oluşumunun etkisine bağlıdır. Aynı zamanda, kesici takım malzemesi türüne göre de değişkenlik gösteren YT boyutlarına bağlı olarak, kesme kuvvetlerinde kararlılığın sağlandığı kesme hızları değişkenlik gösterir. Şekil 41 ve 42’de verilen AD numunesinde bu etkilerin görülmemesi, daha küçük boyutlu oluşan YT etkisiyle ilgilidir.

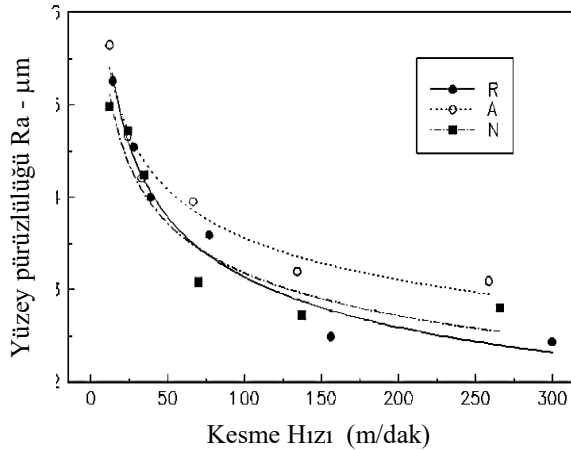
Şekil 44’de ferritik-perlitik çeliklerin işlenmesiyle ilgili yapılan bir modelleme çalışması [80, 81] verilmiştir. Burada, mikroyapı heterojenliği, faz dağılımı, ferrit-perlit oranı ve tane boyutu gibi malzeme özelliklerinin; kesme kuvveti ve talaş oluşumu karşılaştırması ile simüle edildiği görülür. Buna göre tane boyutu ve faz dağılımı, farklı fazların başarıyla kesilmesi için önemli rol oynar ve esas kesme kuvvetinin değişkenliğine sebep olur. Perlit tanelerinin bulunduğu bölgede takım üzerine etkiyen kuvvetler yüksekken, devamındaki yumuşak fazların kesme deformasyonu sürecinde kuvvetler düşer. Mikroyapısal bu değişimler, raybalama ile talaş kaldırma sürecinde homojen ve heterojen mikroyapılı malzemelerin talaş formlarını da önemli derecede etkiler.



Şekil 44. Homojen ve heterojen mikroyapılı malzemelerin işleme sürecinin kıyaslanması a-b) Esas kesme kuvveti değişimi c) Mises gerilmesi –MPa d) Eşdeğer plastik gerinim [80]

3.3. Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

Farklı ısıl işlemlerle malzemelerin kesme hızlarına bağlı değişen yüzey kalitesi incelendiğinde, özellikle düşük kesme hızlarında oluşan talaş morfolojisinin yüzey pürüzlülüğüne de yansıdığı belirlenmiştir [72, 73, 78]. Şekil 45’de haddelenmiş (R) SAE1050 çeliği için gösterilen kesme hızı-yüzey pürüzlülüğü ilişkisinden, tavlı numunede (A) düşük kesme hızında oluşan YT’nin yüzey pürüzlülüğünü artırdığı görülmektedir.

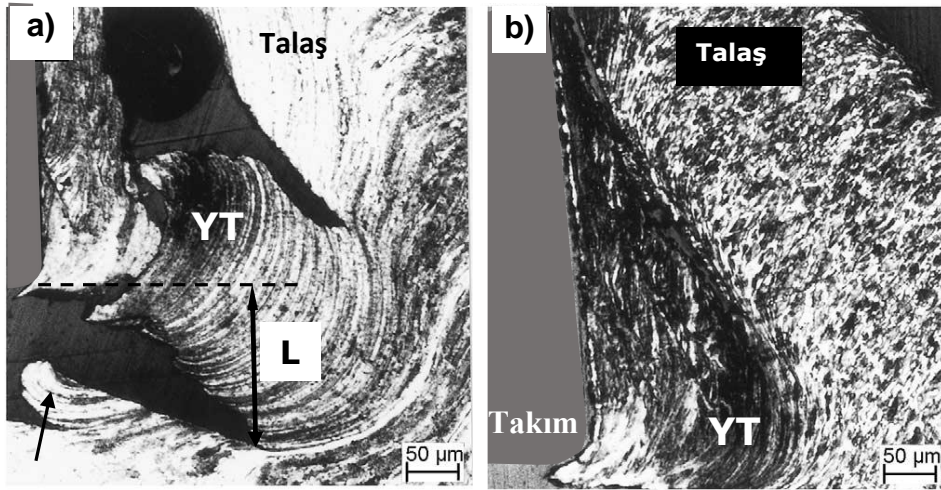


Şekil 45. Farklı mikroyapılı çelik malzemede kesme hızı yüzey pürüzlülüğü ilişkisi [72,78] (The relationship between surface roughness and cutting speed in different microstructured steel materials)

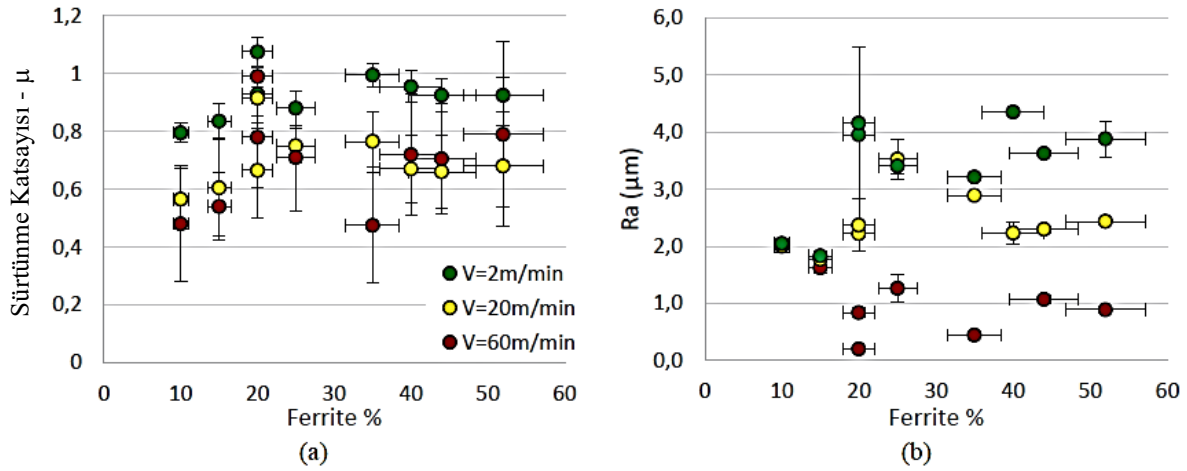
Arttırılan kesme hızıyla birlikte yaklaşık 80 m/dak kesme hızına kadar yüzey pürüzlülüğünde önemli miktarda

azalma belirlenmiştir. Bu durum, artan kesme hızıyla azalan YT boyutlarıyla ilgilidir. Çeliklerde yaklaşık 80 m/dak’ dan yüksek kesme hızlarında YT oluşmaz. Nihai kesme hızında dahi tavlı malzeme yüzey kalitesinin kötü olduğu görülmektedir. Bu durum ise YT varlığından daha çok kesici kenar altındaki 3. deformasyon bölgesinde meydana gelen plastik deformasyon etkisine bağlanabilir [78].

Şekil 46’da sıcak haddelenmiş (R) SAE1050 çeliğine tam tavlama (A:Kaba perlit) ve normalizasyon (N:Daha ince perlit ve tane boyutu) ısıl işlemleri sonrasında oluşan mikroyapıların talaş oluşum morfolojisine etkisi gösterilmiştir. Aynı kimyasal kompozisyonda fakat farklı mikroyapılara sahip malzemelerin yaklaşık aynı kesme hızında ($V=13$ m/dak) tormalanması sırasında oluşan talaş köklerinin belirgin farklılık içerdiği görülmektedir. Özellikle tavlama ısıl işlemi ile kaba perlitik yapı ve minimum sertlik sağlanan malzemenin işlenmesi sırasında maksimum boyutta yığıntı talaş çıkıntı uzunluğu (L) ve yüksekliği meydana gelmiştir (Şekil 46a). Ayrıca YT çıkıntı uzunluğundaki aşırı büyümeden kaynaklanan ve yüzey pürüzlülüğünü artıran kopmuş ve işlenmiş yüzeyde kalmış YT parçacığı okla gösterilmiştir. Normalize edilmiş malzemenin işlenmesi sürecinde ise daha küçük ve kararlı YT oluşmuştur ve tavrın kesici kenar altına uzanan YT çıkıntı uzunluğu minimum boyuttadır (Şekil 46b). İşlenen malzemenin yumuşak veya sert faz oranlarına bağlı oluşan YT boyutları ve geometrisi, düşük kesme hızlarındaki yüzey kalitesini önemli oranda etkiler. Sert fazın hakim olduğu ısıl işlemlerle mikroyapılarda oluşan YT boyutları azalacağından işlenmiş yüzey kalitesi artar [72, 73, 78].



Şekil 46. Farklı ısıl işlemler uygulanmış SAE 1050 çeliğinde talaş oluşumu a)Tavlanmış b) Normalize edilmiş [72, 73, 78] (Chip formation in SAE 1050 steel with different heat treatments a- Annealed, b- Normalized)

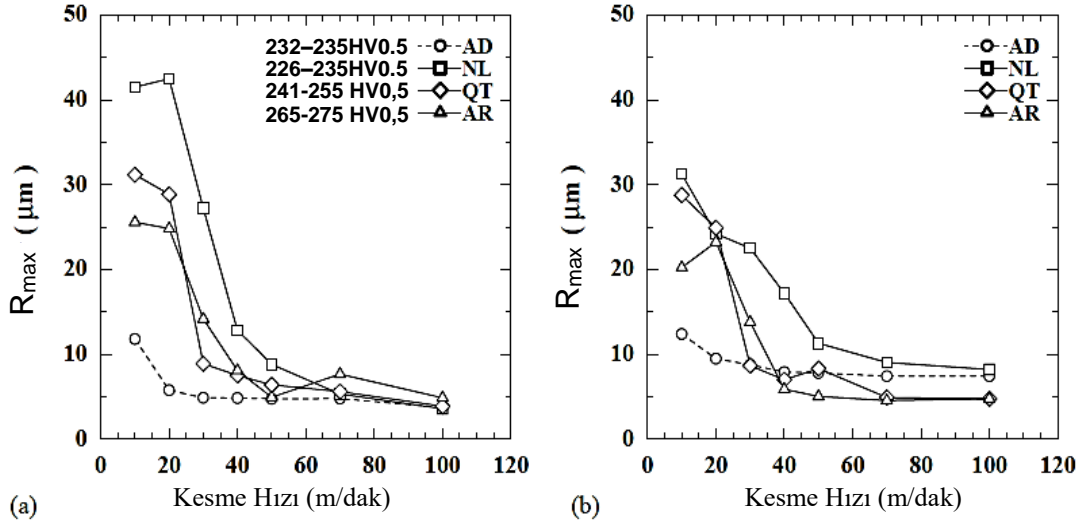


Şekil 47. Ferrit miktarının a) makroskobik sürtünme katsayısı ve b) yüzey pürüzlülüğüne etkisi [105] (Effect of ferrite content on a)macroscopic friction coefficient and b)surface roughness

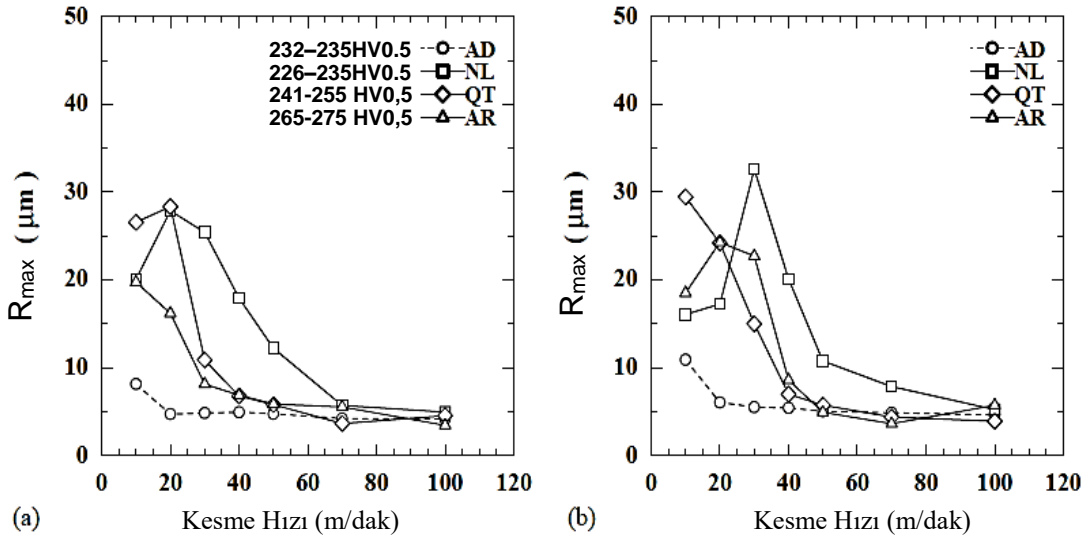
Ferritik ve perlitik çeliklerin mikroyapısının HSS M35 takım ile kuru işleme sırasında oluşan sürtünme katsayısı ve yüzey kalitesine etkisi Şekil 47’de verilmiştir. Şekil 47a’ da verilen grafiklerde artan ferrit/perlit oranı ile birlikte sürtünme katsayısının da arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, artırılan kesme hızıyla birlikte artan malzeme-takım kayma hızının sürtünme katsayısını düşürdüğü görülmektedir. Bu ilişki ile bağlantılı olarak, artan ferrit/perlit oranı ile birlikte pürüzlülük de artmakta ve artan kesme hızı ile de pürüzlülük azalmaktadır (Şekil 47b). Takım ve işlenen malzeme arasındaki tribolojik ilişki ile açıklanan bu durum, yüksek ferrit oranında ve düşük kesme hızında takıma daha çok yapışma eğilimindeki yığıntı talaşın varlığı ile açıklanmaktadır. Ayrıca tane boyutu, perlit morfolojisi ve faz dağılımı gibi sertliği etkileyen faktörlerin de tribolojik faktörleri etkilediği bilinmektedir [105].

Şekil 48 ve 49’da görüldüğü gibi, yığıntı talaşın etkisi işlenen malzemelerin yüzey kalitesinde de belirgindir ve

kesme kuvvetlerinde meydana gelen değişkenlik benzer şekilde yüzey pürüzlülüğünde de mevcuttur. Düşük kesme hızlarında dahi en küçük YT boyutuna sahip AD numunesinde en düşük yüzey pürüzlülüğü oluşmuştur. Yaklaşık 70 m/dak kesme hızına kadar artan hızla azalan pürüzlülük, mikroyapı veya mekanik özellikten bağımsız olarak bütün numuneler için benzer minimum değere ulaşmıştır. Bu kesme hızı çelikler için kritiktir ve deney sonuçlarından da görüldüğü gibi 70-80 m/dak kesme hızından sonra YT oluşmaz ve kesici takımın kendisi kesmeye başladığından kesici uç yarıçapına ve ilerlemeye bağlı oluşan ideal yüzey pürüzlülüğüne yaklaşırlar [36, 103, 106-109]. Soğutma sıvısının kullanımı veya kesici takım malzemesindeki farklılığın özellikle düşük kesme hızlarında YT oluşumuna bağlı olarak yüzey kalitesini etkilediği bilinir. Ancak, artan kesme hızıyla birlikte gerek takım malzemesi ve kuru/ıslak kesme şartları ve gerekse malzeme mikroyapılarındaki değişkenlik, yüzey kalitesini kısmen de olsa etkileyebilir (Şekil 48 ve Şekil 49).



Şekil 48. Kuru işleme sırasında yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı ile değişimi a) Sermet kesici b) Sertmetal (P20) kesici [103] (Surface roughness vs. cutting speed in dry machining: a-cermet tool, b- P20 tool)



Şekil 49. Islak işleme sırasında yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı ile değişimi a) Sermet kesici b) Sertmetal (P20) kesici [103] (Surface roughness vs. cutting speed in wet machining: a-cermet tool, b- P20 tool)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

- Bir malzemenin talaşlı işlenebilirlik özelliği, o malzemeye ait bir özelliktir. Talaşlı imalat sürecindeki kesme parametrelerinde veya takım malzemesinde yapılan değişiklik, o malzemenin işlenebilirliğini değiştirmez. Ancak işlenebilirlik özelliğine uygun, talaşlı imalat sürecindeki değişkenlerin optimizasyonunu sağlar. Malzemenin işlenebilirliği ancak kimyasal kompozisyonu, mikroyapısı ve mekanik özellikleriyle değiştirilip, geliştirilebilir.
- Saf demire katılan alaşım elementleri ile azalan süneklığe ve artan akma mukavemetine rağmen kesme kuvvetlerinde azalma meydana gelir. Ayrıca otomat çeliklerinin mikro yapısında bulunan MnS ve Pb gibi

yumuşak ikincil fazlar da (inklüzyonlar) kesme kuvvetlerinde azalma ve talaş kaldırmada kolaylık sağlar. Bu olay, farklı süneklığe sahip fazları ihtiva eden mikroyapı sebebi ile birincil deformasyon bölgesinde fazların arayüzeyinde kolayca mikro çatlak oluşumu ile açıklanır.

- Çelikteki alaşım elementleri (özellikle karbon) süneklikteki azalmayla birlikte takım-talaş temas uzunluğunun da kısalmasına sebep olur. Azalan temas uzunluğu kesme kuvvetinin de azalmasını sağlar. Ancak artan karbon miktarı, çelikte sert ikincil fazın da artışına sebep olur. Bu nedenle, takımda özellikle abrasiv aşınma artar ve takım ömrü kısalmır.

- Otomat çeliklerinde bulunan yumuşak ikincil fazlar (inklüzyonlar), birincil deformasyon bölgesinde mikro çatlak oluşumunu kolaylaştırarak talaş kırılabilirliğini artırır, takım yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturarak sürtünme kuvvetlerini düşürür ve takım aşınmasını azaltır. Bu durum, inklüzyonların oranları ve morfolojileriyle de yakından ilgilidir.
- Çeliklerde yüzey kalitesini etkileyen esas faktör yığıntı talaş (YT/BUE) oluşumu ve oluşan YT'nin çıkıntı uzunluğudur. Takım malzemesi ve işlenen malzeme etkileşimine bağlı da oluşan YT, özellikle düşük kesme hızlarında ve farklı süneklilikteki fazlara sahip mikroyapılarda oluşur. Zira, aşırı süneklığe ve yumuşak tek faza sahip saf metallere talaş kaldırılması sırasında yığıntı talaş oluşumu ve yüzey kalitesinde kötüleşme görülmeyebilir.
- Yığıntı talaş oluşumundaki genel bakış açısı, malzemenin sünekliliğindeki artışla birlikte YT oluşma eğilimi ve yüzey pürüzlülüğünde de artışın olacağı yönündedir. Ancak araştırmalar göstermiştir ki, talaş kaldırma sürecinde birincil ve üçüncül deformasyon bölgelerinde mikro çatlak oluşturmayacak kadar aşırı süneklığe sahip malzemelerin işlenmesinde yığıntı talaş oluşmaz. Bu sebeple, işlenen yüzey kalitesinin de iyi olduğu belirtilir.
- Çeliklerin sertliğini düşürmek ve işlenebilirliği geliştirmek amaçlı yapılan ısı işlemler fazların homojen dağılımını sağlanamıyor, aksine bantlaşma oranını artırıyorsa ve/veya heterojen dağılımlı mikroyapı oluşturuyorsa, işlenebilirlikde kötüleşme görülebilir. Bu durumda işlenen malzemenin azalan sertliğine rağmen, yüzey kalitesinde ve takım ömründe kötüleşme görülebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dieter G. E., “*Mechanical Metallurgy*”, SI Metric Edition, McGraw-Hill, London, UK, (1988).
- [2] Jablonowski J., Eigel-Miller N., “*World Machine-Tool Output and Consumption Survey*”, Gardner Business Media Inc., Cincinnati, OH, USA, (2013)
- [3] Kline S., “*Tooling Equipment Report*”, Gardner Business Media Inc., Cincinnati, OH, USA, (2012).
- [4] Stahl J. E., “*Metal Cutting - Theories and models*”, Lund University in cooperation with Seco Tools AB, Lund/Fagersta, Sweden, (2012).
- [5] Schultheiss, F., “*On the Machinability of Ductile and Strain Hardening Materials*”, Media-Tryck, Lund University, Lund, Sweden (2013).
- [6] Özçatalbaş, Y., Ercan, F., “Talaşlı İmalatta İşlenebilirlik ve İşlenebilirliğin Ölçülmesi”, *Standard Dergisi*, Mayıs, (1996).
- [7] Smith, T. G., “*Advanced Machining The Handbook of Cutting Technology*”, IFS Publications Ltd. UK., (1989).
- [8] Mills, B., Redford, A. H., “*Machinability of Engineering Materials*”, Applied Science Publications Ltd. UK., (1989).
- [9] Shaw, M.C., “*Metal Cutting Principles*”, Oxford University, New York, (1991).
- [10] Genculu S., “*Factors Affecting Machinability of Metals*”, <http://www.cabinc.com/pdf/MachinabilityFactors-wp.pdf>, (2018).
- [11] Özçatalbaş Y., “The machinabilities of 1050, 4140 and 8620 steels related to changing microstructures and mechanical properties before and after the heat treatment”, *Ph.D. Thesis, G.Ü. Institute of Science and Technology*, Ankara, (1996).
- [12] Özçatalbaş Y., “The Effects of Chemical Composition and Microstructure on Machinability of Steels”, *8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17)*, 1437-1444, Elazığ, Turkey, (2017).
- [13] Çelik A., “*Kurşunlu Otomat Çelikleri*”, Asil Çelik Teknik Yayın 3, (1990).
- [14] Ramalingam, B., Thomann, K., “The Role of Sulphide Type and of Refractory Inclusions in The Machinability of Free Cutting Steel”, *Influence of Metallurgy on Machinability, Prod. Int. Conf.*, ASM, (1975).
- [15] Vasillko, K., Novak, S., “Results of Research in to the Effect Isothermal Annealing on the Machinability of Steels”, *Hutn. Listy*. 35: 14, (1980).
- [16] Araki, T., Fukunaga, H., Sata, T., “Some Results of Cooperative Research on te Effect of Heat Treated Structure on the Machinability of a Low Alloy Steel”, *Influence of Metallurgy on Machinability of Materials, (Prod. Conf.)*, 381, ASM, (1975).
- [17] Abeyama, S., Kimura, S., “The Influence of Heat Treatment and Cold Forging on Machinability of Low Alloyed Steels”, *The Machinability of Engineering Materials, (Prod. Conf.)*, ASM, (1983).
- [18] Okusa, K., Kitagawa, R., “Method of Testing Steel Machinability by Milling End of Cylindrical Workpiece”, *Conference on Machinability Testing and Utilization of Machining Data (Prod. Conf.)*, ASM International Materials and Metal Working Sersies, Oak, Brook, IL, (1979).
- [19] Araki, T., Yamamoto, S., “An Evaluation of Machinability of Low Alloy Steel Materials with or Without Heat Treatment”, *Machinability Testing and Utilization of Machining Data (Prod. Conf.)*, ASM, (1979).
- [20] Ozcatalbas, Y., “Machinability of Elongated Coarse Grain Fe-Based Superalloys”, *Machining Science and Technology*, 18(4): 626-637, (2014).
- [21] Capdevilla C., Miller U., Jelenak H., Bhadeshia H.K.D.H., “Strain Heterogeneity and the Production of Coarse Grains in Mechanically Alloyed Iron-Based PM2000 Alloy”. *Materials Science and Engineering, A*, 316: 161–165, (2001b)
- [22] Kim, H. Y., Kwon, O. Y., Jang, J., Hong, S.H., “Modification of Anisotropic Mechanical Properties in Recrystallized Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Alloy”, *Scripta Materialia*, 54: 1703–1707, (2006).
- [23] Williams, J. A., Horne, J.G., “Crystallographic Effects in Metal Cutting”, *Journal of Materials Science*, 17: 2618–2624, (1982).
- [24] Lane, J. D., Stam, J. W., “General Inroductor Review of the Relationship Between Metallurgy and Machinability”, *Iron and Steel Inst. (Prod. Confer.) Machinability*, 65-70, (1967).

- [25] Trent, E. M., *Metal Cutting*, Tanner Ltd., London, 2000.
- [26] Sadık, M. I., Lindström, B., “The Role of Tool-Chip Contact Length in Metal Cutting”, *Journal of Materials Processing Technology*, 37: 613-627, (1993).
- [27] Babu, S. S., Chakraborty, A. K., Chattopadhyay, A. B., “Microscopic Study on Chips Formed by Sharp and Beveled Turning Carbide Inserts”, *Journal of Mater. Proces. Tech.*, 37: 781-789, (1993).
- [28] Das A., Mukhopadhyay A., S. Patel K., Biswal, B. B. “Comparative Assessment on Machinability Aspects of AISI 4340 Alloy Steel Using Uncoated Carbide and Coated Cermet Inserts During Hard Turning”, *Arab J Sci Eng*, 41: 4531-4552, (2016).
- [29] Katayama, S., Hashimura, M., “Effect of Carbon, Phosphorus and Nitrogen Contents in Steel on Machined Surface and Cutting Force”, *ISU International*, 30(6): 457-463, (1990).
- [30] Özçatalbaş Y., “Düşük Alaşımli Çelikte Yığıntı Talaş Oluşumunun İşleme Özelliklerine Etkisi”, *8.Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi*, 25-34, Ankara, (1998).
- [31] Özçatalbaş, Y., “Çelikteki Karbon, Fosfor ve Azot Miktarının İşlenen Yüzey ve Kesme Kuvvetleri Üzerine Etkisi”, *G.Ü.T.E.F. Dergisi*, 5(1-2): 71-82, (1996).
- [32] Williams J. E., Smart E. F., Milner D. R., “The Metallurgy of Machining- Part 2”, *Metallurgia*, February, 51-60, (1970).
- [33] Aouici H., Bouchelaghem H., Yaltese M.A., Elbah M., Fnides B., “Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 73: 1775-1788, (2014).
- [34] Trent E. M., “The Assessment of Machinability”, *Iron and Steel Inst., Machinability*, 1-9, 1967
- [35] Nagamachi, M., “Effect of MnS on Machinability”, *Transaction ISU*, 25: (1985).
- [36] Yamaguchi, K., “Friction Reducing Actions of Inclusions in Metal Cutting”, *Journal of Engineering for Industry*, 102, August (1980).
- [37] Robat, D., Bellot, J., “Steel With Improved Machinability Under Varried Conditions”, ASM, *International Conference on High Productivity Machining, Materials and Processing (Proc. Conf.)*, New Orleans, Louisiana, 7-9 May, (1985).
- [38] Özçatalbaş, Y., “Alaşım Elementlerinin Çeliğin İşlenebilirliğine Etkisi”, *Makine Tek*, 40: (1998).
- [39] Koji W., Tatsuya I., Toshiharu A., “Development of Lead-free Free-cutting Steel and Cutting Technology”, *Nippon Steel & Sumitomo Metal Tech. Rep. No. 116*, September, (2017).
- [40] Pavel K., Borislav S., Lepa S., Ondrej L., Ildiko M., “The influence of material microstructure on the chip forming process”, *Contemporary Materials*, 1: 69-76, (2014).
- [41] Naylor D.J., Llewellyn D.T., “Control of machinability in medium-carbon steels” *Keane Journal*, Metals Technology, 3(1): 254-271, (1976).
- [42] Laizhu J., Kun C., Hannu H., “Effects of the composition, shape factor and area fraction of sulfide inclusions on the machinability of re-sulfurized free-machining steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 58: 160-165, (1996).
- [43] Katayama, S., Imal, T., “Effect of Tool Materials on Surface Machined Roughness and Cuting Force of Low-Carbon Resulfurized Free-Machining Steels”, *ISU, International*, 30, 4, (1990).
- [44] Ramalingam, S., Watson, J. D., “Steel Making, Microstructure and Machinability”, *Mecanical Working and Steel Processing XVIII. (Proc. Confer.)*, Toronto, Iron and Steel Society, (1980).
- [45] Şeker, U., “Otomatik tezgahlarda çeliğin işlenebilirlik değerlendirmesi”, *G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi*, 1(1): 105-114, (1987)
- [46] Yamamoto, Y., Nishimura, T., “Development of A low Carbon Resulfurized Free Cutting Steel by Continuous Casting Process”, ASM, *International Conference on High Productivity Machining, Materials and Processing (Proc. Conf.)*, New Orleans, Louisiana, 7-9 May, (1985).
- [47] Ohtani, S., Koyasu, Y., Izumi, S., “Properties of Resulphurized Free-Machining Steels Made From Continious Casting Process”, *Transactions ISIJ*, 23: (1983).
- [48] Luong, L. H. S., “Influence of Microcracks on Machinability of Metals”, *Metals Technology*, November, (1980).
- [49] Luong, L. H. L., Brown, R.H., “The Role of Microcracks in Large Plastic Deformation”, *Journal of Engineering for Industry*, 103: November (1981).
- [50] Luiz N. E., Machado A. R., “Development trends and review of free-machining steels”, *Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture*, 222: (2008).
- [51] Katayama, S., Imai, T., Suzuki, N., “Effect of Cuting Tool-Chip Interface on Built-Up Edge Formation”, *Trasaction ISU*, 25, (1985).
- [52] Hashimura M., Miyanishi K., Mizuno A., “Development of Low-Carbon Lead-Free Free-Cutting Steel Friendly to Environment”, *Nippon Steel Technical Report*, 96, July, (2007)
- [53] Ingo E., “Machinability Enhancement of Non-Leaded Free Cutting Steels”, *Franhaur Inst.*, Germany, (Ph.D. Thesis), (2006).
- [54] Pickett, M. L., Naylor, D. J., “Development and Application of Improved Machinable Engineering Steel”, ASM, *International Conference on High Productivity Machining, Materials and Processing (Proc. Conf.)*, New Orleans, Louisiana, 7-9 May, (1985).
- [55] Yaguchi, H., “Effect of Soft Additives (Pb/Bi) on Machinability of Low Carbon Resulphurised Free Machining Steel”, *Materials Science and Technology*, 5, March, (1989).
- [56] Kato, T., Abeyama, S., Kimura, A., “Machinability and Other Properties of Resulfurized Free Machining Steel Containing of Small Amount of Tellurium”, ASM, *International Conference on High Productivity Machining, Materials and Processing (Proc. Conf.)*, New Orleans, Louisiana, 7-9 May, (1985).
- [57] Haitao L., Weiqing C., “Effect of Total Oxygen Content on the Machinability of Low Carbon Resulfurized Free Cutting Steel”, *Steel Research Int.*, 83(12): (2012).
- [58] Uhlmann E., Zanatta, A. M., Mahr F., Gomes, J. O., “Influence of inclusion contents on the micro-machinability of three plastic mold steels”, *Int J Adv Manuf Technol*, 68: 2451-2460, (2013)

- [59] Kankaanpaa, H., Pöntinen, H., “Machinability of Calcium-Treated Steels Using TiN-Coated High Speed Steel Tools”, *Materials Science and Technology*, 3: 155-158, (1987).
- [60] Aple, A. C., “The Relationship Between Inclusions and The Machinability of Steel”, *31st Mechanical Working and Steel Processing Conference proceedings*, Chicago, IL, October 22-25, (1989).
- [61] Ånmark N., Karasev A., Jönsson P. G., “The Influence of Microstructure and Non-Metallic Inclusions on the Machinability of Clean Steels”, *Steel Research Int.* 1(88): 1-8, (2017).
- [62] Ånmark N., Karasev A., Jönsson P.G., “The Effect of Different Non-Metallic Inclusions on the Machinability of Steels”, *Materials*, 8: 751-783, (2015).
- [63] Balart M. J., Davis C. L., Strangwood M., “Fracture behaviour in medium-carbon Ti-V-N and V-N microalloyed ferritic-pearlitic and bainitic forging steels with enhanced machinability”, *Materials Science and Engineering A*, 328: 48–57, (2002).
- [64] Pöntinen, H., Paju, M., “Effect of Layer Formation on The Machinability of Steels”, *Factors Influence Machining and Their Controls (Proc. Conf.)*, Cincinnati, Ohio, USA, 61-67, (1989).
- [65] Joseph, A.R., Tipnis, V.A., “The Influence of Non-Metallic Inclusions on The Machinability of Free-Machining Steels”, *Influence of Metallurgy on Machinability of Materials (Prod. Conf.)*, ASM, 1985.
- [66] Tanaka R., Yamane Y., Sekiya K., Narutaki N., Shiraga T., “Machinability of BN free-machining steel in turning”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47: 1971–1977, (2007).
- [67] Wang Y.N., Bao Y.P., Wang M., Zhang L.C., “Precipitation and control of BN inclusions in 42CrMo steel and their effect on machinability”, *Int. J. Minerals Metall. And Mater.*, 20(9): 842-849, (2013)
- [68] Ya-nana C., Yan-pinga B., Minb W., Xiao-fenga C., Lin-jinga W., Li-huaa Z., “Basic research on mechanism of BN inclusion in improving the machinability of steel”, *Revista de Metalurgia*, 50(4): October–December, e028, (2014).
- [69] Yu-Nan W., Jian Y., Yan-Ping B., “Effects of Non-metallic Inclusions on Machinability of Free-Cutting Steels Investigated by Nano-Indentation Measurements”, *Metallurgical and Materials Trans. A*, 46A: 281, (2015).
- [70] Katayama, S., Toda M., “Machinability of medium carbon graphitic steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 62: 358-362, (1996).
- [71] Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Figueira, L. Davim, J. P., “Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts”, *Int. J. Refractory Metals Hard Mater.* 27: 754–763, (2009).
- [72] Özçatalbaş Y., “1050 Çeliğinde Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerin Talaş Morfolojisi İle İşleme Özelliklerine Etkisi”, *9.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İst., (1997).
- [73] Özçatalbaş Y., “Isıl İşlemlerin Cr-Mo Esaslı Bir Çeliğin İşlenebilirliğine Etkisi”, *10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, 759-766, İstanbul, (2000)
- [74] Lane J. D., Stam J. W., “General Introductor Review of The Relationship Between Metallurgy and Machinability”, *Iron and Steel Inst., (Prod. Confer.)* Machinability, 65-70, (1967).
- [75] Metals Handbook, “*Machining of Carbon and Alloy Steel*”, Metals Handbook -Machining, Ninth Edition, Vol.16, ASM, (1989).
- [76] Bellot J., “Steels With Ipmmrowed Machinability”, *Translated From Metallovedenie Termicheskaya Obrabotka Metallov*, 11, (1980).
- [77] Naylor D. J., Llewellyn D. T., Keane D. M., “Control of Machinability in Medium Carbon Steels”, *Metals Technology*, 3(1): 254-271, (1976).
- [78] Özçatalbaş Y., Ercan F., “The Effects of Heat Treatment on The Machinability of Mild Steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, 136(1-3): 227-238, (2003).
- [79] Björkeborn K., Klement U., Oskarson H.B., “Study of microstructural influences on machinability of case hardening steel”, *Int J Adv Manuf Technol*, 49: 441–446, (2010).
- [80] Mabrouki T., Courbon C., Fabre D., Arrieta I., Arrazola P.J., Rech J., “Influence of Microstructure on Chip Formation when Broaching Ferritic-Pearlitic Steels”, *Procedia CIRP*, 58: 43 – 48, (2017).
- [81] Abouridouanea M., Klockea F., Döbbeler B., “Characterisation and modelling of the machinability of ferritic-pearlitic steels in drilling operations”, *Procedia CIRP*, 58: 79 – 84, (2017).
- [82] Diniz, A. E., Machado, A. R., Corrê J. G., “Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steel”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(9–12): 3157–3168, (2016).
- [83] Stachowiak G. W. and Stachowiak, G. B. "Wear Behaviour of Ceramic Cutting-Tools", *Key Engineering Materials*, 96: 137-164, (1994).
- [84] Rahman, M. “Advanced ceramic tools for machining application-HI”, *Machining Science and Technology*, 3(2): 295-296, (1999).
- [85] Komanduri, R. “Advanced ceramic tool materials for machining”, *Sadhan* 13(1-2), 119-137, (1988).
- [86] Fernandes, C. M., Senos. A. M. R., “Cemented carbide phase diagrams: A review”, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 29: 405–418, (2011).
- [87] Acchar, W., Zollfrank, C., Greil, P., “Microstructure and Mechanical Properties of WC-Co reinforced With NbC”, *Materials Research*, 7(3): 445-450, (2004).
- [88] Chang, S. H., Chang, M. H., Huang, K. T., “Study on the sintered characteristics and properties of nanostructured WC-15 wt% (Fe-Ni-Co) and WC-15 wt% Co hard metal alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, 649: 89-95, (2015).
- [89] Konyashin, I., Zaitsev, A.A., Sidorenko, D., Levashov, E. A., “Wettability of tungsten carbide by liquid binders in WC-Co cemented carbides: Is it complete for all carbon contents?”, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 62: 134-148, (2017)
- [90] <https://www.quora.com/What-is-tungsten-carbide,What-is-tungsten-carbide?>, (2017).
- [91] Xin, W., “WC/Co Tool Wear in Dry Turning of Commercially Pure Aluminium”, *Journal of*

- Manufacturing Science and Engineering*, 136: 031006/1-7, (2014).
- [92] Xin Liu, L. L., Li, X. Q., Li, Y. Y., “Wear mechanisms of WC–10Ni3Al carbide tool in dry turning of Ti6Al4V”, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 48: 272–285, (2015).
- [93] Bai, D., Sun, J., Chen, W., “Wear mechanisms of WC/Co tools when machining high-strength titanium alloy TB6 (Ti-10V-2Fe-3Al)”, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 90: 2863–2874, (2017).
- [94] Liang L., Liu X., Li X. Q., Li Y. Y., “Wear mechanisms of WC–10Ni3Al carbide tool in dry turning of Ti6Al4V”, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 48: 272–285, (2015).
- [95] Özçatalbaş Y., “Wear mechanisms of WC–Co tool in dry machining of heat treated steels”, *8th International Advanced Technologies Symposium (IATS’17)*, 1854–1861, Elazığ / TÜRKİYE, (2017).
- [96] Tonshoff H. K., “Machinability of Forged Steels in Interrupted Cutting”, *Journal of Materials Processing Technology*, 21: 219-236, (1990).
- [97] Tonshoff H. K., “Materials Aspects in Machining of Forged Steels”, *High Productivity Machining (Proc. Conf.)*, 207-221, (1985).
- [98] Finn M. E., “*Machining of Carbon and Alloy Steel*”, Metals Handbook, Ninth Edition, 16: 672-673, ASM Int., Ohio, (1989).
- [99] Das S. R., Dhupal D., Kumar A., “Experimental investigation into machinability of hardened AISI 4140 steel using TiN coated ceramic tool”, *Measurement*, 62: 108–126, (2015).
- [100] Bhattacharya D., Machinability of Steel, *Journal of Metals*, March, 32-35, (1987).
- [101] Tan E., Ovalı I., Mavi A., Kaplan M., Okay S., “Influence of repeated tempering on the machinability and microstructure of an AISI 52100 steel”, *Materials Testing*, 57(11-12): 947-953, (2015).
- [102] Sueyoshi H., Tanaka R., “Heat Treatment and Machinability of the Tri-Phase Steel Composed of Ferrite, Martensite and Graphite”, *J. Japan Inst., Metals*, 54(2): 231–236, (1990).
- [103] Akasawa T., Fukuda I., Nakamura K., Tanaka T., “Effect of microstructure and hardness on the machinability of medium-carbon chrome-molybdenum steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, (153–154): 48–53, (2004).
- [104] Silva L. R., Abrão A. M., Faria P., Davim J. P., “Machinability Study of Steels in Precision Orthogonal Cutting”, *Materials Research*, 15(4): 589-595, (2012).
- [105] Arrieta, I., Courbon, C., Cabanettes, F. P.-J. Arrazola, and J. Rech, “Influence of the ferritic-pearlitic steel microstructure on surface roughness in broaching of automotive steels” *AIP Conference Proceedings*, 1896, 090011, (2017).
- [106] Yazman Ş., Akdemir A., Uyaner M., Bakırcıoğlu B., “The Effect of Build Up Edge Formation on The Machining Characteristics in Austempered Ferritic Ductile Iron”, *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, IMECE2013, 15-21, California, USA, (2013).
- [107] Akdemir, A., Yazman Ş., Sağlam H., Uyaner M., “The Effects of Cutting Speed and Depth of Cut on Machinability Characteristics of Austempered Ductile Iron”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134: 021013-1, (2012).
- [108] Korkut, İ., Kasap, M., Çiftçi, İ., and Şeker U., “Determination of Optimum Cutting Parameters During Machining of AISI 304 Austenitic Stainless Steel”, *Materials Design*, 25: 303-305, (2004).
- [109] Yıldız, Y., Günay, M., Şeker, U., “The effect of the cutting fluid on surface roughness in boring of low carbon steel”, *Machining Science and Technology*, 11(4): 487-494, (2007).