



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Bilyalı Dövme ve Plazma Nitrürleme İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Dayanımına Etkisi

Azmi Erdoğan ^{a,*}, Okan Ünal ^b, M. Sabri Gök ^c, Soner Özdemir ^d, Sabri Alkan ^e

^a Metalurji ve Malzeme Müh., Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fak., Bartın Üniversitesi, Bartın, TÜRKİYE

^b Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, TÜRKİYE

^c Makine Mühendisliği, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Bartın, TÜRKİYE

^d Makine Mühendisliği, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bartın Üniversitesi, Bartın, TÜRKİYE

^e Su Altı Teknolojisi Pr., Denizcilik MYO, Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Balıkesir, TÜRKİYE

DOI: 10.29130/dubited.1225813

ÖZ

Mevcut çalışmada endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan AISI 4140 çeliğinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ile aşınma dayanımının nasıl değiştiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda AISI 4140 çeliği farklı iki şiddette bilyalı dövme işlemine ve plazma nitasyon işlemlerine tabi tutulmuştur. Mikroyapıda meydana gelen değişimler SEM ve XRD aracılığıyla belirlenirken yüzey dayanımında meydana gelen değişim mikrosertlik ölçümü ile belirlenmiştir. Plazma nitrürleme sonucunda yüzeyde oluşan ilave katmanın demir nitrür fazları olduğu görülmüş bununla beraber bilyalı dövme işlemlerinden sonra herhangi bir faz değişimi meydana gelmemiştir. Tüm işlemlerle birlikte numunelerin yüzey sertliklerinde artış sağlanmış ve plazma nitrürleme ile yüzeyde 700 HV_{0.2}'ye varan sertlik artışı görülmüştür. Buna bağlı olarak en iyi aşınma dayanımı plazma nitrürleme işlemi ile sağlanmıştır. Aşırı bilyalı dövme de aşınma kayıplarının kayda değer miktarda azaltırken geleneksel bilyalı dövme işlemi aşınma dayanımı üzerinde sınırlı bir etki göstermiştir. Uygulanan yüzey modifikasyon işlemlerinin sağladığı sertlik artışı aşınma dayanımında görülen artışa neden olarak gösterilmiştir. Bilyalı dövmede beklenen etkinin görülmemesi ise yüzeyde oluşan pürüzlülüğe atfedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI 4140, Bilyalı Dövme, Plazma Nitrürleme

Effect of Shot Peening and Plasma Nitriding Processes on Wear Resistance of AISI 4140 Steel

ABSTRACT

It is aimed to determine how the wear resistance changes by improving the surface properties of AISI 4140 steel, which is frequently used in industrial applications. In this context, AISI 4140 steel was subjected to two different intensities of shot peening and plasma nitration processes. While the changes in the microstructure were determined by SEM and XRD, the change in the surface strength was determined by the microhardness measurement. It was observed that the extra layer formed on the surface as a result of plasma nitriding was iron nitride phases, however, no phase change occurred after the shot peening processes. All processes increased the surface hardness of the samples and an

increase of up to 700 HV_{0.2} was observed on the surface with plasma nitriding. Accordingly, the best wear resistance was achieved by plasma nitriding process. Conventional shot peening had a limited effect on wear resistance, while severe shot peening reduced wear losses considerably. The increase in hardness provided by the applied surface modification processes has been shown to cause the increase in wear resistance. The lack of the expected effect in shot peening is attributed to the roughness on the surface.

Keywords: AISI 4140, Shot Peening, Plasma Nitriding

I. GİRİŞ

Sürtünmeye ve aşınmaya bağlı mekanik hasarları en aza indirmek, günümüzün hareketli mekanik parçaları için hala en büyük zorluklardan biridir. Düşük alaşımlı çelikler endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek özgül mukavemete, iyi darbe tokluğuna ve şekillendirilebilirliğe sahip oldukları için, makine imalat endüstrisinde borular, kılavuz raylar gibi birçok parçalarının imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşınma, bu bileşen parçaları için önemli bir hasar modelidir [1]. Yüksek torklar, ağır yükler ve zayıf yağlama gibi zorlu çalışma koşullarından dolayı zorlu koşullar altında çalışan parçalarda aşınma hasarı sıklıkla görülür. İş parçalarının aşınma davranışı artık gerilim, yüzey pürüzlülüğü, sertlik, mikro yapı vb. gibi yüzey özelliklerine duyarlıdır [2]. Literatürde aşınma problemi yoğun bir şekilde incelenmiştir ve mekanik yüzey mühendisliği veya kaplama ile yüzey sertliğini arttırmak, aşınma direncini arttırmak için etkili yöntemlerdir [3]. Yüzey sertleştirme, malzeme yüzeyindeki aşınmayı azaltabilir [2]. Bugüne kadar, bilyalı dövme (SP), plazma nitrürleme (PN) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) vb. gibi birçok yüzey iyileştirme yaklaşımı geliştirilmiştir [4]–[6].

Bilyalı dövme ile iş parçalarının yüzey özelliklerinde meydana gelen değişiklikler, işlemin başarısını etkileyebilir [2]. Bilyalı dövme, düşük maliyetli, basit ve endüstriyel olarak güvenilir olan numunelerin aşınma direncini artırma yöntemlerinden biridir. Bu nedenle, bileşenleri aşınmaya ve yorulmaya karşı korumak için bilyalı dövme kullanımı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [7]. Bilyalı dövme işleminde, küçük sert parçacıklar (genellikle dökme demir, çelik veya camdan yapılmış 0.25 mm–1 mm çapında küresel bilyalar) bir yüzeyi bombardıman eder [8]. Sert parçacıklar yüzeye çarptığında darbe kuvvetleri ile yüzey deforme olur. Sert parçacıklar yüzeye çarpmaya devam eder ve deforme olmuş bölgeler genişleme eğilimi gösterir. Plastik olarak deforme olmuş yüzey tabakası genişlemeye çalıştığından, bu nedenle, numunelerin yüzeyini koruyan artık basma gerilmeleri oluşur [9]. SP işleminin sağladığı mukavemet artışı, tane incelmeye ve bilyaların çarpma girintisi nedeniyle oluşan daha yüksek dislokasyon yoğunluğuna bağlıdır [10]–[12]. Bilyalı dövme nedeniyle artan yorulma mukavemeti geniş çapta araştırılmıştır, ancak bilyalı dövmeli bileşenler için aşınma ve sürtünme etkisindeki davranışları çok az incelenmiştir [7], [13].

Çeliğin nitrürlenmesi sırasında, atomik azot, bir derişim gradyanı boyunca malzemenin yüzeyine yayılır ve ilk malzemeye bağlı olarak farklı tipte nitrürlerin oluşumuyla bir nitrürleme bölgesi oluşturur [14]. Bu nitrürleme bölgesi, malzeme içinde büyüyen bir bileşik katmanından ve alttaki difüzyon katmanından oluşur. Bileşik katman, malzemenin yüzeyinde oluşur ve çoğunlukla demir nitrür (γ' : Fe₄N, ϵ : Fe₂₋₃N) kombinasyonundan oluşur. Difüzyon katmanı bileşik katmanının altında bulunur ve konsantrasyon gradyanı boyunca malzemenin içine doğru büyür. Bileşik katman ile karşılaştırıldığında, difüzyon katmanı, başlangıç malzemesinin eksik bir dönüşümü ile karakterize edilir ve demir nitrürler (esas olarak γ') ve artık matris (α -Fe) içerir. Difüzyon tabakasındaki nitrür miktarı, derinlik arttıkça azalır ve difüzyon tabakasının sonunda hiç nitrür kalmaz [15], [16]. En yaygın nitrürleme prosesleri gaz nitrürleme, plazma nitrürleme ve tuz banyosunda nitrürlemedir. Diğer işlemlerle karşılaştırıldığında, plazma nitrürleme, işlem kontrolünde çok büyük bir esnekliğe sahiptir, bu da nitrürleme bölgesinin özelliklerinin geniş bir aralıkta değiştirilebileceği ve uyarlanabileceği anlamına gelir [15]. Plazma nitrürleme tekniği, işleme parametrelerine ve nitrürlenmiş katman özelliklerine bağlı olarak çeliklerin yüzey sertliğini, korozyon direncini ve tribolojik özelliklerini iyileştirebilir [17], [18].

Bilyalı dövme işlemi yüzeyde yarattığı kalıntı gerilmeler sebebiyle genellikle yorulma dayanımına etkisi üzerinden çalışılmaktadır. Ancak işlemin malzemelerin aşınma dayanımına etkisi üzerine literatürde yeterince çalışmaya rastlanmamaktadır. Buradan hareketle bu çalışmada bilyalı dövme ve nitrüleme işleminin AISI 4140 çeliğinin mikroyapı ve aşınma özelliklerine etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda AISI 4140 çeliği iki farklı şiddette bilyalı dövme işlemine ve nitrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerde meydana gelen değişiklikler mikroyapı, sertlik ve aşınma dayanımı açısından incelenmiştir.

II. Materyal ve Method

Çalışmada bilyalı dövme ve nitrüleme işlemlerinin etkisini belirlemek amacıyla altlık malzeme olarak düşük alaşımlı AISI 4140 çeliği belirlenmiştir. AISI 4140 çeliğinin bileşimi Tablo 1’de verilmiştir. Bilyalı dövme işlemi iki farklı şiddette (geleneksel bilyalı dövme:CSP, aşırı bilyalı dövme:SSP) uygulanmıştır. Hava basınçlı SP işlemleri S2000’in 15 cm nozul mesafesi ve 90° nozul açısına sahip kapalı hazneli ekipmanında 3 mm çapındaki bilyalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Plazma nitrüleme işlemi 500 V potansiyel altında, 5 mbar vakum basınçta gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yüzey işlemlerine ait diğer parametreler Tablo 2 ve 3’de verilmiştir.

Tablo 1. AISI 4140 çeliğinin kimyasal bileşimi.

% C	% Cr	% Mn	% Mo	% P	% Si	% S
0.41	0.9	0.9	0.15	≤0.0035	0.25	≤0.04

Tablo 2. Bilyalı dövme parametreleri.

	Almen şiddeti	Küresel bilya	Yüzey kaplama (%)	Hava basıncı	Dövme süresi (s)
CSP	13A	S230	200	30	10
SSP	29A	S230	200	60	15

Tablo 3. Plazma nitrasyon işlem parametreleri.

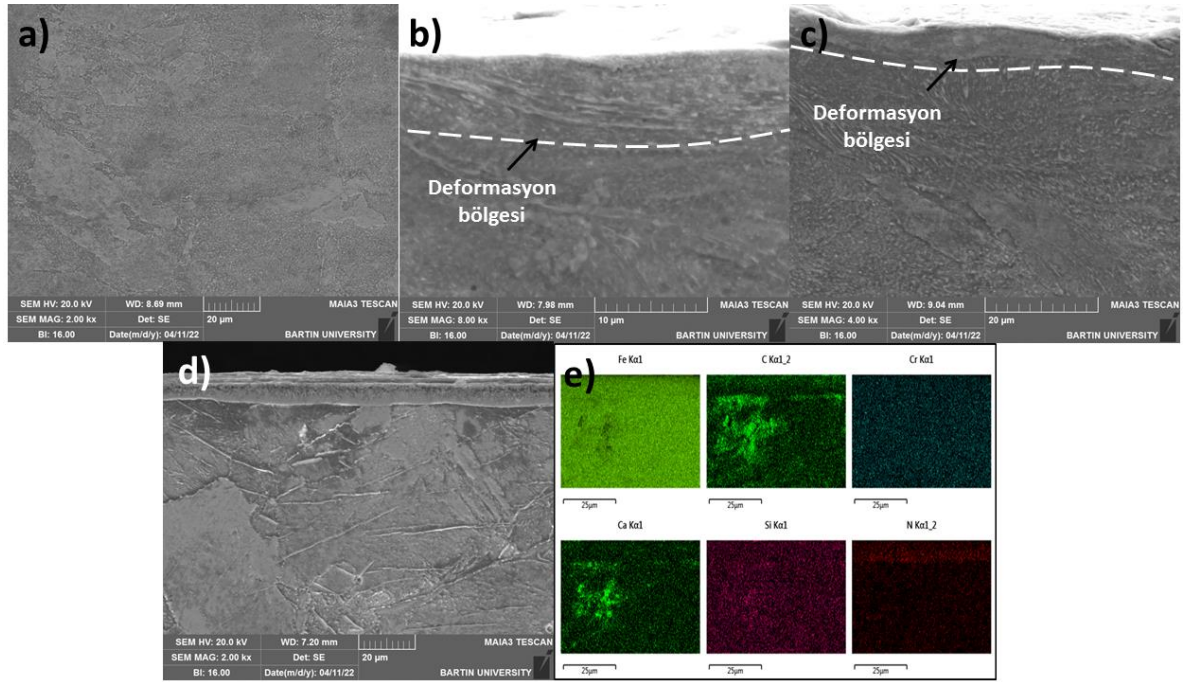
	Sıcaklık (°C)	Süre (h)	H ₂	N ₂	Vakum basıncı (mbar)	Plazma voltajı (V)
PN	520	12	%75	%25	5	500

Bilyalı dövme ve plazma nitrüleme işlemlerinden sonra numuneler 10x10x3 mm boyutlarında kesilerek bakalit kalıplara alınmıştır. Numuneler 60-2500 mesh zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve elmas pasta ile parlatılmıştır. %2’lik Nital solüsyonu ile dağlanan numunelerin mikroyapı görüntüleri TESCAN MAIA3 XMU model taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında alınmıştır. Test numunelerinin faz karakterizasyonu için 20° ila 80° açı aralığında, 1.541 Å dalga boyuna sahip bir Cu K α radyasyon kaynağına sahip Rigaku X-ışını difraktometresi (DMAX 2200) kullanılmıştır. Kesitten alınan sertlik değerleri QNESS Q10 M mikrosertlik cihazında 200 g yük altında belirlenmiştir.

Numunelerin aşınma testleri, TURKYUS POD&HT&WT ball-on-disk aşınma cihazında kuru kayma koşulları altında yapılmıştır. Testlerde aşındırıcı bilya olarak 6 mm çapında Al₂O₃ bilya kullanılmıştır. Testler 5, 10 ve 15 N yükler altında 0.02 m/sn kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri 5.5 mm’lik bir lineer hat üstünde toplam 144 m kayma mesafesinde yapılmıştır. Aşınma kayıpları HUVITZ 5800 3D optik profilometre cihazında belirlenmiştir. Tüm testler sonuçlarının doğrulanması adına en az 3 kez tekrar edilmiştir.

III. Bulgular ve Değerlendirme

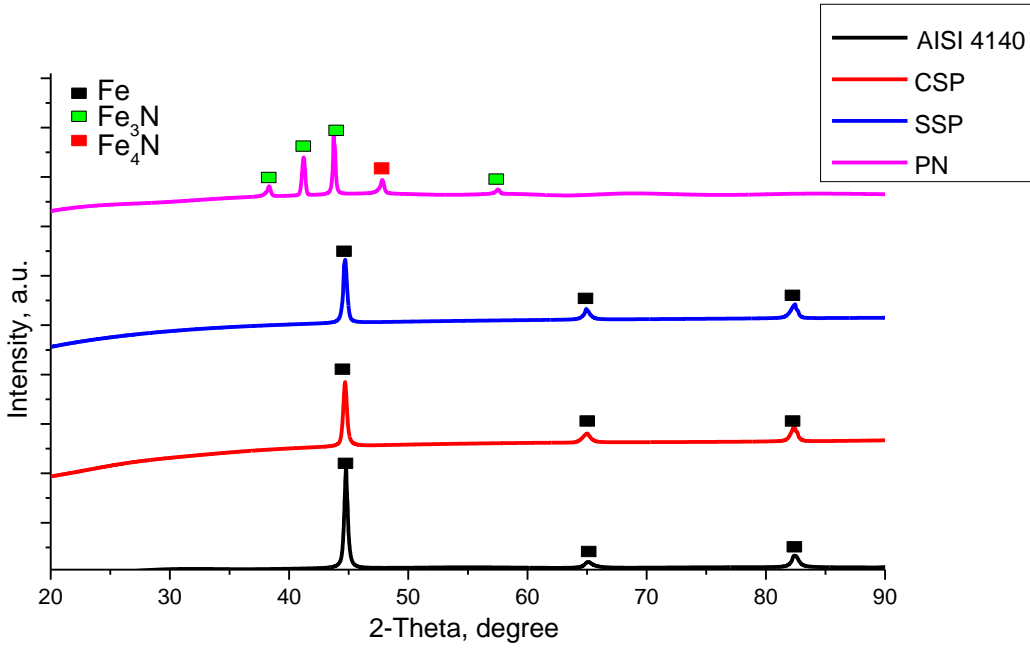
AISI 4140, CSP, SSP ve plazma nitrürlenmiş numunelere ait SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 1’de verilmiştir. İşlem görmemiş AISI 4140 çeliğinde (Şekil 1a) homojen bir tane ve tane sınırı yapısından bahsetmek mümkündür. CSP (Şekil 1b) numunesinde ise uygulanan işleme bağlı olarak yüzeye yakın bölgelerde homojenliğin kaybolduğu yüzeye yakın bölgelerde deformasyonun varlığı görülmektedir. Bilyalı dövme işlemi yüzeye çarpan bilya taneleri yüzeye yakın bölgelerde şiddetli plastik deformasyon oluşturmuştur. Plastik deformasyona bağlı olarak dislokasyon hareketleri ve ikizlenme sonucunda tane yapısı değişmiştir. SSP (Şekil 1c) numunesinde de benzer şekilde yüzey kısımlarda bilyalı dövmenin etkisi kendini belli ederken çekirdeğe doğru ilerledikçe AISI 4140 çeliğinin kendi mikroyapısını koruduğu bölgeler görülmektedir. Dövme şiddetinin artması deforme olan kısmın kalınlığını arttırmıştır. Plazma nitrürleme uygulanmış PN (Şekil 1d) numunesinde ise numunenin üstünde ortalama 5-6 µm kalınlığında farklı bir tabaka söz konusudur. EDS analizinde (Şekil 1e) de görüleceği üzere kimyasal kompozisyondaki değişimin de etkisiyle rahatça kendini belli eden bu tabakanın nitrür tabakası olduğunu söylemek mümkündür. Nitür tabakasının varlığının bir diğer ispatı da Şekil 2’de verilen XRD analizidir. PN numunesinde tespit edilen demir nitür fazları SEM görüntüsünde görülen tabakanın nitrür tabakası olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan numunelere ait SEM mikroyapı görüntüleri: a) AISI 4140, b) CSP, c) SSP, d) PN, e) PN-EDS analizi.

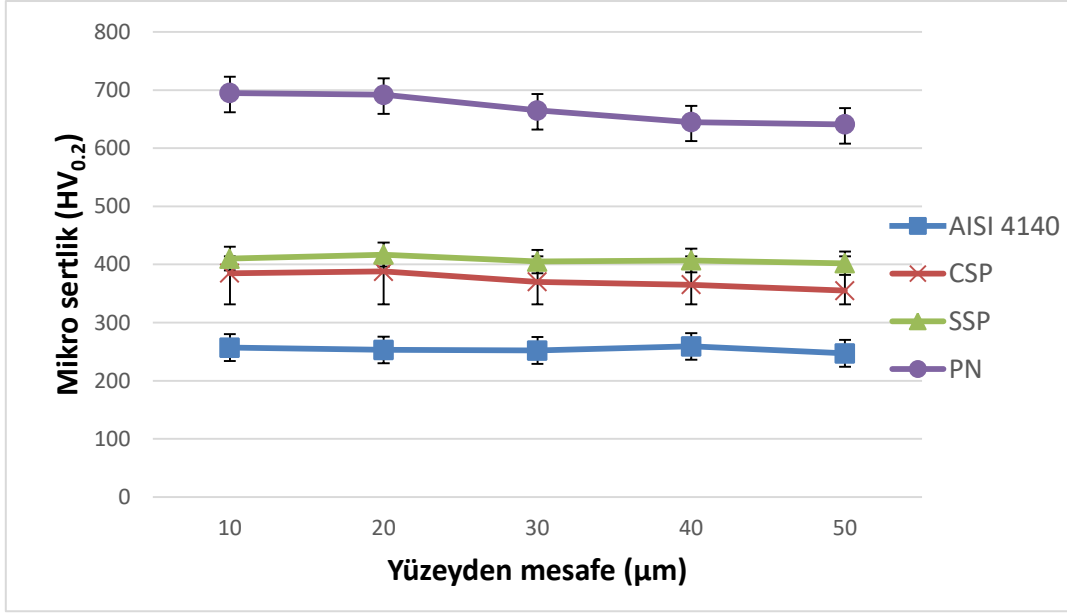
Şekil 2’de İşlem görmemiş (UN), bilyalı dövülmüş (CSP), aşırı bilyalı dövülmüş (SSP) ve plazma nitrürlenmiş (PN) numunelere ait XRD kırınım desenleri ve belirlenen fazlar verilmiştir. AISI 4140 çeliği ve tüm bilyalı dövme numuneleri için üç ana kırınım tepe noktası tespit edilmiştir. Bu pik noktalarının Fe fazı ile uyumlu olduğu yapılan taramalar ile belirlenmiştir. Bilyalı dövme işlemleri sonrasında farklı bir kırınım noktası tespit edilmemiştir. Bu herhangi bir kimyasal bileşim değişikliği olmaması sebebiyle normaldir. Ayrıca faz değişiminin meydana gelmediğini de göstermektedir [12], [14]. Ancak belki farklılık olarak bahsetmek gerekirse bilyalı dövme işleminden sonra pik şiddetlerinin azaldığından bahsetmek mümkündür. Bu yüzeye yakın kısımlarda meydana gelen plastik deformasyona atfedilebilir. Aşırı plastik deformasyon bu kısımlarda tane boyutunun azalmasına sebep olmuştur. Tane boyutunun değişmesi, yüzeyde meydana gelen kalıntı gerilmeler ve plastik deformasyona bağlı olarak oluşan kafes distorsiyonu sebebiyle XRD pik yoğunluklarında ve genişliğinde değişim meydana gelmektedir [5], [6], [19]. Bunun dışında plazma nitrasyon işlemi uygulanan numunede farklı açılarda kırınım noktaları tespit edilmiştir. Farklı açılarda kırınım noktalarının oluşması yapıda bir faz değişimini ya da kimyasal bileşim değişimini işaret eder. PN numunesinde, uygulanan plazma nitrürleme işlemine bağlı olarak yüzeye yakın bölgelerde yeni fazlar

oluşmuştur. XRD analizi de yüzeye yakın bölgelerden bilgi verdiği için Fe fazına ait pikler PN numunesinde görülmemiştir [4], [18]. PN numunesinde belirlenen piklerin Fe_3N ve Fe_4N fazları ile uyumlu olduğu yine taramalar ile tespit edilmiştir.



Şekil 2. AISI 4140, Bilyalı dövülmüş (CSP), Aşırı bilyalı dövülmüş (SSP) ve Plazma nitrürleşmiş (PN) numunelere ait XRD grafiği.

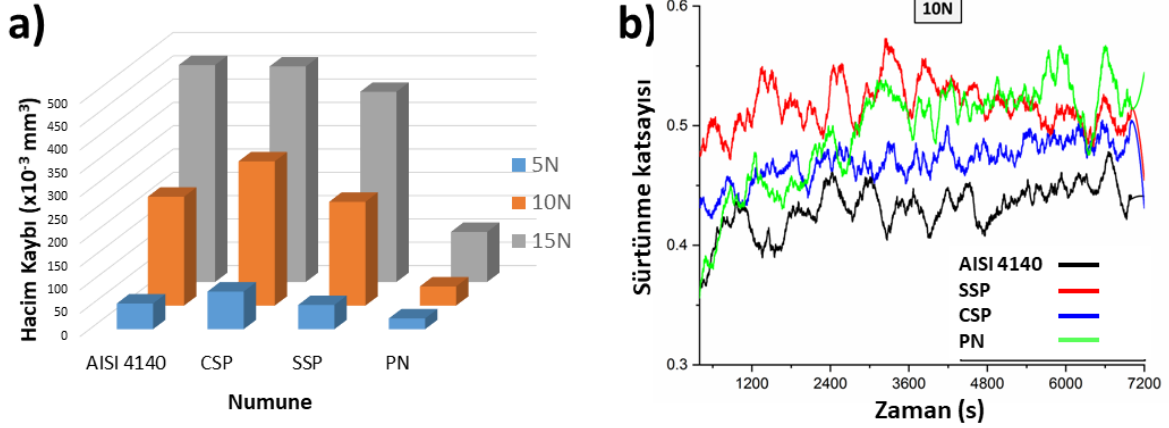
Numunelerin yüzeyden merkeze doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimi grafiği Şekil 3’de verilmiştir. Bilyalı dövme, bir tür soğuk iş sertleştirme işlemidir [1]. Bilyalı dövme işleminden sonra matrisin yüzeyi plastik bir deformasyona uğramış ve sertleştirilmiş bir yüzey tabakası oluşmuştur. Bilyalı dövme yapılmayan numunelerin sertliklerinde derinlik artışı ile belirgin bir değişimin olmadığı ve ortalama sertliğin $250 HV_{0.2}$ civarında olduğu şekilden de görülmektedir. Şekil 3’te AISI 4140 çeliğinin yüzey sertliğinin farklı bilyalı dövme şiddetleri altında önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bilyalı dövme işlemi Almen şiddeti sırasıyla A13 ve A29 olduğunda numunelerin ortalama yüzey sertlikleri 390 ve $410 HV_{0.2}$ ’ye ulaşmaktadır. İşlem görmemiş numuneye göre %50 den fazla bir mikrosertlik artışından bahsetmek mümkündür. Sonuçlar, bilyalı dövme şiddeti ne kadar yüksek olursa numunenin yüzey sertliğinin o kadar yüksek olduğunu göstermektedir. Sertlikteki artışın nedeni bilyalı dövmenin neden olduğu yüzeydeki plastik deformasyondur ve bu da yüzeye yakın tanelerin boyutunda küçülmeye neden olur. Bilyalı dövme işlemi sebebiyle şiddetli plastik deformasyon oluşur. Plastik deformasyona bağlı olarak dislokasyon hareketleri ve ikizlenme sonrası alt tane oluşumu söz konusudur ve deformasyon yoğunluğu ile orantılı olarak tane incilmesi de artmaktadır. Bilyalı dövme işlemi sonucunda deformasyon sertleşmesine uğramış bir tabaka oluşur [19]. Farklı dövme şiddetlerinde mikrosertliğin malzeme yüzeyinden matrisin iç kısmına doğru giderek azaldığı şekilden görülmektedir. Bu, bilyalı dövme işleminin yüzeyden iç kısma doğru etkisini yavaş yavaş kaybettiğini göstermektedir. Yüzeydeki mikrosertlik ölçümleri (Vickers $HV_{0.2}$), nitrürleme sonrası sertlikte önemli bir artış göstermektedir. Plazma nitrürleme işlemi ile malzeme sertliğinin $700 HV_{0.2}$ ’ye kadar arttığı görülmektedir ve bu artış, numune yüzeyinde sert demir nitrürlerin oluşumuna atfedilebilir [17], [20]. Ek olarak, nitrürleşmiş numunelerin daha derin bölgelerde de mikrosertlik profillerinin yüksek sertlik değerleri verdiği görülmektedir. Bu durum için iki sebep gösterilebilir. Birincisi nitrür tabakası kalınlığı çok daha düşük olsa da azotun difüzyon bölgesi boyunca sertlik değerlerinin yüksek seyretmesidir [21]. İkinci sebep ise plazma nitrasyon işleminin aynı zamanda bir plazma yaşlandırma etkisi göstererek de numune yüzeyine yakın bölgelerde sertlik artışı sağlamasıdır [22].



Şekil 3. Yüzeyden merkeze doğru kesitten alınan mikro sertlik değerleri.

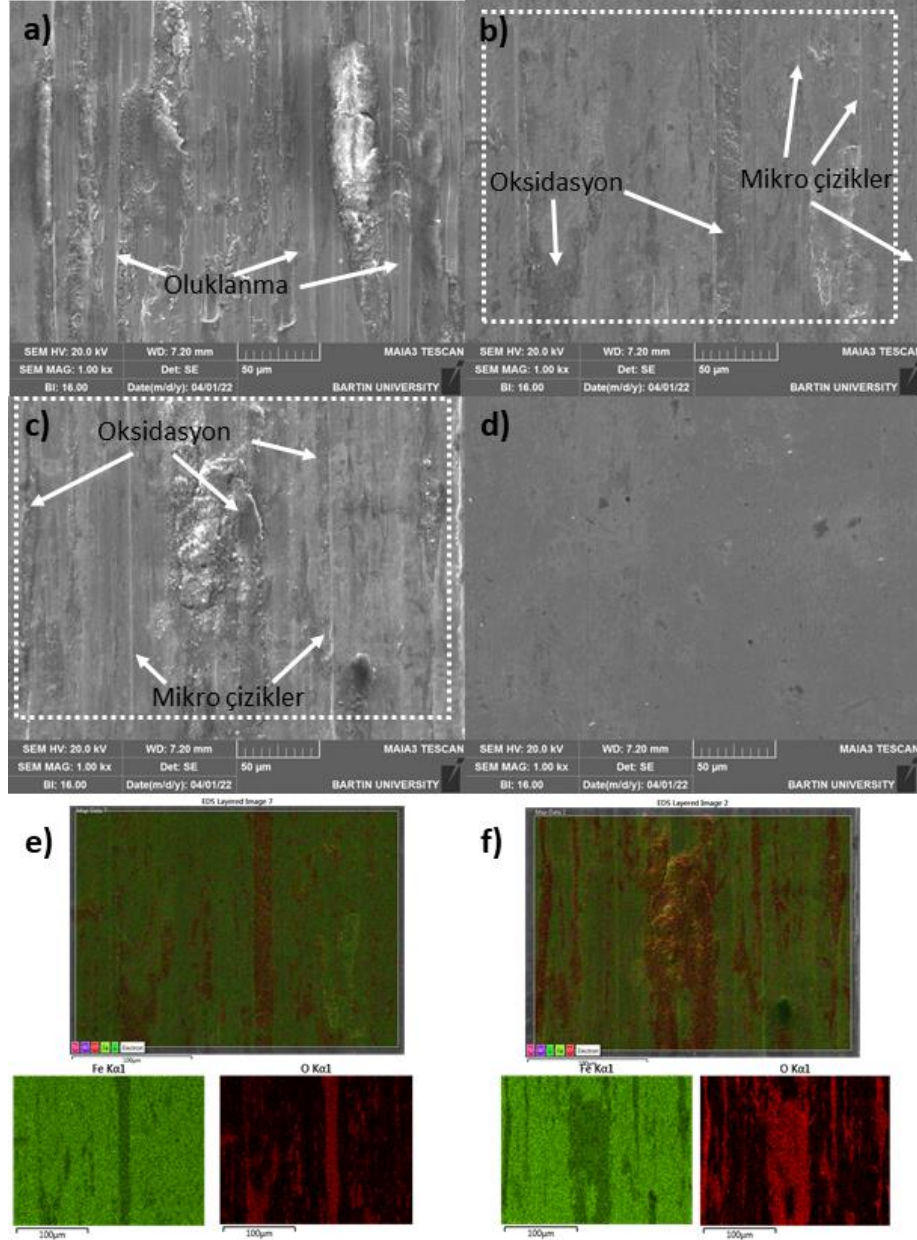
Numunelerin aşınma dirençleri farklı yükler altında kuru kayma aşınma koşullarında test edilmiştir. Testler sonrasında meydana gelen hacim kaybı değerleri Şekil 4a'da verilmiştir. Öncelikle yük açısından değerlendirmek gerekirse tüm numunelerde aşınma testinde uygulanan yükün artması ile hacim kaybı değerlerinin arttığı söylenebilir. Bu sonuç çoğunlukla beklenen bir durumdur. Çünkü aşındırıcı uç üzerine uygulanan yükün artması, ucun karşı yüzeyi daha fazla etkilemesine sebep olur. Aşınmaya çalışan parçalarda malzeme kaybı iki farklı yükün meydana getirdiği kuvvet ile meydana gelir. Bunlar normal kuvvet ve kesme kuvveti olarak sıralanabilir. Normal kuvvet batıcı ucun üzerine uygulanan yükü aşınan parçaya iletmesi ile meydana gelirken kesme kuvveti aşınan parça ve aşındırıcı ucun birbirine göre nispi hareketi sonucunda meydana gelir. Aşınma testi sırasında uygulanan yük batıcı ucun numune yüzeyine daha fazla penetre olmasını sağlar. Bu sırada devam eden nispi harekete bağlı olarak kesme kuvvetleri numune yüzeyinden malzeme ayrılmasını sağlar. Bu sebeple test sırasında uygulanan yükün 5 N'dan 10 ve 15 N'a artırılması ile birlikte malzeme kayıplarında artış meydana gelmiştir. Bunun dışında numunelere uygulanan yüzey işlemlerine göre meydana gelen hacim kayıpları değerlendirildiğinde aşınma dayanımının uygulanan yüzey işlemlerine bağlı olarak arttığını söylemek mümkündür. Aşınma kayıpları grafiğine bakıldığında düşük yüklerde bilyalı dövme işleminden sonra aşınma kayıplarının işlem görmemiş numuneye göre biraz arttığı görülebilir. Ancak yükteki artışla beraber bu durumun tam tersine döndüğü, yani aşınma dayanımının bilyalı dövme işlemi ile arttığını söylemek mümkündür. Burada bilyalı dövme işleminin yüzey sertliğinin artması sayesinde sağladığı fayda yanında yüzeyde oluşturduğu pürüzlenmenin de dezavantajından bahsetmek gerekir [23]. Bir malzemenin aşınma dayanımını arttırmak için başvurulması gereken en öncelikli yollardan birisi malzemenin yüzey sertliğini arttırmak olduğunu söylemek hiç de zor değildir. Ancak sertlik artışı sağlanırken yüzey özelliklerinde meydana gelebilecek diğer değişikliklerin de hesaba katılması gerekir. Örneğin yüzeydeki sağlanan sertlik artışı aynı zamanda aşırı kırılmalı bir yapı meydana getirirse bu aşınma dayanımını arttırmak yerine tam tersine bir etkiye bulunabilir [24], [25]. Ya da bilyalı dövme gibi bir yüzey modifikasyon işleminin yüzeyde oluşturduğu pürüzlenme sebebiyle sertlikteki artışa rağmen yaratabileceği olumsuz etkinin de bilinmesi gerekir [26]. Bilyalı dövme işlemi sertliği arttırması sebebiyle aşınma dayanımını arttırıcı yönde etki eder. Ancak yüzeyde meydana gelen pürüzlülük aşınma dayanımında olumsuz etkiye sebep olur. Çünkü aşınma sırasında yüzeydeki yüksek pürüzlülük sebebiyle batıcı uç daha küçük bir alan tarafından taşınır. Yani batıcı uç ile malzeme arasındaki temas alanı daha küçüktür. Bu da aynı zamanda daha yüksek temas basıncı anlamına gelir. Daha yüksek temas basıncı sebebiyle malzemenin aslında daha yüksek bir yük ile aşındırılmasına sebep olur. Sonuç olarak şunu söylemek mümkündür bilyalı dövme işleminin düşük yüklerde aşınma kayıplarının daha yüksek çıkması yüzeydeki pürüzlenme ile ilişkilendirilebilir. Ancak artan yük ile beraber pürüzlüğün dezavantajına karşı sertlikteki artışında sağladığı avantaj daha baskın

hale gelerek aşınma kayıplarının azalmasını sağlamıştır. Aşırı bilyalı dövmede ise sertlik değerlerinin daha yüksek olması sebebiyle yukarıda bahsedilen durumla karşılaşılmamış ve her koşulda daha iyi aşınma dayanımı elde edilmiştir. Dikkat edilirse en düşük aşınma kayıpları plazma nitrasyon işlemi uygulanmış numunelerde görülmüştür. Buna sebep olarak XRD analizinde de verilen Fe_xN_y gibi demir nitrit fazları gösterilebilir. Oluşan bu fazlar daha yüksek yüzey sertliği sağlamış ve buna bağlı olarak da aşınma dayanımı artmıştır. Ayrıca bilyalı dövme işlemlerinde görülen yüzey pürüzlenmesi gibi bir negatif durum da söz konusu olmadığı için en yüksek aşınma dayanımı tüm yüklerde nitrürlenmiş numunelerde görülmüştür. Şekil 4b'de 10 N yük altında yapılan testlere ait sürtünme katsayısı eğrileri verilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı işlem görmemiş numunede görülürken bunu SSP numunesi takip etmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı değerleri CSP ve PN numunelerinde görülmüştür.



Şekil 4.a) Kuru kayma aşınma testlerinde meydana gelen hacim kayıpları, **b)** 10 N yük altında yapılan aşınma testlerinde meydana gelen sürtünme katsayısı eğrileri.

Şekil 5'te 10 N yük altında yapılan aşınma testleri sonrasında aşınmış yüzeylerden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. İşlem görmemiş AISI 4140 numunesi yüzeyinde yüksek oranda deformasyon dikkati çekmektedir. Aşınma prosesi sırasında yüzeyden ayrılan aşınma atıkları ve bunların oluşturduğu oluklanma aşınma mekanizması baskın aşınma mekanizması olarak söylenebilir. Bunun yanında yüzeyden ayrılan atıkların yük etkisi altında yüzeye tekrar birleşmesi sonucunda meydana gelmiş yeniden sıvanmış bölgeler görülmektedir. Bilyalı dövülmüş numunede ise yüzeyin daha dayanıklı olduğu aşınma izinden de belli olmaktadır. Oluklanmanın azalması bunun yerine mikro çiziklerin oluşumu söz konusudur. Bunun dışında oksitlenmiş bölgelerden bahsetmek de mümkündür. Aşırı bilyalı dövülmüş numunede CSP numunesi ile benzer mekanizmalar bulunmaktadır. Ayrıca yüzeyin daha yumuşak bölgelerinde ayrılmış parçaların yüzeye tekrarlı yükler altında tekrar yapıştığı bölge de dikkati çekmektedir. Bu kısım zamanla oksitlenmekte bununla beraber gevrekleşmekte ve devam eden aşınma prosesi sırasında parçalanarak aşınma atıkları oluşturmaktadır. Bu atıklarda zamanla tekrar mikro çizikler oluşturmaktadır. Plazma nitrürlenmiş numune yüzeyi ise en iyi aşınma dayanımını kanıtlar şekilde neredeyse tamamen pürüzsüz bir yapıya sahiptir. En yüksek sertliğe sahip bu numunede aşındırıcı bilya ancak yüzeyde bir parlatma işlevi görerek aşınmaya sebep olmuştur. Bu sırada anlık ısı artışlarına bağlı olarak meydana gelen oksitlenmiş bölgeler yüzeyde baskın olarak bulunmaktadır.



Şekil 5. 10 N yük ile yapılan aşınma testlerinde meydana gelen aşınma izi SEM görüntüleri: **a)** AISI 4140, **b)** CSP, **c)** SSP, **d)** PN, **e)** CSP aşınma izi EDS analizi, **f)** SSP aşınma izi EDS analizi.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde yapılan farklı işlemlerin aşınma dayanımına olan etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda AISI 4140 çeliği iki farklı şiddette bilyalı dövme ve plazma nitrürleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Uygulanan yüzey modifikasyonlarının malzeme yüzeyinde meydana getirdiği değişiklikler mikroyapı, mikrosertlik ve aşınma dayanımı açısından incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- XRD analizlerinde plazma nitrürlenmiş numunelerde Fe_3N , Fe_4N fazları tespit edilirken bilyalı dövülmüş numunelerde herhangi bir faz değişimi meydana gelmemiştir.
- Bilyalı dövülmüş numunelerde yüzeye yakın bölgelerde meydana gelen aşırı plastik deformasyon sebebiyle tane boyutu incelmeye meydan gelmiştir. Plazma nitrürleme işlemi sonucunda yüzeyde yaklaşık 5-6 µm kalınlığında bir nitrür tabakası oluşumu gözlemlenmiştir.

- Uygulanan yüzey işlemleri ile AISI 4140 çeliğinin yüzey sertliğinde 3 kata varan artış tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değeri yaklaşık 700 HV_{0.2} ile plazma nitrürlenmiş numunede görülürken bilyalı dövme işlemleri ile yaklaşık 400 HV_{0.2} sertlik değerlerine ulaşılmıştır.
- Tüm aşınma yükleri altında en yüksek aşınma dayanımı plazma nitrüleme işlemi ile sağlanmıştır. Geleneksel bilyalı dövme uygulanan numunelerde aşınma testinde kullanılan yüke göre farklı sonuçlar elde edilmiştir. Düşük yüklerde bilyalı dövme işlemi aşınma kayıplarında artış meydana getirirken yükün artması ile birlikte bilyalı dövme işlemi aşınma dayanımına fayda sağlamıştır. Yüzeyde meydana gelen sertlik artışına rağmen bilyalı dövme işleminin beklenenden daha düşük fayda sağlaması yüzey pürüzlülüğüne atfedilmiştir. Aşırı bilyalı dövme işlemi ise tüm yükler altında daha düşük aşınma kayıpları sağlamıştır.
- En düşük sürtünme katsayısı işlem görmemiş numunede görülürken bunu aşırı bilyalı dövülmüş numune takip etmiştir. Bilyalı dövülmüş ve plazma nitrürlenmiş numuneler birbirine yakın oranlarda ve yüksek sürtünme katsayısı değerleri göstermiştir.
- İşlem görmemiş AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde aşınma testlerinden sonra oluklanma ve tekrar sıvanma gibi aşınma mekanizmaları belirlenmiştir. Ayrıca yüksek oranda deformasyon söz konusudur. Uygulanan işleme bağlı olarak yüzey dayanımında artış sağlanmış ve buna bağlı olarak aşınmış yüzey görüntülerinde çok daha az deformasyon olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2021-FEN-CY-005).

V. KAYNAKLAR

- [1] Z. Yang, J. Zheng, K. Zhan, C. Jiang, and V. Ji, "Surface characteristic and wear resistance of S960 high-strength steel after shot peening combing with ultrasonic sprayed graphene oxide coating," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 18, pp. 978–989, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.02.124.
- [2] H. Yan, P. Zhu, Z. Chen, H. Zhang, Y. Zhang, and Y. Zhang, "Effect of shot peening on the surface properties and wear behavior of heavy-duty-axle gear steels," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 17, pp. 22–32, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.12.126.
- [3] Y. B. Bozkurt, H. Kovacı, A. F. Yetim, and A. Çelik, "Tribocorrosion properties and mechanism of a shot peened AISI 4140 low-alloy steel," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 440, no. April, p. 128444, 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128444.
- [4] H. Xiao *et al.*, "Promoted low-temperature plasma nitriding for improving wear performance of arc-deposited ceramic coatings on Ti6Al4V alloy via shot peening pretreatment," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 19, pp. 2981–2990, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.06.067.
- [5] J. Wang, S. Qu, H. Shao, X. Hu, B. Guo, and X. Li, "Ultra-high fatigue property and fracture mechanism of modified 20CrMoH steel by gas carburizing technology combined with shot peening treatment," *Int. J. Fatigue*, vol. 165, no. May, p. 107221, 2022, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107221.
- [6] J. Zheng *et al.*, "Surface characteristic and corrosion resistance of different plasma-sprayed coatings (Zn, Al6061 and Zn/23Al) on S960 high strength steel with subsequent micro-shot peening," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 451, no. July, p. 129046, 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.129046.
- [7] X. Han, Z. Zhang, B. Wang, S. J. Thrush, G. C. Barber, and F. Qiu, "Microstructures, compressive residual stress, friction behavior, and wear mechanism of quenched and tempered shot peened medium carbon steel," *Wear*, vol. 488–489, no. 5988, p. 204131, 2022, doi: 10.1016/j.wear.2021.204131.
- [8] M. Neslušán *et al.*, "Barkhausen noise emission of AISI 304 stainless steel originating from strain induced martensite by shot peening," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 20, pp. 748–762, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.07.107.
- [9] T. Gundgire, T. Jokiaho, S. Santa-aho, T. Rautio, A. Järvenpää, and M. Vippola, "Comparative study of additively manufactured and reference 316 L stainless steel samples – Effect of severe shot peening on microstructure and residual stresses," *Mater. Charact.*, vol. 191, no. July, 2022, doi: 10.1016/j.matchar.2022.112162.
- [10] Y. Zhang, K. Zhang, Z. Hu, T. Chen, L. Susmel, and B. Wei, "The synergetic effects of shot peening and laser-shot peening on the microstructural evolution and fatigue performance of a medium carbon steel," *Int. J. Fatigue*, vol. 166, no. July 2022, p. 107246, 2023, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107246.

- [11] H. Liu, C. Jiang, M. Chen, L. Wang, and V. Ji, "Surface layer microstructures and wear properties modifications of Mg-8Gd-3Y alloy treated by shot peening," *Mater. Charact.*, vol. 158, no. June, p. 109952, 2019, doi: 10.1016/j.matchar.2019.109952.
- [12] Z. Ma *et al.*, "Improving the oxidation resistance of SIMP steel to liquid Pb-Bi eutectic by shot peening treatments," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 578, no. July 2021, p. 151910, 2022, doi: 10.1016/j.apsusc.2021.151910.
- [13] S. Kikuchi, K. Minamizawa, J. Arakawa, H. Akebono, S. Takesue, and M. Hayakawa, "Combined effect of surface morphology and residual stress induced by fine particle and shot peening on the fatigue limit for carburized steels," *Int. J. Fatigue*, vol. 168, no. July 2022, p. 107441, 2023, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107441.
- [14] M. Ozturk, F. Husem, I. Karademir, E. Maleki, A. Amanov, and O. Unal, "Fatigue crack growth rate of AISI 4140 low alloy steel treated via shot peening and plasma nitriding," *Vacuum*, vol. 207, no. September 2022, p. 111552, 2023, doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111552.
- [15] T. Bergelt, P. Landgraf, T. Grund, G. Bräuer, and T. Lampke, "Modelling of layer development and nitrogen distribution on different microstructures during plasma nitriding," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 447, no. July, 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128813.
- [16] Q. Kang, H. Fan, X. Yang, X. An, and J. Hu, "Evolution of aluminum hydroxide film during plasma nitriding and its enhancement effect," *Mater. Lett.*, vol. 330, no. October 2022, p. 133348, 2023, doi: 10.1016/j.matlet.2022.133348.
- [17] M. Naeem *et al.*, "Improved wear resistance of AISI-1045 steel by hybrid treatment of plasma nitriding and post-oxidation," *Tribol. Int.*, vol. 175, no. June, pp. 3–13, 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2022.107869.
- [18] Z. Han *et al.*, "Composition, microstructure, and phase evolution of 17-4PH stainless steel with a work-hardened layer in the low-temperature plasma nitriding process," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 451, no. September, p. 128950, 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128950.
- [19] S. Qu, C. Duan, X. Hu, S. Jia, and X. Li, "Effect of shot peening on microstructure and contact fatigue crack growth mechanism of shaft steel," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 274, no. April, p. 125116, 2021, doi: 10.1016/j.matchemphys.2021.125116.
- [20] B. Podgornik and A. Kocijan, "Surface & Coatings Technology Improving the surface properties of additive-manufactured Inconel 625 by plasma nitriding," vol. 452, no. November 2022, pp. 16–19, 2023, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.129130.
- [21] A. G. Poshtahani, S. Roostaie, and M. Azadi, "Plasma nitriding effect on tribological and corrosion properties of Stellite 6 and 12 PTA weld clad hardfaced on stainless steel 410," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 11, no. February, p. 100108, 2023, doi: 10.1016/j.rsurfi.2023.100108.
- [22] I. F. Ostrovski *et al.*, "Effect of the plasma nitriding on the mechanical properties of the 18Ni300 steel obtained by selective laser melting," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 466, no. June, p. 129688, 2023, doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.129688.
- [23] T. Das, A. Erdogan, B. Kursuncu, E. Maleki, and O. Unal, "Effect of severe vibratory peening on microstructural and tribological properties of hot rolled AISI 1020 mild steel," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 403, p. 126383, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126383.
- [24] Y. Küçük, K. M. Döleker, M. S. Gök, S. Dal, Y. Altınay, and A. Erdoğan, "Microstructure, hardness and high temperature wear characteristics of boronized Monel 400," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 436, no. December 2021, 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128277.
- [25] A. Erdogan, B. Kursuncu, A. Günen, M. Kalkandelen, and M. S. Gok, "A new approach to sintering and boriding of steels 'Boro-sintering': Formation, microstructure and wear behaviors," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 386, p. 125482, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125482.
- [26] Y. Küçük, A. Erdoğan, B. Kurşuncu, and M. S. Gök, "Effects of surface roughness and counter body variables on the dry sliding wear behavior of AISI 4140 steel based on the elastoplastic flattening model," *Surf. Topogr. Metrol. Prop.*, vol. 11, no. 2, 2023, doi: 10.1088/2051-672X/accafe.