



Derleme / Review Paper

Dövme Kalıplarında Aşınma Mekanizmaları

Yaşar SERT^{1a*}, Mustafa YEŞİLYURT^{1b} Osman GÜNAYDIN^{1c}, Levent Taylan EMİR^{2d},
Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU^{1e}

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon/TÜRKİYE

²Egemet Ege Metal Dövme, Genel Merkez. İzmir/TÜRKİYE; yasarsert@ktu.edu.tr

Received/Geliş: 01.11.2020

Accepted/Kabul: 05.01.2021

Öz: Dövme yöntemi, tarihte bilinen en eski üretim yöntemlerinden biri olmakla birlikte günümüzde de imalat endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. 2019'da dünya geneline bakıldığında, dövme endüstrisinin gayri safi milli hasılaya etkisinin %20 olduğu görülmektedir. Dövme işleminin endüstriyel ekonomi, toplum ve ulusal güvenlik gibi kritik öneme sahip, yüksek mukavemet isteyen üretimi zorlu parçalar için kullanılan bir işlem olarak popülerliğini artıracığı öngörülmektedir. Dolayısıyla sektördeki firmaların imalat hatlarını, performanslarını ve ürün gamlarındaki kalitelerini geliştirmesi gerekmektedir. Dövme işleminde üretim performansını ve kalitesini etkileyen en önemli unsur ise dövme kalıplarında görülen hasarlardır. Literatür incelemelerinde dövme kalıplarındaki hasar sebeplerinin başında aşınmanın geldiği belirlenmiştir. Dolayısıyla kalıp malzemelerinin aşınma dayanımlarını geliştirmenin, sektör için elzem olduğu yadsınamaz bir gerçektir. Bu kapsamda geliştirilen en önemli yöntem malzeme yüzeylerinin sert bir tabaka ile kaplanması işlemidir. Özellikle Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) işlemi ile yüzeye kaplanan nitrür esaslı tabakaların, malzemelerin aşınma özelliklerine eşsiz katkılar sunduğu belirlenmiştir. Kaplanmış malzemenin aşınma performansı, laboratuvar ortamında üretimin çalışma prensibini yansıtacak şekilde aşınma düzenekleri kullanılarak belirlenmektedir. Ancak değerlendirmelerde, bu düzeneklerin dövme işlemini yansıtmada yetersiz kaldığı, dolayısıyla bulguların, mevcut işlem koşullarında değerlendirilmesinin uygun olmadığı düşünülmektedir. Bu doğrultuda, tespit edilen bu önemli eksikliğin giderilmesi amacıyla patent başvurusu da gerçekleştirilen, aşınma test cihazı tasarlanmış ve diğer düzeneklerin eksikliklerini nasıl gidereceği konusunda detaylı analiz verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dövme; imalat; dövme kalıbı; aşınma; PVD

Wear Mechanisms in Forging Dies

Abstract: Although the forging is one of the oldest production method in history, it is frequently used in the manufacturing industry today. Looking at the world in 2019, it is seen that the impact of the forging industry on the gross national product (gnp) was 20%. It is predicted that the forging will increase its popularity as a process that is used for demanding parts that require high strength and are critical to industrial economy, society and national security. Therefore, companies in the sector need to improve their production lines, performance and quality in the product ranges. The most important factor affecting the production performance and quality in the forging process is the damage seen in the forging dies. In the literature reviews, it was determined that the leading cause of damage in forging die was wear. Therefore, it is an undeniable fact that improving the wear resistance of die materials is essential for the forging industry. The most important method developed in this context is the process of covering the material surface with a hard layer. Particularly, it has been determined that the nitride-based layers coated on the surface using Physical Vapor Deposition (PVD) provide unique contributions to the wear properties of the materials. The wear performance of the coated material is determined by using wear mechanisms in a laboratory environment to reflect the working principle of production. However, in the evaluations, it is considered that these devices are insufficient to reflect the forging process, so it is considered inappropriate to evaluate the findings under the current process conditions. In this direction, in order to eliminate this important deficiency, a wear test device which a patent application was also made was designed and detailed analysis was given on how to eliminate the deficiencies of other mechanisms.

Keywords: Forging; production; forging die; wear; PVD

Bu makaleye atf yapmak için

Sert, Y., Yeşilyurt, M., Günaydin, O., Emir, L.T., Küçükömeroğlu, T., "Dövme Kalıplarında Aşınma Mekanizmaları" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8(1); 202-219.

How to cite this article

Sert, Y., Yeşilyurt, M., Günaydin, O., Emir, L.T., Küçükömeroğlu, T., "Wear Mechanisms in Forging Dies" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8(1); 202-219.

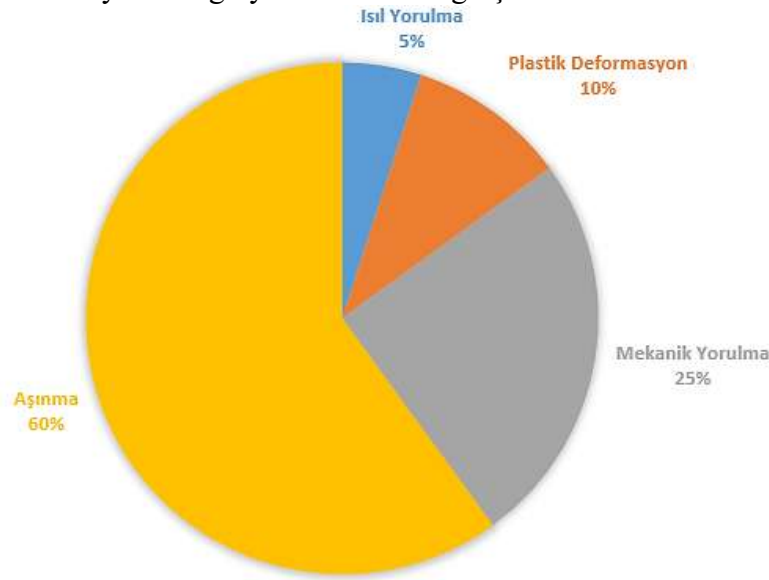
ORCID: ^a0000-0001-7742-0335-, ^b0000-0002-3667-6067, ^c0000-0001-5228-9879, ^d0000-0003-1169-4581, ^e0000-0002-4392-9966

1. Giriş

Metal üretim ve şekillendirme endüstrisinde en eski üretim tekniklerinden bir olan dövme işlemi günümüzde dünyada ve ülkemizde endüstriyel uygulamalarda çok önemli bir yer tutmaktadır [1-5]. Dövme işlemi temel olarak, basma kuvvetlerinin etkisi ile malzemenin kalıcı olarak şekil değiştirmesi işlemidir [6, 7]. Dövme işleminde şekillendirilecek parçaya uygulanan baskı kuvveti pres veya şahmerdan çekiç vasıtasıyla elde edilmektedir [8]. Dövme işlemi uygulanan iş parçasının sıcaklık mertebesine göre sıcak, ılık ve soğuk olarak gerçekleştirilmektedir [9, 10]. Şekillendirilmek istenen iş parçasının mutlak erime sıcaklığı T_e ve şekil verme sıcaklığı ise T ile gösterilirse; T/T_e değerinin 0,3'ten küçük olduğu durumda işlem soğuk dövme olarak adlandırılmaktadır. Söz konusu işlemde iş parçasının şekillendirilebilmesi için yüksek mertebelerde kuvvetlere ihtiyaç duyulmaktadır [11]. Küçük ve orta ebatlı parçalar için kullanılan bu yöntemde elde edilen çıktının tolerans hassasiyeti ve yüzey pürüzlülük değeri diğer yöntemlere göre daha üstündür [12]. T/T_e değerinin 0,3 ile 0,5 arası olması durumunda işlem ılık dövme olarak tanımlanmaktadır. Söz konusu oranın 0,6'dan büyük olduğu durumlarda ise sıcak dövme işlemi kavramı karşımıza çıkmaktadır. Sıcak dövme işleminde diğer yöntemlere göre nispeten daha düşük kuvvetlere ihtiyaç duyulmaktadır [13, 14]. Ancak parça tolerans hassasiyeti daha düşüktür. Bu yöntem ile büyük ebatlı parçalar kolaylıkla şekillendirilebilmektedir. Dövme işlemi ile mukavemet ve tokluk değerleri yüksek parçalar imal edilebilmesinden dolayı özellikle yüksek mukavemet istenen birçok parça üretimi için bu yöntem ön plana çıkmaktadır.

Dövme endüstrisi dünya genelinde, kritik üretim segmentleri, metal tedarikçileri ve nihai tüketici endüstrileri arasında önemli bir bağlantı görevi görmektedir. Sektörün dünyadaki en önemli temsilcilerinden biri olan Amerika Birleşik Devletlerinin endüstriyel ekonomisi, toplumu ve ulusal güvenliği için çok önemli olan dövme işleminin gayri safi yurtiçi hasılasına etkisi %20 mertebelerindedir [15]. Özellikle 2020 yılında dövme işlemi, kritik öneme sahip ve üretimi zorlu parçalar için üstün kalite ve performans sağlayan, aynı zamanda uygun maliyetli bir işlem olarak tercih edilebilirliğini artırması öngörülmüştür. Bu nedenle, ülkelerin dövme endüstrileri arasında, malzeme geliştirme ve kullanımı, enerji yönetimi ve verimliliği, çevresel sorumluluk ve insan kaynaklarının etkin kullanımı açısından dünyada lider konumda bulunmak amacıyla büyük bir rekabet söz konusudur. Ülkemizde ise dövme işlemi ile gerçekleştirilen üretimin öneminin T.C. Kalkınma Bakanlığı On Birinci Kalkınma Planı'nda (2019-2023) Ana Metal Sanayii Çalışma Grubu Raporunda da aktarıldığı üzere teknolojinin olgunlaşmaya ve yeni uygulama alanlarına genişlemeye devam etmesiyle birlikte ülkemizde özellikle dövme işleminin karlılığının süreç içerisinde etkilenmeye başlayacağı öngörülmektedir [16]. Bakanlığın çalışmasıyla aktarılan bu öngöründe belirtilen 4 yıllık süreç içerisinde dövme ile üretime olan talebin artacağı, buna bağlı olarak sektördeki firmaların piyasa şartlarına tutunabilmeleri ve yurt dışı pazarında söz sahibi olabilmeleri adına imalat hattını, performansını ve üretim yelpazelerindeki kaliteyi artırmaları gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda, dövme endüstrisindeki şirketler, tedarikçiler, üniversiteler ve devlet laboratuvarları arasında gerçekleştirilecek olan iş birlikleri ve ortak çabalar, dövme endüstrisinin ileri teknolojisinin geliştirilmesinde ve uygulanmasındaki yerini en üst düzeye çıkarmasını sağlayacak olan en önemli etken olacaktır. Söz konusu iş birliklerinde, dövme işlem performansının geliştirilmesi, çevreye ve insan sağlığına zararlı dış yağlayıcı kullanımının azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve üretim maliyetinin düşürülmesi gibi hususlar üzerine çalışmalar yoğunlaştırılmalıdır. Bahsi geçen hususlar dövme işleminin gerçekleştirilmesinde ve imal edilen çıktının kalitesine etkiyen en önemli faktör olan dövme kalıplarını işaret etmektedir. Yapılan incelemelerde ve özellikle ülkemizdeki sektör temsilcileriyle gerçekleştirilen görüşmeler neticesinde, dövme işleminde üretim hattında karşılaşılan en büyük problemin, üretilen parça geometrilerini ve yüzey kalitesini dolayısıyla istikrarı, ek bakım ve işçilik maliyetini de büyük oranda etkilemesinden dolayı kalıpların aşınması ve üretim performansı beklentinin aşağısında kalmasıdır [17-21]. Gerçekleştirilen araştırmalarda, sürtünme ve aşınmanın ülke ekonomilerine etkileri açıkça ortaya konmuştur [22-24]. Birbirleriyle temas halinde çalışan yüzeylerde meydana

gelen sürtünme ve aşınmaya olan ilginin ve malzemelerin aşınma performanslarını artırmaya yönelik çalışmaların günden güne artması çoğu görüşe göre dünya genelindeki ülkelerin gayri safi milli hasıllarını yaklaşık %1,6 kadar artıracaktır [23]. Yaşanılan kalıp aşınması kaynaklı sorunlar, ülkemizde dövme endüstrisini dış pazardaki rakiplerine göre kırılğan bir yapıya büründürmektedir. Dolayısıyla, konu hakkında gerçekleştirilmesi gereken ilk ve en önemli araştırma, endüstriyel uygulamalarda kullanılan dövme kalıplarında meydana gelen aşınma kaynaklı sorunların incelenmesi ve aşınma mekanizmalarının detaylandırılması üzerine olmalıdır. Aşınma mekanizmaları belirlenerek, kalıp aşınma performansının geliştirilmesi için alınacak önlemlerin ve bu kapsamda kalıplara uygulanacak işlemlerin daha sağlıklı ve bilimsel temelli olması sağlanacaktır. Birbirleriyle temas halinde çalışan makine elemanlarının aşınma performanslarını geliştirmek amacıyla kullanılan en yaygın yöntem yüzey kaplamadır [24-30]. Diğer bölümlerde detaylı olarak üzerinde durulacak olan yüzey kaplama teknikleri temel olarak gaz fazında, sıvı fazında ve ergimiş ya da yarı ergimiş fazda gerçekleştirilen kaplamalar olmak üzere 3 ana başlıkta uygulanmaktadır. Gerçekleştirilen araştırmalarda gaz fazında uygulanan kaplama işlemlerinin son yıllarda oldukça popüler olduğu ve malzemelerin aşınma performanslarına olağanüstü katkılar sunduğu belirlenmiştir [31-35]. Gaz fazında kaplama işlemleri arasında, plazma teknolojisinin de günden güne gelişmesiyle birlikte fiziksel buhar kaplama, kimyasal buhar kaplama teknikleri göz önündedir [36-40]. Kalıpların aşınma performanslarının geliştirilmesi üzerine oldukça öneme sahip bir diğer husus ise uygulanan yüzey işleminden sonra malzemenin aşınma özelliklerinin incelenmesidir. Belirlenen kaplama işlemi ile kaplanan kalıpların, endüstriyel olarak mevcut şartlarda kullanımından önce laboratuvarında dövme işlemini doğru bir şekilde yansıtabilecek şekilde aşınma testine tabii tutulması gerekmektedir. Bu nedenle ülkemizde özellikle son yıllarda teşvik edilen ve önemi artan Üniversite-Sanayi iş birliği çalışmalarının gerekliliği bu konu özelinde bir kez daha önemle vurgulanmaktadır. Bu iş birliğinin geliştirilmesi ve desteğin sağlanması, endüstriyel üretim gerçekleştiren firmaların dışa bağımlılığının azaltılmasında, karlılığın ve verimliliğin artırılmasında ve dolayısıyla yurtdışı pazarında kendine yer bulması veya mevcut yerini sağlama almasında oldukça önemli bir yer tuttuğu yadsınamaz bir gerçektir.



Şekil 1. Dövme kalıplarında karşılaşılan hasar türleri ve sıklıkları

Neticede, bu çalışmada yukarıda da öneminden detaylı olarak bahsedilen dövme kalıplarında meydana gelen aşınma, aşınmış kalıp görsellerinin literatür çalışmaları ile de desteklenerek bilimsel temelli olarak incelenmiş ve detaylandırılmıştır. Ardından aşınma mekanizmaları belirlenen kalıplarda, bu aşınmanın en aza indirgenmesi veya geciktirilmesi için uygulanabilecek yüzey işlemleri birbirleriyle kıyaslanarak ve gerçekleştirilen akademik çalışmalarla da desteklenerek sunulmuştur. Son olarak ise söz konusu yüzey işleminden sonra kaplanmış kalıp malzemesinin

laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilecek aşınma testleri ile ilgili detaylı bilgiler ve kendi tasarımı olan yenilikçi ve özgün darbeli kayma esasına dayanan aşınma test cihazının özellikleri ve avantajları vurgulanmıştır.

2. Dövme Kalıplarında Meydana Gelen Aşınma

Dövme kalıplarının tahrip olmasına ve atıl duruma gelmesine neden olan faktörlerin çoğunun yüzeyde meydana gelen hasarlardan kaynaklandığı yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır [17, 18]. Şekil 1’de görüldüğü üzere dövme kalıp malzemelerinde karşılaşılan en yaygın hasar çeşidinin aşınma olduğu belirlenmiştir [41]. Endüstriyel uygulamada kullanılan ve aşınma kaynaklı hasara uğramış dövme kalıpları Şekil 2 - Şekil 4.’de görülmektedir.

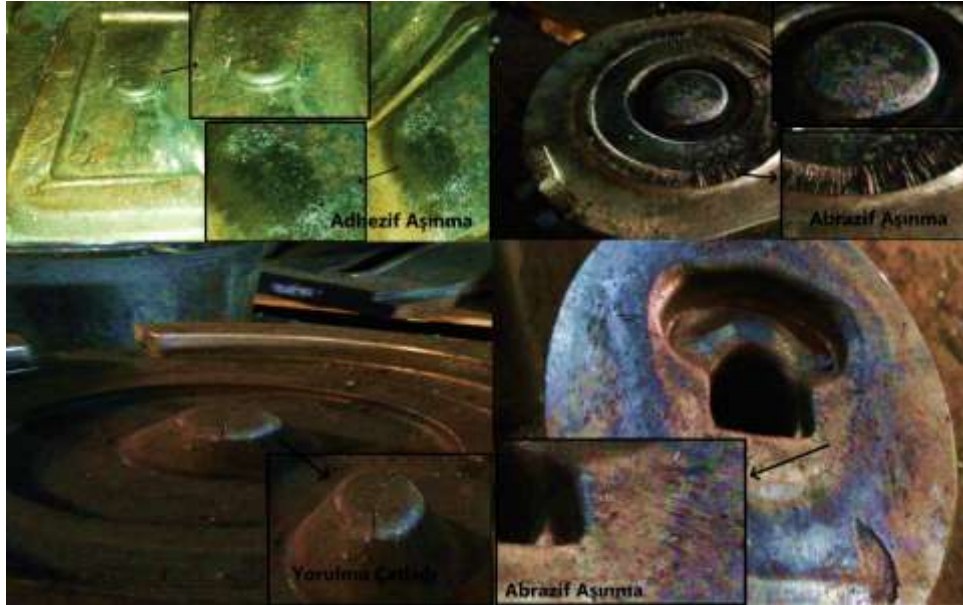


Şekil 2. Mevcut durumda kullanılan ve hasar görmüş kalıpların görüntüleri

Şekil 2’de de görüldüğü üzere kalıplarda görülen baskın aşınma mekanizması abrazif aşınmadır. Dövme parçasında pullanma nedeniyle kopan parçalar, kalıp yüzeyinde abrazif aşınmayı yoğunlaştırmaktadır [42]. Söz konusu abrazif aşınma birincil çatlakların ağı içerisinde malzeme akışı yönünde ilerleyen olukların oluşmasına yol açmaktadır. Kalıp yüzünde meydana gelen oluklar ise genellikle ikincil çatlak ağının dökülmesine neden olmaktadır. Söz konusu dökülme, kalıbın daha da zayıflamasına, karakteristik olarak dalgalı bir yüzeyin oluşmasına ve yüzeyin plastik deformasyonu ile birlikte nihayetinde çatlakların kapanmasına neden olmaktadır. Ayrıca literatürdeki çalışmalara bakıldığında dövme işlemi sırasında kalıplarda; termo-mekanik çatlama, abrazif ve adhezif aşınma gibi tüm aşınma mekanizmalarının, işlemin en başından itibaren aynı anda da meydana gelebileceği ve belirli koşullarda daha az veya yoğun olabileceği vurgulanmıştır [43]. Kalıplarda aşınma genel olarak, iş parçasının maruz kaldığı sıcaklık etkisinden dolayı yüzeyinin oksitlenmesiyle birlikte yüksek basınç altında kavite yüzeye göre daha yüksek hızda kaydığı zaman meydana gelmektedir. En çok rastlandığı bölge yüzeyi aşınmış kalıp görsellerinden de anlaşılacağı üzere dış bükey yüzeylerdedir [44]. Özellikle sıcak dövme uygulamalarında kalıp ile iş parçası arasında olan sınırlı boşluklarda kullanılan dış yağlayıcının yanmasıyla meydana gelen infilak, erozif aşınmaya neden olabilmektedir.



Şekil 3. Mevcut durumda kullanılan ve hasar görmüş kalıpların görüntüleri



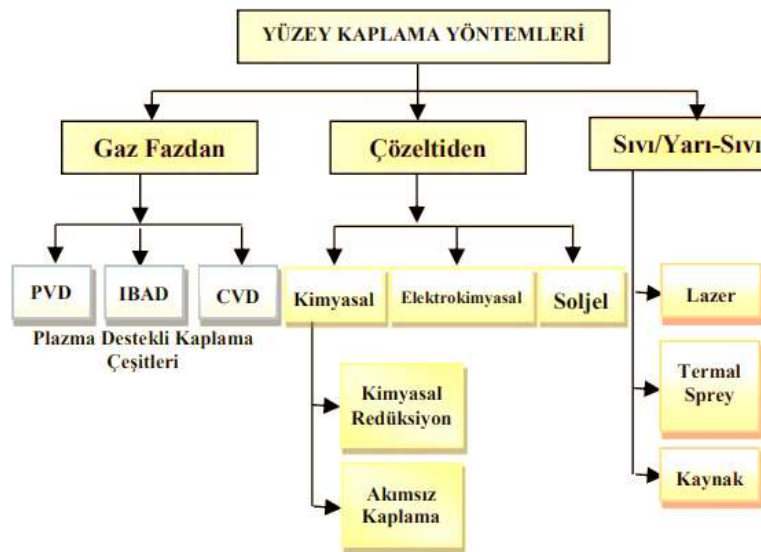
Şekil 4. Mevcut durumda kullanılan ve hasar görmüş kalıpların görüntüleri

Şekil 2 - Şekil 4'te verilen görsellerde sağ altta bulunan kalıplarda meydana gelen aşınma türü söz konusu dış yağlayıcıların işlem sırasında parlamasıyla kalıp yüzeyinde meydana gelen erozif aşınmaya örnektir. Dövme kalıpları, yüzeyinde büyük çatlakların oluşmasıyla da kullanılamaz hale gelebilmektedirler. Söz konusu aşınma türü, tek bir döngü sırasında veya en yaygın görüldüğü şekliyle birkaç döngüde de meydana gelebilmektedir. İkinci durumda, çatlak ilerlemesi ve yüzeyden parça kopması, yüksek gerilmeli yorulma mekanizması ile ilerlemektedir. Söz konusu aşınma mekanizması, darbe derecesinin daha büyük olması nedeniyle pres takımlarına göre çekiçli bloklarda daha sık rastlanmaktadır. Kalıplarda sık görülen bir diğer aşınma ise termal yorulma

çatlakları olarak adlandırılan aşınma tipidir [43]. Şekil 2’de üstte yer alan kalıplarda da görüldüğü üzere, bu tip aşınma, kalıp yüzeyinde bulunan oyukların dövme döngüleri sırasında aşırı sıcaklık değişiklerine maruz kalmasıyla meydana gelmektedir. Bu tür sıcaklık değişimleri, kalıp yüzeyinde düşük çevrimli yorulma mekanizması ile çatlama yol açan termal gerilmeler meydana getirmektedirler. Döngüler arasında kalıp yüzeyinin aşırı soğuması, kalıbın yetersiz ön ısıtılması, kalıp çeliği malzemesinin yanlış seçimi ve kalıba uygulanan ısıl işlemin başarısız olması gibi nedenler kalıp yüzeyindeki maksimum ve minimum sıcaklık arasındaki farkı artıracığından dolayı bu tür aşınma mekanizmasının görülme olasılığını yükseltmektedir. Kalıplarda meydana gelen bir diğer aşınma türü oksidatif aşınmadır [42]. Kalıp ile iş parçasının sürtünme alanlarında oksijenin adsorpsiyonu ve oksijenin plastik olarak deforme olmuş metalin mikro ölçekteki oyuklarına difüzyonu sonucu oluşan oksit tabakanın, işlem döngüsünün devamında yüzeyden kopması ile oluşan katı çözümlü filminin sürtünme altında bozulması kalıbı aşınmaya sürükleyen ana etkidir.

3. Yüzey Kaplama Teknikleri

Günümüzde birçok farklı uygulaması geliştirilen yüzey kaplama teknikleri farklı özelliklerdeki element atomlarının iş parçasına (altlık malzemesine) difüzyonu ile malzemenin sertlik, korozyon, oksitlenme dayanımı ve sürtünme-aşınma özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla malzemenin yüzey özelliklerinin değiştirilmesi esasına dayanmaktadır [45-47]. Özellikle son yıllarda gelişen teknoloji ve bilimsel gelişmeler sayesinde söz konusu teknikler, kaplama parametrelerinin kontrolüne de imkân sağlayan teçhizat donanımı ile birlikte plazma ortamında gerçekleştirilmektedir [48-50]. Yüzey kaplama teknikleri kaplama malzemesinin (hedef malzemenin) altlık malzemeye biriktirilmesi sırasında bulunduğu hale göre temel olarak Şekil 5’te gösterildiği gibi; gaz halden, çözümlüden, sıvı veya yarı sıvı halden olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilmektedir [51].



Şekil 5. Kaplama tekniklerinin sınıflandırılması

3.1. Sol-Jel Kaplama Tekniği

Şekil 5’te verilen sınıflandırmada çözümlüden kaplama yöntemlerinin en bilineni ve yaygın olarak kullanılanı sol-jel yöntemidir. Temel mantık olarak, Sol-jel işlemi bileşimin sıvı bir “sol” fazdan katı bir “jel” faza geçişini içermektedir [52]. Bu geçiş; sole, taşıyıcının belirli bir hızla daldırılması ve solden aynı hızla çıkarılması esasına dayanmaktadır. Yöntemde dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri daldırma sırasında alt tabakanın sarsıntısız ve oldukça düzgün hareketinin sağlanması gerekliliğidir. İnce ve başarılı bir kaplama tabakası, yüzey pürüzlülüğüne dikkat edilerek hazırlanmış düzgün bir yüzeye, alt tabakanın minimum titreşimine ve doğru hız

kontrolüne bağlı olmaktadır. Ek olarak kaplama işlem hızının düşük olması ve çok tabakalı olarak gerçekleştirilmek istenen kaplamalarda rastlanılan hatalar bu yöntemin başlıca dezavantajları olarak göze çarpmaktadır [53]. Bu teknik ile üretilen kaplamaların, gerçekleştirilen incelemeler neticesinde, anti bakteriyel özellik göstermeleri sayesinde endüstride biyomedikal alanında tercih edilmektedir.

3.2. Dolgu Kaynağı ile Kaplama

Dolgu kaynağı ile kaplama yöntemi, bir makine elemanının aşınmayı tetikleyici nitelikte olan bölgelerinin, oluşması muhtemel hasarlara karşı dayanıklı hale getirilmesi veya aşınma mekanizmalarının başlangıcının neden olduğu deforme olmuş bölgelerin kaynak ile örtülerek güçlendirilmesi amacıyla uygulanmaktadır [54]. Şekil 6'da dolgu kaynağı ile yüzeyi kaplanmış bir plaka görülmektedir. Her ne kadar kaynak yöntemi ile dolgu yapılmış veya kaplanmış elemanın aşınma veya hasara uğrama dayanımı iyileştirilmiş olsa da, kaplama yapılan elemanda boyutsal değişimler kabul edilebilir tolerans değerleri dışına çıkabilmektedir. Ayrıca kaynak esnasında kalıp yüzeylerinde termal değişimlerin bir sonucu olarak çarpılmalar meydana gelebilmektedir. Bu çarpılma etkisi ile birlikte kalıplarda ya da herhangi bir makine elemanında aşınma mekanizmalarını tetikleyecek faktörlerin oluşma riski de artmaktadır. Dolgu kaynağıyla kaplama yöntemi ile elde edilen yüzey tabakası, malzemenin aşınma dayanımı kabiliyetini artıran özelliklere sahip olsa da, yukarıda da bahsedildiği gibi plazma teknolojisinin gelişmesiyle birlikte endüstriyel olarak uygulanması yaygınlaşan fiziksel buhar kaplama ve kimyasal buhar kaplama yöntemlerinin gerisinde kalmıştır.



Şekil 6. Dolgu kaynağı ile kaplanmış bir plaka

3.3. Kimyasal Buhar Kaplama (CVD)

Kimyasal buhar kaplama işlemi, ısıtılmış bir malzeme yüzeyinin buhar fazındaki bir taşıyıcı gazın kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan katı bir tabaka ile kaplanması olarak tanımlanmaktadır [55]. İlk olarak reaktanların altlık yüzeyine difüzyon işlemi gerçekleşmektedir. Ardından yüzeye difüze olan reaktanlar ile kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. 2-4 saat süren bu işlemden sonra kaplama tabakasından gaz desorpsiyonu meydana gelerek, atık gazlar sistemden uzaklaştırılır. Yöntemde kaplama işlemi sıcaklığı, üretilmek istenen kaplama tabakasının türüne bağlı olarak değişmekle birlikte, 500-1100°C aralığında olmaktadır [56, 57]. Söz konusu yöntemde 10 µm'den daha ince kalınlıkta kaplama kalınlıkları elde edilebilmektedir. Özellikle tribolojik amaçlı kaplama

üretiminde üzerinde araştırmalar gerçekleştirilen ilk sistemlerden biri olan CVD, yöntemin yaygınlaşmasını engelleyen önemli dezavantajlara sahiptir. Bunlardan ilki çok bileşenli ve tabakalı kaplamaların bu yöntemle üretilmesinin oldukça zor olmasıdır. Ayrıca yüksek üretim maliyetleri nedeniyle de ticarileşme anlamında diğer buhar fazında kaplama tekniklerine göre ikinci planda kalmıştır. Kullanımını kısıtlayıcı en önemli unsur ise yüksek değerlerdeki çalışma sıcaklığına bağlı olarak her tür altlık malzemenin bu işlemle kaplanamamasıdır. İşlem sırasında meydana gelecek kimyasal reaksiyonların sağlanması için çıkılan yüksek sıcaklar, altlık malzemenin iç yapısında değişikliklere ve deformasyonlara neden olabilmektedir. Belirtilen kısıtlayıcı etkenler sebebiyle, özellikle tribolojik amaç güden kaplama uygulamalarında bilimsel ve endüstriyel çalışmalarda PVD yönteminin gerisinde kalmıştır.

3.4. Fiziksel Buhar Kaplama (PVD)

PVD tekniği vakum ortamında malzemenin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomların hedef malzemeden kopartılması ve kaplanacak olan malzeme yüzeyine atomsal olarak biriktirilmesi prensibine dayanmaktadır [58]. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir PVD cihazı Şekil 7’de görülmektedir. Yüksek sertlik ve aşınma dayanımı gereksiniminin olduğu makine imalat endüstrisinde geniş kullanım olanakları sağlayan bu teknik, tekli, çoklu ve dereceli tabakalar halinde biriktirilmeye olanak sağladığı için neredeyse her tür kaplama, her taban malzemesi üzerine biriktirilebilir. Bu yöntem uygulanarak taban malzeme sıcaklığı, kaplama kalınlığı, birikme hızı gibi kaplama özelliklerini etkileyen parametreler kontrol edilebilmektedir. Temel olarak PVD yöntemi, birikmenin sağlanmasında kullanılan mekanizma dikkate alındığında buharlaştırma ve sıçratma olarak 2 ana başlığa ayrılmaktadır.

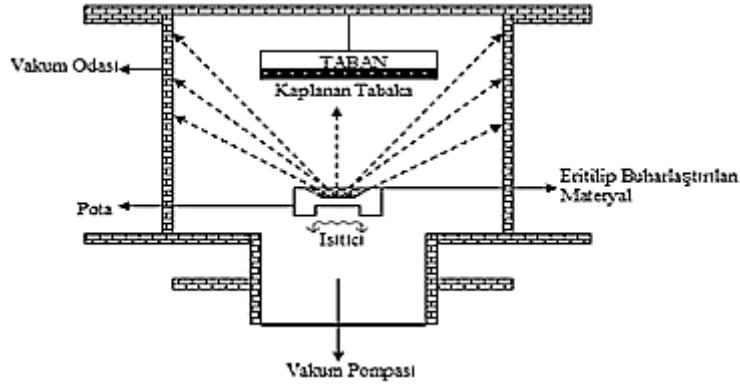


Şekil 7. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir PVD cihazı [59]

3.4.1. Buharlaştırma

Buharlaştırma tekniği kullanılarak gerçekleştirilen fiziksel kaplama şematığı Şekil 8’de verilmiştir. Bu yöntemde kaplanacak (hedef) malzeme, elektron bombardımanı, lazer veya elektrik arkı yolu ile buharlaştırılmaktadır. Buharlaştırma işlemi son yıllarda vakum teknolojisindeki gelişmelerin ışığında vakum ortamında gerçekleştirilmektedir. Vakum teknolojisinin kullanılmasındaki en önemli avantajlardan biri yüksek ısı girişi olmaksızın istenilen değerde kaplama akısı sağlanmasıdır. Vakum ortamının bir diğer avantajı ise hedef malzemeden buharlaştırılan atomlar altlık malzemeye enerjilerini kaybetmeden birikmelerini sağlamasıdır. Birikme mekanizması ise altlık malzeme yüzeyinde ilk çekirdekleşmenin oluşması ve işlem süresince gelişmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Buharlaştırma tekniği ile üretilen kaplamalarda buhar türlerinin düşük kinetik enerjilerinden dolayı, yapışma mukavemeti sorunu gözlenmiştir [60]. Bu olumsuz durumdan dolayı, tribolojik özelliklerin

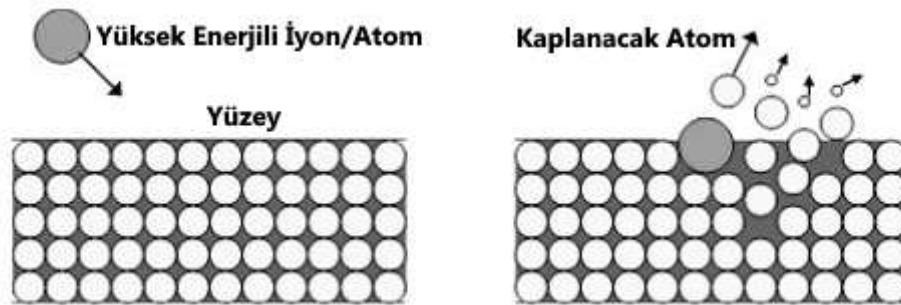
ön planda olduğu endüstriyel uygulamalar göz önünde bulundurulduğunda sıçratma tekniğine göre daha az tercih edilmektedir.



Şekil 8. Buharlaşma yöntemi şematığı

3.4.2. Sıçratma

Şekil 9'da şematığı verilen sıçratma ile fiziksel buhar biriktirme yöntemi esas olarak momentum transfer mekanizması doğrultusunda uygulanmaktadır. Bu yöntemde, buhar fazının elde edileceği hedef malzeme pozitif yüklü gaz iyonları ile bombardıman edilerek, yüzeyinden atom veya atom grupları kopartılmaktadır [60]. Kopartılan bu atomlar, oluşturulan plazma içerisinde buhar fazına geçmektedirler. Yüzeyi kaplanmak istenen altlık malzemeler, sıçratılmış atomların hareketi doğrultusundaki akışını kesecek şekilde sisteme yerleştirilmektedir. Buhar fazının taban malzeme yüzeyi üzerinde biriktirilmesi ile birlikte, fiziksel buhar kaplama işlemi gerçekleşmiş olmaktadır. Bu teknikte, yüzeye bir parçacık çarptığında ortaya çıkan etki, yüzeye çarpan parçacığın açısına, enerjisine, yüzeyde çarpışan parçacıkların kütlesine ve bağ enerjisine bağlı olmaktadır [58]. Buharlaştırma tekniği kullanılarak gerçekleştirilen biriktirme işleminde hedef malzemenin ergitilmesinden dolayı kaplamanın kimyasal oranında istenmeyen kayıplar oluşabilirken, bu durum sıçratmada, hedef malzeme atomlarının momentum transferiyle taban malzemeye biriktirilmesinden dolayı meydana gelmemektedir. Bu durum, sıçratma yönteminin buharlaştırmaya göre daha yaygın bir kullanıma sahip olmasının nedenlerinin başında gelmektedir. Sıçratma işleminde, ortamdaki sıçratılmış atomlar ile reaksiyona girmeyecek asal gaz iyonları kullanılmaktadır. Bu asal gazlardan en yaygın kullanılanı ise Ar^+ gazıdır.



Şekil 9. Sıçratma yöntemi şematığı

4. Literatür Araştırması

Literatür incelendiğinde, birbirleriyle temas halinde çalışan makine elemanlarının aşınma dayanımlarını geliştirmek amacıyla tek-çok katmanlı veya çok bileşenli PVD kaplama uygulamalarına rastlanmaktadır. Özellikle geçiş metal nitrürleriyle oluşturulan kaplamaların ön plana çıktığı araştırmalarda, TiN tabakası bu alanda ilk kullanılan kaplama olmasıyla dikkat

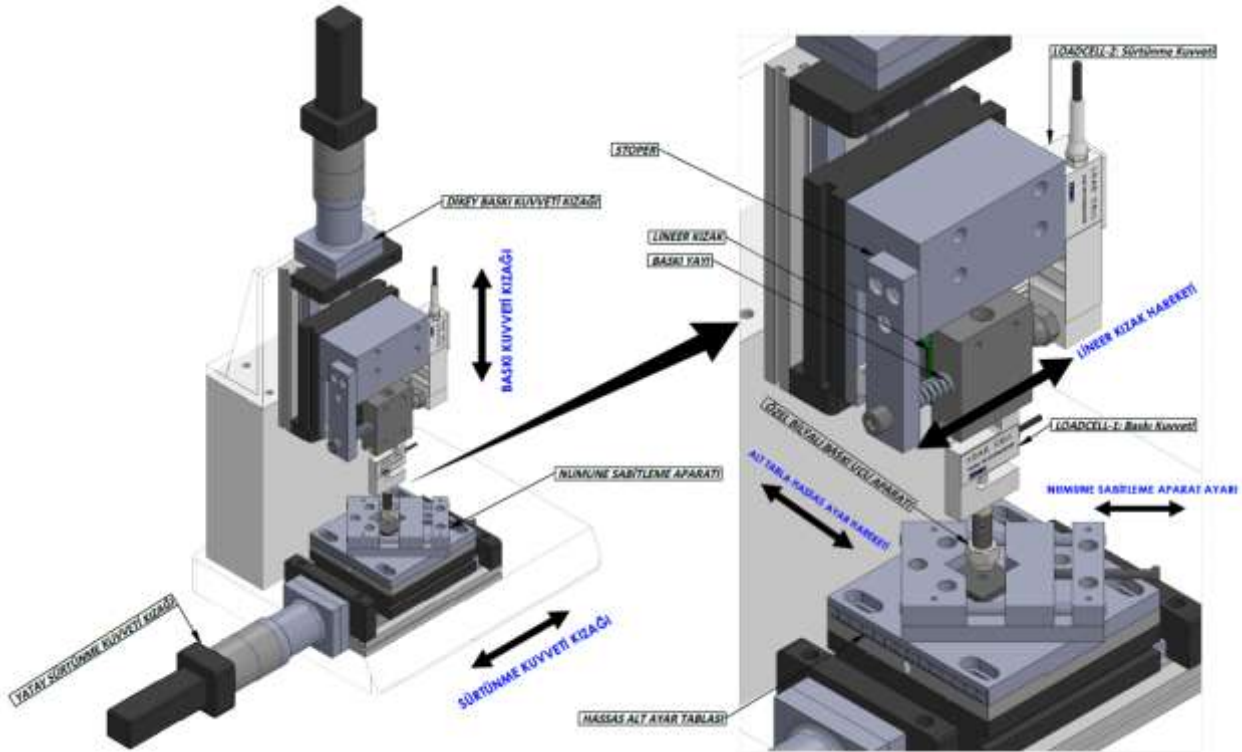
çekmektedir. Ghahramanzadeh Asl ve çalışma arkadaşlarının gerçekleştirdikleri çalışmada, ekstrüzyon ve dövme kalıplarında yaygın olarak kullanılan AISI H13 kalıp çeliğinin yüzeyine PVD yöntemi kullanılarak farklı kaplama parametreleri ile TiN tabakası kaplanmıştır. Bilye disk aşınma test cihazı ile gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde, TiN kaplama altlık malzemenin aşınma performansını yaklaşık 25 kat iyileştirmiştir [61]. Ayrıca söz konusu çalışmada, sertlikle aşınma dayanımı arasındaki doğrusal ilişkide vurgulanmıştır. Ancak özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında TiN kaplamaların beklenen performansı sergilemediği tespit edilmiştir. Bu nedenle TiN kaplamalara Al eklenerek oluşturulan üçlü TiAlN kaplamaların, yüksek sıcaklıkta oksitlenme dayanımını artırarak aşınma performansına katkı sağlaması düşünülmüştür. 2000'li yıllarda TiAlN kaplamalar endüstriyel pek çok uygulamada TiN kaplamaların yerini almışlardır. Bu kaplamalarda yüksek sertlik değerine sahip TiN fazı kaplamanın aşınma performansını artırırken, yumuşak faz olan AlN sürtünme katsayısının azalmasına katkı sağlamaktadır [62]. TiAlN kaplı makine elemanlarının imalat uygulamalarında yüksek bir performans sergilediği tespit edilmiştir. Bu performans TiN'e eklenen Al elementi sayesinde oluşan alüminyum oksit tabakasıyla ilişkilendirilmiştir. TiAlN kaplamalarda yüksek hızla çalışan imalat uygulamalarında, özellikle yüksek sıcaklıklarda kaplamanın yüzeyinde amorf bir alüminyum oksit tabakası oluşmakta, oluşan oksit tabaka kaplamanın daha fazla oksitlenmesini engellemektedir [63-65]. Söz konusu TiAlN kaplamaların, pek çok yüksek hızlı tornalama işleminde kullanılan takımların yüzeyinde amorf alüminyum oksit tabakası oluşturması sayesinde TiN ve TiCN kaplamalarından daha iyi performans sergiledikleri belirtilmiştir. Barshilia ve Hörling'in gerçekleştirmiş oldukları iki ayrı çalışmada, TiAlN kaplanmış matkap uçları ve endüstriyel kalıpların, kaplanmamış malzemelere göre yüksek aşınma dayanımı sergilediklerini vurgulamışlardır [66, 67]. Kaplamaların üretimi esnasında kullanılan azot akış oranının kaplama performansına etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, Azot gaz akışının artmasıyla TiAlN kaplamalarda tespit edilen kolonlu yapının küçüldüğü ve daha yoğun bir yapının elde edilmesiyle sertlik ve aşınma performansının geliştiği belirlenmiştir [68]. TiAlN kaplamalarda, Al içeriğinin kaplama özelliklerine etkisinin incelendiği bir çalışmada ise, Pemmasani ve arkadaşları TiAlN kaplamalarda artan Al oranının tabakanın sertliğini 24 GPa' dan 31 GPa değerine yükselttiğini rapor etmişlerdir [69]. Sertlikteki artışın sebebini ise Al atomlarının NaCl şeklindeki TiN kafes yapısında Ti atomlarının yerini alarak oluşturdukları katı çözelti, yapı içerisinde stokiyometrik olmayan fazları ve kusurları artırdığı kalıntı gerilmeler ve yapı içinde bulunan kübik TiAlN ve TiN fazlar ile ilişkilendirmiştir.

Dünyada nüfusun artması, bunun getirdiği ekonomik gereklilikler ve üretim ihtiyacı, imalat sanayisinde kullanılan makine elemanlarının servis ömürlerini geliştirmek için bilimsel çalışmaların artmasına neden olmuştur. Bu bağlamda, son yıllarda üçlü nitrür kaplamalara geçiş metallerinin eklenmesiyle oluşturulan dördü kaplamalar son derece popülerdir. Bu kaplamalar üzerine gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, TiAlN kaplamalara Si eklenmesiyle sertlik, termal kararlılık, korozyon ve aşınma performansı gibi özelliklerde çarpıcı iyileşmeler elde edildiği belirtilmiştir [70, 71]. Barshilia ve ekibinin gerçekleştirdiği bir araştırmada, yüksek hız çeliği matkaplara sıçratma temelli PVD yöntemiyle farklı parametreler kullanarak TiAlSiN tabakası kaplanmış ve bu kaplamalar mekanik ve delme testlerine tabi tutulmuşlardır [72]. Testler neticesinde numuneler üzerinde gerçekleştirilen incelemelerde, en yüksek sertlik değeri 38 GPa olarak %6,9 Si içeren kaplama tabakasında elde edilirken, kaplamalarda genel olarak 850°C'ye kadar herhangi bir faz dönüşümüne rastlanmadığı belirlenmiştir. Ti-6Al-4V alaşımının yüksek hızda işlenmesinde, TiAlSiN dördü kaplamaların, takımın servis ömrünü TiAlN tabakasına nazaran daha yüksek mertebelerde artırdığı ifade edilmiştir [71]. Literatür incelendiğinde, TiAlN kaplamalara son yıllarda eklenen bir diğer geçiş metali zirkonyumdur. Sert ve çalışma arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir çalışmada, dövme kalıplarında da yaygın bir şekilde kullanılan AISI H13 kalıp çeliği yüzeyine kaplanan TiAlZrN kaplamalar sayesinde, malzeme sertliğinin çarpıcı bir şekilde arttığı, aşınma dayanımının ise taban malzemeye göre yaklaşık 10 kat iyileştiği belirlenmiştir [73].

Yukarıda verilen çok sayıda çalışmada da görüldüğü üzere, çeşitli taban malzemeler üzerine kaplanan ikili, üçlü ve dördü kaplamalar sertlik ve aşınma performansı açısından oldukça çarpıcı katkılar sunmuşlardır. Ancak söz konusu kaplama uygulamalarında, dövme kalıplarının aşınma performansını, dolayısıyla servis ömrünü geliştirmek amaçlı uygulamalar oldukça sınırlı kalarak üzerinde çalışma gerçekleştirilmesi gerekliliği bulunan bir araştırma konusu olmasıyla dikkat çekmiştir. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan herhangi bir makine elemanının kaplandıktan sonra laboratuvar ortamında gerçekleştirilen aşınma testlerinin, söz konusu elemanın çalıştığı endüstriyel uygulamanın birebir benzetimi ile gerçekleştirilmesi, sonuçların tutarlılığı hususunda oldukça önemlidir. Kesici takımlar, ekstrüzyon kalıpları gibi uygulamalarda kullanılan malzemelerin aşınma testlerinin geleneksel bilye ya da pim disk gibi düzenekler kullanılarak gerçekleştirilmesi makul bir durumdur. Ancak dövme uygulamalarında, dövme kalıbı ile iş parçası arasındaki izafi temas oldukça farklı bir mekanizmayla gerçekleşmektedir. Bu uygulamada, darbe etkisiyle birlikte kayma etkisi de görülmektedir. Dolayısıyla dövme kalıp malzemelerinin laboratuvar ölçekli aşınma testlerinde geleneksel kuru kayma esasına dayanan düzenekler uygun değildir. Bu doğrultuda, literatürde kullanılan aşınma test düzenekleri, kısıtları ve ekibimiz tarafından tasarlanan ve patent başvurusunda da bulunulan aşınma test düzeneği aşağıdaki bölümde detaylı olarak belirtilmiştir.

5. Dövme Kalıplarının Aşınma Özelliklerini Belirlemede Kullanılan Aşınma Test Cihazları

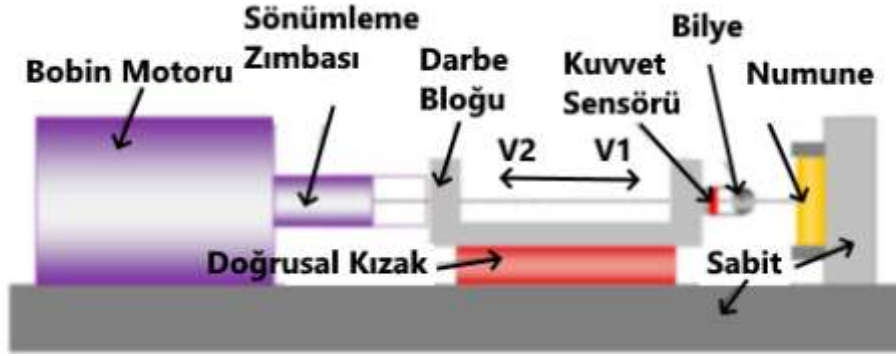
Dövme kalıplarında meydana gelen aşınmanın en aza indirgenmesi ve kalıpların servis ömürlerini artırmak amacıyla önerilen yüzey işlemleri uygulandıktan sonra, kalıpların doğrudan endüstriyel uygulamalarda kullanılmadan önce laboratuvar ortamında aşınma özelliklerinin belirlenmesi önemli bir gerekliliktir. Bu kapsamda kalıp malzemelerinin dövme işlemini doğru bir şekilde yansıtabilecek aşınma test cihazlarının üretilmesi bir diğer gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kapsamda ekibimiz tarafından tasarlanan özgün tasarıma sahip yenilikçi darbeli-kayma esasına dayanan aşınma test düzeneğinin tasarımı ve çalışma prensibi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Darbeli-kayma esasına dayanan özgün ve yenilikçi aşınma test cihazı tasarımı

Literatüre bakıldığında darbeli yüklere maruz kalan mekanik parçaların aşınma özelliklerinin belirlenebilmesi açısından farklı deney düzenekleri geliştirilmiştir. Aşağıda verilen düzeneklerin dövme işlemini temsil etmesi açısından tespit edilen eksiklikleri ve tarafımızca tasarlanan yenilikçi cihazın avantajları detaylarıyla görülmektedir.

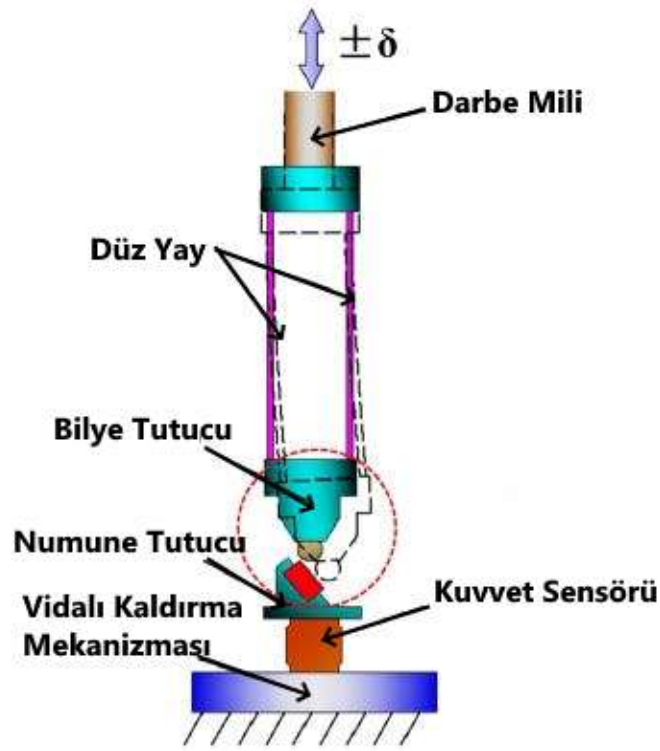
1. Cao ve çalışma arkadaşları, TiN/Ti çok tabakalı kaplamaların darbe etkisi altındaki aşınma davranışını belirlemek amacıyla Şekil 11’de görülen kinetik enerji kontrollü aşınma test cihazı kullanmışlardır [74].



Şekil 11. Kinetik enerji kontrollü darbeli aşınma test düzeneği

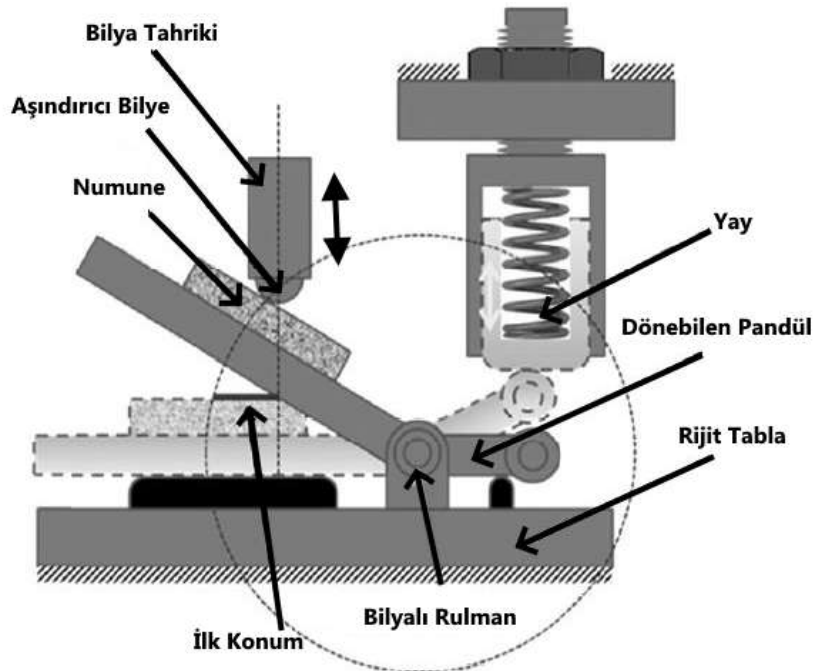
Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan aşınma test düzeneğinde kaplama numunelerinin darbeli aşınma davranışlarının incelenmesi mümkündür. Ancak burada dövme işleminde kalıpla parça arasında meydana gelen sürtünmeyi yansıtacak kayma hareketinin gerçekleştirilmesi olanaklar dâhilinde olmamaktadır. Ayrıca kullanılan bu cihazda yüklemelerin ve kuvvetlerin ölçülmesi ile ilgili bir sistem geliştirilmemiştir. Sistem çalışma esnasında rijit bir performans sergileyemeyeceği düşünülmektedir. Söz konusu cihazda tespit edilen eksiklikler ve kısıtların Şekil 10’da tasarımı verilen test düzeneğinde giderileceği ve dövme işleminin daha doğru bir şekilde yansıtılarak aşınma deneylerinin gerçekleştirileceği öngörülmektedir.

2. Tan ve arkadaşlarının CrN ve WC/C kaplamalarının darbeli kayma aşınma özelliklerini incelediği çalışmada Şekil 12’de verilen aşınma test düzeneği kullanılmıştır [75]. İlgili çalışmada kullanılan bu sistem sürtünme kuvvetinin hassas olarak ölçülmesi için kısıtlayıcı özelliklere sahiptir. Sistem sayesinde numune üzerinde elde edilecek aşınma şeklinde ve izinde sürtünme mesafesi boyunca farklılıklar oluşabileceği düşünülmektedir. Bu sistemde kuvvet oluşturmak için kullanılan dikey eleman, numune yüzeyine uygulanan baskı işleminin en son noktasında geri baskı oluşturacaktır ve bu esneme hareketi yüklemeye değerini düzensiz olarak etkilemektedir. Yüklemenin boşaltılması esnasında yine malzeme yüzeyine sürtünme sağlayarak bir ayrılma sergilemektedir. Uygulanan sistem değerlendirilmek istenen aşınma değerleri için kullanılabilir ancak tarafımızca gerçekleştirilecek olan çalışma için eksik yönleri vardır. Test için kullanılacak olan numune çeşitliliği kısıtlıdır, düzeneğe özel tek tip olmak zorunluluğu mevcuttur. Kendi tasarımı olan düzenekte ise numune yüklemeye ve teste tabi tutulmasına olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda sistemde darbe yüklemesi esnasında bir esneme oluşacaktır ve bu durum yüklemeye değerlerinde değişkenliğe sebep olacaktır. Numuneye uygulanan darbe yükü ve kayma esnasında meydana gelen sürtünme hareketinin dış (harici) etkilerden etkilenmemesi bir aşınma test düzeneğinde oldukça elzem görülen bir husustur.



Şekil 12. Darbeli kayma test düzeneği şematığı

3. Chen ve çalışma arkadaşlarının gerçekleştirdikleri bir çalışmada ise, DLC ve TiN kaplamaların darbeli kayma yükleri altında aşınma performansını, Şekil 13'te şematığı görülen test düzeneğini kullanarak belirlemişlerdir [76].



Şekil 13. Darbeli kayma esasına dayanan yay kontrollü test düzeneği

Çalışmada kullanılan test düzeneği, darbe-kayma testi esnasında numune ile karşı yüzey arasında meydana gelecek olan sürtünme katsayılarının belirlenebilmesi için uygun değildir. Çalışmaya

bakıldığında, sürtünme katsayı değerleri pim disk esaslı standart aşınma test düzeneği yardımıyla belirlenmiştir. Çalışma ekibimiz tarafından tasarlanan aşınma test düzeneğine yerleştirilen ikinci loadcell sayesinde, çalışmamızda kayma (sliding) hareketi esnasında sürtünme katsayısı ölçülebilecektir. İlgili görseldeki sistemde numune yüzeyine etki eden kuvvet, baskı süresince yayın sıkışması esnasında giderek değişkenlik gösterecektir. Sistemde numune yüzeyine uygulanacak olan baskı kuvveti lineer olmayacaktır ve bu sebeple de numune yüzeyinde oluşturulmak istenen aşınma izinde dış etkenlerin etkimesi kaçınılmaz olacaktır.

6. Sonuçlar

Dünyada ve ülkemizde imalat ve şekillendirmede kullanılan en yaygın yöntemlerden biri dövme işlemdir. Bu çalışmada, özellikle ülkemizde bu sektörde üretim yapan firmaların karlılığını artırması ve uluslararası rakipleri karşısında piyasa şartlarındaki yerini sağlamlaştırması amacıyla dövme uygulamalarında üretim maliyeti ve kalitesini etkileyen unsurların belirlenmesi ve alınabilecek önlemlerle ilgili elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Dövme uygulamalarında üretim maliyeti ve üretilen iş parçasının yüzeyel ve geometrik kalite standardını etkileyen en önemli faktörün dövme kalıplarındaki tatminkâr olmayan servis ömrü olduğu belirlenmiştir.
- Dövme kalıplarında karşılaşılan en yaygın hasar tipi aşınma kaynaklı meydana gelen hasarlardır.
- Dövme kalıplarında meydana gelen baskın aşınma mekanizması abrazif aşınmadır. Bununla birlikte karşılaşılan diğer aşınma mekanizmaları; adhezif aşınma, termomekanik yorulma aşınması, oksitlenme kaynaklı yüzeyden parça kopmasıdır.
- Dövme kalıplarının aşınma performansının geliştirilmesi amacıyla uygulanabilecek yöntemler arasında, sıçratma yolu ile PVD işlemi kullanılarak malzeme yüzeyinin ince sert bir tabaka ile kaplanması ön plana çıkmaktadır.
- Dövme kalıp malzemesinin yüzeyi ince sert bir tabaka ile kaplandıktan sonra, endüstriyel uygulamalarda kullanılmadan önce laboratuvar ölçekli aşınma testleri ile incelenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda gerçekleştirilecek olan aşınma testlerinin, geleneksel yöntemlerden ziyade kalıp ile iş parçası arasındaki izafi teması (darbeli-kayma) tam olarak yansıtabilen aşınma düzenekleri ile gerçekleştirilmesi oldukça önemli bir gerekliliktir.

Teşekkür

Bu çalışma 5190089 No'lu TÜBİTAK 1505-Üniversite-Sanayi İş Birliği kapsamında ve FSI-2019-8473 proje numarası ile Karadeniz Teknik Üniversitesi tarafından desteklenmektedir. TÜBİTAK ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1]. Chen, S., Qin, Y., Chen, J. G., Choy, C-M., “A forging Method for Reducing Process Steps in the Forming of Automotive Fasteners”, International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 137: 1-14.
- [2]. Hartley, P., Pillinger, I., “Numerical Simulation of the Forging Process”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195 (48-49): 6676-6690Demir, H., Güllü, A., Taşlamada Parametrelerin Etkisi, Pamukkale Üniv. Müh. Bilimleri Dergisi, 2001, 7 (2), 189-198.
- [3]. Castro, G., Fernandez-Vicente, A., Cid, J., “Influence of the Nitriding Time in the Wear Behaviour of an AISI H13 Steel During a Crankshaft Forging Process”, Wear, 2007, 263 (7-12): 1375-1385.

- [4]. Harandi, S. E., Idris, M. S., Jafari, H., “Effect of Forging Process on Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties of Biodegradable Mg–1Ca Alloy”, *Materials & Design*, 2011, 32 (5): 2596-2603.
- [5]. Han, X., Hua, L., “Comparison Between Cold Rotary Forging and Conventional Forging”, *Journal of Material Science and Technology*, 2009, 23: 2668-2678.
- [6]. Huang, S. H., Xing, H., Wang, G., “Intelligent Classification of the Drop Hammer Forming Process Method”, *Int J Adv Manuf Technol*, 2001, 18: 89-97.
- [7]. www.forging.org (Erişim Tarihi: 10.10.2020)
- [8]. Douglas, R., Kuhlmann, B., “Guidelines for Precision Hot Forging with Applications”, *J Mat. Proces. Tehnology*, 2000, 98: 182-188.
- [9]. Nagahama, T., Enomae, S., “Cold- and Warm-Forging Press Developments and Applications”, *J Mater. Process. Tehnology*, 1992, 35 (3-4): 415-427.
- [10]. Altan, T., Ngaile, G., Shen, G., “Cold and Hot Forging Fundamentals and Applications”, 1, Chang, Y-W., *Materials Park*, 44073-0002, Ohio, 2005.
- [11]. Bay, N., “The State of the Art in Cold Forging Lubrication” *J. Mater. Process. Tehnology*, 1994, 46 (1-2): 19-40.
- [12]. Zhang, Q., Felder, E., Bruschi, S., “Evaluation of friction Condition in Cold Forging by Using T-Shape Compression Test”, *J. Mater. Process. Tehnology*, 2009, 209 (17): 5720-5729.
- [13]. Doege, E., Bohnsack, R., “Closed Die Technologies for Hot Forging”, *J. Mater. Process. Tehnology*, 2000, 98 (2): 165-170.
- [14]. Panjan, P., Urankar, I., Navinsek, B., Tercelj, M., Turk, R., Cekada, M., M., Leskovsek, V., “Improvement of Hot Forging Tools with Duplex Treatment” *Surface and Coatings Technology*, 2002. 151-152: 505-509.
- [15]. <https://www.forging.org/producers-and-suppliers/technology/vision-of-the-future> (Erişim Tarihi: 10.10.2020)
- [16]. T.C. Kalkınma Bakanlığı On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), Ana Metal Sanayii Çalışma Grubu Raporu, Yayın No: KB: 3007, Ankara, 2018.
- [17]. Abachi, S., Akkök, M., Gökler, M. İ., “Wear Analysis of Hot Forging Dies”, *Tribology International*, 2010, 43 (1-2): 467-473.
- [18]. Kim, D. H., Lee, H. C., Kim, B. M., Kim, K. H., “Estimation of Die Service Life Against Plastic Deformation and Wear During Hot Forging Processes” *J. Mater. Process. Tehnology*, 2005, 166 (3): 373-380.
- [19]. Rajiev, R., Sadagopan, P., Prakash, R. S., “Study on Investigation of Hot Forging Die Wear Analysis – An Industrial Case Study”, *Materials Today Proceedings*, 2020, 27 (3): 2752-2757.
- [20]. Luo, S., Zhu, D., Hua, Lin, Qian, D., Yan, S., “Numerical Analysis of Die Wear Characteristics in Hot Forging of Titanium Alloy Turbine Blade” *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 123: 260-270.
- [21]. Han, X., Hua, L., “3D FE Modelling of Contact Pressure Response in Cold Rotary Forging”, *Tribology International*, 2013, 57: 115-123.
- [22]. Abdelgnei, M. A., Omar, M. Z., Ghazali, M. J., Mohammed, M. N., Rashid, B., “Dry Sliding Wear Behaviour of Thixoformed Al-5.7Si-2Cu-0.3 Mg Alloys at High Temperatures Using Taguchi Method”, *Wear*, 2020, 442-443: 203134.
- [23]. Ghazali, M. J., Rainforth, W. M., Jones, H., “The Wear of Wrought Aluminium Alloys Under Dry Sliding Conditions”, *Tribology International*, 2007, 40 (2): 160-169.
- [24]. Gates, B., *Road Ahead*, Penguin Books, USA, 1996.
- [25]. Aschauer, E., Riedl, H., Koller, C. M., Bolvardi, H., Arndt, M., P. Polcik, P., Maryhofer, P. H., “Adhesive Wear Formation on PVD Coated Tools Applied in hot Forming of AlSi Coated Steel Sheets” *Wear*, 2019, 430-431: 309-316.
- [26]. Kara, L., Gahramanzade Asl, H., Karadayı, Ö., “The Effect of TiN, TiAlN, CrAlN, and TiAlN/TiSiN Coatings on the Wear Properties of AISI H13 Steel at Room Temperature” *Surface Review and Letters*, 2019, 26 (9): 1-14.

- [27]. Kara, L., Özkan, D., Yağcı, M. B., Sulukan, E., Sert, Y., Sert, T. S., “Friction and Wear Behaviors of TiN Coatings under Dry and Vacuum Conditions”, *Tribology Transactions*, 2019, 62 (3): 362-373.
- [28]. Uçar, K., Şen, U., “Friction and Wear Properties of T6 Treatment and As-Plated Duplex NiP/NiB Coatings on Az91d Magnesium Alloy” *El-Cezer, Journal of Science and Engineering*, 2019, 6 (1): 31-42.
- [29]. Altuncu, E., Çil, G., Gel, M., “Spiral Kaynaklı Çelik Boruların Korozyona Karşı FBE Kaplamaların Test Ve Karakterizasyonu”, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2020, 7 (2): 679-689.
- [30]. Sert, Y., Küçükömeroğlu, T., Efeoğlu, İ., “Quantification of the Effects of Coating Parameters on the Properties of TiAlZrN Coatings”, *Brilliant Engineering*, 2020, 4: 1-8.
- [31]. Momeni, S., Tillmann, W., “Investigation of the Self-Healing Sliding Wear Characteristics of NiTi-Based PVD Coatings on Tool Steel”, *Wear*, 2016, 368-369: 53-59.
- [32]. Thakur, A., Gangopadhyay, S., “Influence of Tribological Properties on the Performance of Incoated, CVD and PVD Coated Tools in Machining of Incoloy 825”, *Tribology International*, 2016, 102: 198-212.
- [33]. Duminica, F.-D., Belchi, R., Libralesso, L., Mercier, D., “Investigation of Cr(N)/DLC Multilayer Coatings Elaborated by PVD for High Wear Resistance and Low Friction Applications”, *Surface and Coatings Technology*, 2018, 337: 396-403.
- [34]. Boing, D., Oliveira, A. J., Schroeter, R. B., “Limiting Conditions for Application of PVD (TiAlN) and CVD (TiCN/Al₂O₃/TiN) Coated Cemented Carbide Grades in the Turning of Hardened Steels”, 2018, 416-417: 54-61.
- [35]. Aninat, R., Valle, N., Chemin, J.-B., Duday, D., Michotte, C., Penoy, M., Bourgeois, L., Choquet, P., “Addition of Ta and Y in a Hard Ti-Al-N PVD Coating: Individual and Conjugated Effect on the Oxidation and Wear Properties”, *Corrosion Science*, 2019, 156: 171-180.
- [36]. He, Q., Paiva, J. M., Kohlscheen, J., Beake, B. D., Veldhuis, S. C., “An Integrative Approach to Coating/Carbide Substrate Design of CVD and PVD Coated Cutting Tools During the Machining of Austenitic Stainless Steel”, *Ceramics International*, 2020, 46 (4): 5149-5158.
- [37]. An, Q., Chen, J., Tao, Z., Ming, W., Chen, M., “Experimental Investigation on Tool Wear Characteristics of PVD and CVD Coatings During Face Milling of Ti-6242S and Ti-555 Titanium Alloys”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2020, 86: 105091.
- [38]. Koseki, S., Inoue, K., Morito, S., Ohba, T., Usuki, H., “Comparison of TiN-Coated Tools Using CVD and PVD Processes During Continuous Cutting of Ni-Based Superalloys”, *Surface and Coatings Technology*, 2015, 283: 353-363.
- [39]. Kıvak, T., “Optimization of Surface Roughness and Flank Wear Using the Taguchi Method in Milling of Hadfield Steel with PVD and CVD Coated Inserts”, *Measurement*, 2014, 50: 19-28.
- [40]. Pellizzari, M., “High Temperature Wear and Friction Behaviour of Nitrided, PVD-Duplex and CVD Coated Tool Steel Against 6082 Al Alloy”, *Wear*, 2011, 271 (9-10): 2089-2099.
- [41]. Terceelj, M., Panjan, P., Urankar, I., Fajfar, P., Turk, R., “A Newly Designed Laboratory Hot Forging Test for Evaluation of Coated Tool Wear Resistance”, *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200 (11): 3594-3604.
- [42]. Gronostajski, Z., Kaszuba, M., Widomski, P., Smolik, J., Ziemia, J., Hawryluk, M., “Analysis of Wear Mechanisms of Hot Forging Tools Protected with Hybrid Layers performed by Nitriding and PVD Coatings Deposition”, *Wear*, 2019, 420-421: 269-280.
- [43]. Gronostajski, Z., Kaszuba, M., Polak, S., Zwierzchowski, M., Niechajowicz, A., Hawryluk, M., “The Failure Mechanisms of Hot Forging Dies”, *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 657: 147-160.
- [44]. <https://www.uddeholm.com/en/applications/forging/> (Erişim Tarihi: 15.10.2020)

- [45]. Meng, J., Shi, X., Zhang, S., Wang, M., Xue, F., Liu, B., Cui, W., Bian, L., “Friction and Wear Properties of TiN-TiB₂-Ni Based Composite Coatings by Argon Arc Cladding Technology”, *Surface and Coatings Technology*, 2019, 374: 437-447.
- [46]. Bobzin, K., Zhao, L., Öte, M., Königstein, T., Novel Fe-Based Wear and Corrosion Resistant Coatings by Three-Cathode Plasma Technology, *Surface and Coatings Technology*, 2017, 318: 288-292.
- [47]. Gali, O. A., Shafiei, M., Hunter, J. A., Riahi, A. R., “The Tribological Behavior of PVD Coated Work Roll Surfaces During Rolling of Aluminum”, *Surface and Coatings Technology*, 2014, 260: 230-238.
- [48]. Bandapalli, C., Sutaria, B. M., Bhatt, D. V. P., Singh, K. K., “Tool Wear Analysis of Micro End Mills - Uncoated and PVD Coated TiAlN & AlTiN in High Speed Micro Milling of Titanium Alloy - Ti-0.3Mo-0.8Ni”, *Procedia CIRP*, 2018, 77: 626-629.
- [49]. Naskar, A., Chattopadhyay, A. K., Investigation on Flank Wear Mechanism of CVD and PVD Hard Coatings in High Speed Dry Turning of Low and High Carbon Steel, *Wear*, 2018, 396-397: 98-106.
- [50]. Skordaris, G., Bouzakis, K.-D., Charalampous, P., Kotsanis, T., Bouzakis, E., Bejjani, R., “Bias Voltage Effect on the Mechanical Properties, Adhesion and Milling Performance of PVD Films on Cemented Carbide Inserts”, *Wear*, 2018, 404-405: 50-61.
- [51]. Bunshatta R. F., “High Rate Physical Vapour Deposition Processes”, *Agard Lecture Series Material Coating Techniques*, Hardford House, London, No: 106, 1980, s:21-26.
- [52]. Jeffrey B.C., George, W., Scherer, “Sol-gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-gel Processing”, *Gulf Professional Publishing*, San Diego, 1990.
- [53]. Hasançebi, Ö., “Sol-gel Yöntemiyle Hazırlanan Bakır Oksit İnce Filmlerin Elektriksel, Yapısal ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [54]. İrizalp, S. G., Saklakoğlu, N., İldaş, G., Demirok, S., 1.2714 Çeliği Üzerine Sert Dolgu Kaynağı ile Kaplanmış Fe-Cr-V Esaslı Alaşımın Malzeme Özelliklerinin İncelenmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2018, 33 (1): 35-46.
- [55]. Wang, J.-B., Ren, Z., Hou, Y., Yan, X.-L., Liu, P.-Z., Zhang, H., Zhang, H.-X., Guo, J.-J., “A Review of Graphene Synthesis at Low Temperatures by CVD Methods”, *New Carbon Materials*, 2020, 35 (3): 193-208.
- [56]. Lee, H., Song, M. Y., Jurng, J., Park, Y.-K., “The Synthesis and Coating Process of TiO₂ Nanoparticles Using CVD Process”, *Powder Technology*, 2011, 214 (1): 64-68.
- [57]. Öncel, Ç., Yürüm, Y., “Carbon Nanotube Synthesis via the Catalytic CVD Method: A Review on the Effect of Reaction Parameters”, *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2006 14 (1): 17-37.
- [58]. Sert, Y., Nitrürlenmiş H13 Çeliği Yüzeyine Kaplanan TiAlZrN Tabakasının Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [59]. <https://www.titanit.com.tr/pvd-kaplama-teknolojimiz/> (Erişim Tarihi: 16.10.2020)
- [60]. Kara, L., Sıçratma Yöntemiyle Kompozit TiAlCrNbN Kaplı H13 Çeliğinin Yapısal ve Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [61]. Ghahramanzadeh Asl, H., Kara, L., Sert, Y., Sert, T. S., Küçükömeroğlu, T., “The Investigation of Wear Properties of TiN Coatings on the H13 Tool Steel Under Different Deposition Parameters”, *Engineering Sciences*, 2018, 13 (4): 316-323.
- [62]. Ramadoss, R., Kumar, N., Pandian, R., Dash, S., Ravindran, T. R., Arivuoli, D., Tyagi, A. K., “Tribological Properties and Deformation Mechanism of TiAlN Coating Sliding with Various Counterbodies”, *Tribology International*, 2013, 66: 143-149.
- [63]. Qi, Z. B., Sun, P., Zhu, F. P., Wu, Z. T., Liu, B., Wang, Z. C., Peng, D. L., Wu, C. H., “Relationship Between Tribological Properties and Oxidation Behavior of Ti_{0.34}Al_{0.66}N

- Coatings at Elevated Temperature up to 900°C”, *Surface and Coatings Technology*, 2013, 231: 267-272.
- [64]. Yao, S., Hung, S., Su, Y., Kao, W., “Effects of Aluminum Content on Oxidation Behavior of W-Al Nanolayer Coatings”, *Tribology Engineering*, 2015, 642: 130-134.
- [65]. Lin, J., Zhang, X., Ou, Y., Wei, R., “The Structure, Oxidation Resistance, Mechanical and Tribological Properties of CrTiAlN Coatings”, *Surface and Coatings Technology*, 2015, 277: 58–66.
- [66]. Barshilia, H. C., Yogesh, K., Rajam, K. S., “Deposition of TiAlN Coatings Using Reactive Bipolar-Pulsed Direct Current Unbalanced Magnetron Sputtering”, *Vacuum*, 2008, 83(2): 427-434.
- [67]. Hörling, A., Hultman, L., Odén, M., Sjöln, J., Karlsson, L., “Mechanical Properties and Machining Performance of Ti_{1-x}Al_xN-Coated Cutting Tools”, *Surface and Coatings Technology*, 2005, 191 (2–3): 384-392.
- [68]. Chakrabarti, K., Jeong, J. J., Hwang, S. K., Yoo, Y. C., Lee, C. M., “Effects of Nitrogen Flow Rates on the Growth Morphology of TiAlN Films Prepared by an Rf-Reactive Sputtering Technique”, *Thin Solid Films*, 2002, 406 (1–2): 159-163.
- [69]. Pemmasani, S. P., Valleti, K., Gundakaram, R. C., Rajulapati, K. V., Mantripragada, R., Koppoju, S., Joshi, S. V., “Effect of Microstructure and Phase Constitution on Mechanical Properties of Ti_{1-x}Al_xN Coatings”, *Applied Surface Science*, 2014, 313: 936-946.
- [70]. Chang, C.-L., Lee, J.-W., Tseng, M.-D., “Microstructure, Corrosion and Tribological Behaviors of TiAlSiN Coatings Deposited by Cathodic Arc Plasma Deposition”, *Thin Solid Films*, 2009, 517 (17): 5231-5236.
- [71]. Chang, Y.-Y., Lai, H.-M., “Wear Behavior and Cutting Performance of CrAlSiN and TiAlSiN Hard Coatings on Cemented Carbide Cutting Tools for Ti Alloys”, *Surface and Coatings Technology*, 2014, 259: 152-158.
- [72]. Barshilia, H. C., Ghosh, M., Shashidhara, Ramakrishna, R., Rajam, K. S., “Deposition and Characterization of TiAlSiN Nanocomposite Coatings Prepared by Reactive Pulsed Direct Current Unbalanced Magnetron Sputtering”, *Applied Surface Science*, 2010, 256 (21): 6420-6426.
- [73]. Sert Y, Küçükömeroğlu T, Efeoğlu İ., “Investigating the Structure, Adhesion and Tribological Properties of Al and Zr-doped TiN Coatings with Various Substrate Bias Voltage and Working Pressure”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, July 2020. doi:10.1177/1350650120940071.
- [74]. Cao, X., Xu, W., He, W., “A Method for Evaluating the Impact Wear Behavior of Multilayer TiN/Ti Coating”, *Coatings*, 2020, 10 (2): 132. <https://doi:10.3390/coatings10020132>
- [75]. Tan, D.-Q., Mo, J.-L., He, W.-F., Luo, J., Zhang, Q., Zhu, M.-H., Zhou, Z.-R., “Suitability of Laser Shock Peening to Impact-Sliding Wear in Different System Stiffnesses”, *Surface and Coatings Technology*, 2019, 358: 22-35.
- [76]. Chen, Y., Nie, X., Leyland, A., Housden, J., Matthews, A., “Substrate and Bonding Layer Effects on Performance of DLC and TiN Biomedical Coatings in Hank's Solution Under Cyclic Impact–Sliding Loads”, *Surface and Coatings Technology*, 2013, 237: 219-229.