

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KALIP MALZEMESİNE UYGULANAN ISIL İŞLEM VE YÜZEY
KAPLAMALARININ SAC ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİLERİ**

RABİA EDİS

KOCAELİ 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KALIP MALZEMESİNE UYGULANAN ISIL İŞLEM VE YÜZEY
KAPLAMALARININ SAC ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİLERİ

RABİA EDİS

Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Doç.Dr. Alpay Tamer ERTÜRK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr.Öğr. Üyesi Cihan KABOĞLU
Jüri Üyesi, Bursa Teknik Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 07.01.2022

Etik Beyan ve Araştırma Fonu Desteği

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☐ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☒ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler Ulus Metal Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından 2020-04 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Rabia Edis

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Rabia Edis

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sürecinde değerli fikirlerinden yararlandığım bana yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK Bey'e, deney çalışmalarında yardımlarından ve değerli fikirlerinden dolayı Doç. Dr. Alpay Tamer ERTÜRK Bey'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deney numunelerinin temin edilmesi, üretilmesi ve deneylerin gerçekleştirilmesi imkanını sunan Ulus Metal Sanayi ve Tic. A.Ş. Genel Müdürü sayın Ragıp TUNALILAR Bey'e, Genel Müdür Yardımcısı Ahmet Turan GÜVEN Bey'e, Ar-Ge Müdürümüz Makine Mühendisi Yiğit YURDAKUL Bey'e, çalışmamın her aşamasında destekçim olan ve yol gösteren Ar-Ge şefimiz Yüksek Mühendis Ömer Emre UÇAKKUŞ Bey'e, deney setinin tasarımı, üretimi ve testlerinde desteklerinden dolayı Yasin DOĞAN Bey'e, deney setinin üretimindeki desteği için Huda TURHAN Bey ve tüm kalıphane bölümü çalışanlarına, ekip arkadaşım Makine Yüksek Mühendisi Caner YALÇIN Bey'e ve simülasyon çalışmalarında destek veren Yavuz GÖKKUŞ Bey'e teşekkür ederim.

Deney numunelerinin kaplamalarının ve kaplamayla ilgili testlerin yapılmasıyla tezime katkılarından dolayı Titanit Ulta Sert PVD Kaplamalar San. Tic. Ltd. Şti. firmasından Dr. Mühendis Cenk TÜRKÜZ Bey'e ve Yüksek Mühendis Onur GÖZ Bey'e teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde destekçim olan babam Mehmet EDİS'e, annem Leyla EDİS'e, abim Ramazan EDİS'e ve bu süreçte fazla zaman ayıramadığım kardeşim Nisa Nur EDİS'e teşekkür ederim.

Ocak – 2022

Rabia EDİS

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. SAC METAL ŞEKİLLENDİRME.....	3
2.1. Derin Çekme.....	4
2.1.1. Derin Çekmeyi Etkileyen Parametreler	8
2.1.1.1. Kalıp Geometrisi.....	8
2.1.1.2. Pot Çemberi Baskısı	10
2.1.1.3. Malzeme Özellikleri	11
2.1.1.4. Sürtünme Kuvvetleri	11
3. KALIP MALZEMELERİ VE KALIPLARA YAPILAN İŞLEMLER.....	13
3.1. Takım Çelikleri.....	13
3.1.1. Takım çeliklerinin Sınıflandırılması.....	13
3.2. Isıl İşlemler.....	15
3.2.1. Östenitleştirme.....	16
3.2.2. Martenzit Oluşturma.....	16
3.2.3. Menevişleme.....	16
3.3. Yüzey İşlemleri.....	16
3.3.1. Nitrüleme.....	17
3.3.2. Kaplama.....	18
4. SÜRTÜNME VE AŞINMA	28
4.1. Sürtünme.....	29
4.2. Aşınma.....	30
4.2.1. Abratif Aşınma.....	31
4.2.2. Adhesif Aşınma	32
4.2.3. Tribokimyasal Aşınma	32
4.2.4. Yorulma Aşınması.....	33
4.3. Aşınma Test Düzenekleri	33
5. TASARIM, MALZEME VE YÖNTEM	35
5.1. Malzeme Seçimi	35
5.2. Isıl İşlem	36
5.3. Yüzey İşlem Uygulaması.....	37
5.4. PVD Kaplama.....	37
5.5. Deney Tasarımı, Simülasyonu ve Üretimi	38
5.6. Testler.....	42
5.6.1. Kaplama Adhezon Testi	42
5.6.2. Aşınma Testleri	43
5.6.3. Aşınma Yüzeyi İncelemesi.....	44
5.6.4. Derin Çekme Kalıp Yüzey Pürüzlülük Ölçümü	45

5.6.5. Kalınlık Ölçümü	45
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	46
6.1. Kaplamasız ve CrN Kaplamalı Numune Testleri	46
6.2. Kaplamalı Numune Test Sonuçları	49
6.3. Derin Çekme Simülasyon ve Deney Sonuçları	56
7. SONUÇLAR.....	75
KAYNAKLAR.....	77
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	84



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Sac metal şekillendirilmiş parçaların kullanımına dair örnekler	3
Şekil 2.2.	Derin çekme sonucu elde edilen parça örnekleri	5
Şekil 2.3.	Derin çekmeye etki eden kuvvetlerin gösterimi	5
Şekil 2.4.	Sac metallerin şekillendirme özelliklerini etkileyen faktörler	6
Şekil 2.5.	Tribolojik sistemin şematik gösterimi	6
Şekil 2.6.	Derin çekme şeması ve kontak tipinin gösterimi	7
Şekil 2.7.	Pot çemberi kuvvetinin kırışıklığa etkisi	10
Şekil 2.8.	Derin çekme kusurları a) flanşta kırışma b) duvar kırışması c) yırtılma d) kulaklanma e) yüzey çizikleri	12
Şekil 3.2.	Kullanılan malzeme faz durumuna göre kaplamaların sınıflandırılması	18
Şekil 3.3.	İşlem sıcaklığı ve malzeme kalınlığına göre kaplamaların kullanımı	19
Şekil 3.4.	PVD kaplama yapılmış uygulamalar	20
Şekil 3.5.	PVD kaplama teknikleri	21
Şekil 3.6.	Katodik ark biriktirme yöntemi	22
Şekil 3.7.	Kaplama ve taban malzeme özelliklerinin gösterimi	23
Şekil 3.8.	Tribolojik kaplamaların olası karmaşık yapıları	23
Şekil 3.9.	Rockwell C indentasyon testi hasar türü skalası	24
Şekil 3.10.	VDI 3198 indentasyon testine göre kabul edilebilir ve kabul edilemez hasar türlerinin şematik gösterimi	25
Şekil 4.1.	Takım malzemelerinde gerçekleşen hasar mekanizmaları	28
Şekil 4.2.	Aşınmış kalıp ve parça görseli	30
Şekil 4.3.	Abrazif aşınma şematik gösterimi	31
Şekil 4.4.	Adhesif aşınma şematik gösterimi	32
Şekil 4.5.	Aşınma test şemaları a) ball-on-plate b) block-on-ring c) block-on-plate d) ball-on-disk e) pin-on-disk	33
Şekil 5.1.	1.2379 malzeme kupon numuneler	36
Şekil 5.2.	Numunelerin şematik gösterimi	37
Şekil 5.3.	Deney seti kesit görüntüsü	38
Şekil 5.4.	Deney seti tasarımı	38
Şekil 5.5.	AutoForm test parametresi	39
Şekil 5.6.	AutoForm şekillendirme simülasyon sonuçları.....	39
Şekil 5.7.	AutoForm simülasyonu kalınlık dağılımı a) şekillendirme başlangıcı b) şekillendirme sonu	40
Şekil 5.8.	İmal edilen deney seti (açık)	41
Şekil 5.9.	a) İmal edilen deney seti (kapalı) b) pot plakası c) sac merkezleyici.....	41
Şekil 5.10.	Zimba ve dişi kalıp	42
Şekil 5.11.	Deneyisel çalışmada kullanılan UTS marka reciprocating tipi tribometre	43
Şekil 5.12.	Deneyisel çalışmada kullanılan Zeiss marka optik profilometre	44
Şekil 5.13.	Mutituyo SJ-210 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.....	45
Şekil 5.14.	Kalınlık ölçümü a) görüntü tarama cihazı b) program ekran görüntüsü	45
Şekil 6.1.	CrN kaplamalı numune indentasyon iz görüntüsü	46
Şekil 6.2.	Kaplamasız numune aşınma hacmi ölçümü	47

Şekil 6.3.	CrN kaplamalı numune aşınma hacmi ölçümü	47
Şekil 6.4.	Numunelerin aşınma hacimleri kıyaslaması.....	48
Şekil 6.5.	CrN ve kaplamasız kalıp aşınma mesafesine göre sürtünme katsayısı değişimi.....	48
Şekil 6.6.	Kaplamalı numune Rockwell-C indentasyon testi iz görüntüleri a)CrN b) CrTiN+Tribo	49
Şekil 6.7.	15 N Yükte abrazif aşınma izlerine ait optik profilometre iz ve kesit görüntüleri a)CrN b) CrTiN+Tribo	50
Şekil 6.8.	30 N Yükte abrazif aşınma izlerine ait optik profilometre iz ve kesit görüntüleri a)CrN b) CrTiN+Tribo	51
Şekil 6.9.	6 N Yükte adhesif aşınma izlerine ait optik profilometre iz ve kesit görüntüleri a)CrN b) CrTiN+Tribo	52
Şekil 6.10.	10 N Yükte adhesif aşınma izlerine ait optik profilometre iz ve kesit görüntüleri a)CrN b) CrTiN+Tribo	53
Şekil 6.11.	15N ve 30N yüklerde abrazif aşınma sonucu elde edilen aşınma iz hacimleri CrN ve CrTiN+Tribo kaplama	54
Şekil 6.12.	6N ve 10N yüklerde adhesif aşınma sonucu elde edilen aşınma iz hacimleri	55
Şekil 6.13.	Adhesif ve abrazif aşınma testi sürtünme katsayısı değişim grafikleri	56
Şekil 6.14.	Blank Wash ($\mu=0,2$) şekillendirilebilirlik ve kuvvet değeri sonuçları	57
Şekil 6.15.	Blank Wash ($\mu=0,2$) kalınlık değeri sonuçları	57
Şekil 6.16.	Mill Oil ($\mu=0,15$) şekillendirilebilirlik ve kuvvet değeri sonuçları.....	58
Şekil 6.17.	Mill Oil ($\mu=0,2$) kalınlık değeri sonuçları	58
Şekil 6.18.	PreLube ($\mu=0,1$) şekillendirilebilirlik ve kuvvet değeri sonuçları	59
Şekil 6.19.	Pre Lube ($\mu=0,2$) kalınlık değeri sonuçları	59
Şekil 6.20.	Simülasyon maksimum kuvvet değerleri	61
Şekil 6.21.	Yüzey pürüzlülük ölçümü yapılmış kaplamasız kalıplar	61
Şekil 6.22.	Deneyde kullanılan kalıplar a) kaplamasız b) CrN kaplama c) CrTiN+Tribo katmanlı kaplama	62
Şekil 6.23.	Kocaeli Üniversitesi çekme test cihazı derin çekme denemeleri kalıp a)açık hali b)kapalı hali	63
Şekil 6.24.	Derin çekme denemeleri sonucu üretilen parçalar	63
Şekil 6.25.	Deney sonucu elde edilen parçaların kesit görselleri	64
Şekil 6.26.	Simülasyon parçadaki inceltme ve kalınlaşmanın kademeli olarak gösterimi	64
Şekil 6.27.	Parça kalınlık ölçüm noktaları.....	65
Şekil 6.28.	Kalınlık ölçüm karşılaştırması	65
Şekil 6.29.	Simülasyon ve parça kesit kalınlık değişimleri	66
Şekil 6.30.	Minimum kalınlık değerleri	67
Şekil 6.31.	Maksimum kalınlık değerleri	67
Şekil 6.32.	Kaplamasız kalıp kuvvet-strok grafiği a)deney sonucu elde edilen grafik b) simülasyon sonucu elde edilen grafik.....	68
Şekil 6.33.	CrN kaplamalı kalıp kuvvet-strok grafiği	69
Şekil 6.34.	CrTiN+Tribo kaplamalı kalıp kuvvet-strok grafiği.....	70
Şekil 6.35.	Kuvvet- strok grafiği karşılaştırması	70
Şekil 6.36.	Maksimum çekme kuvveti karşılaştırma.....	71

Şekil 6.37.	Harcanan toplam enerji karşılaştırma	72
Şekil 6.38.	Maksimum kuvvet deney ve simülasyon sonuçları.....	72
Şekil 6.39.	Şekillendirme enerjisi sonuçları	73



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Soğuk iş takım çelikleri kompozisyon aralığı	14
Tablo 5.1. 1.2379 takım çeliği adlandırma	35
Tablo 5.2. 1.2379 takım çeliği kimyasal bileşimi (%)	35
Tablo 5.3. DD13 malzemesi kimyasal bileşimi (%)	36
Tablo 5.4. 1.2379 Soğuk iş takım çeliğine yapılan ısıt işlemleri.....	37
Tablo 5.5. Aşınma testi parametreleri	44
Tablo 6.1. Kaplama Özellikleri	49
Tablo 6.2. Simülasyon Sonuçları.....	60
Tablo 6.3. Yüzey kaplamasız ve kaplamalı kalıp yüzey pürüzlülük ölçümü	62



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A1	: Ötektoid sıcaklığı, (°C)
A3	: Ötektoid altı çeliklerde tam östenit alanına geçiş sıcaklığı, (°C)
C	: Karbon
Cr	: Krom
d	: Parça çapı (mm)
D _b	: Sac metal çapı (Açınım çapı) (mm)
D _{max}	: Sac malzeme çapı (mm)
F _N	: Normal yük (N)
F _S	: Sürtünme kuvveti (N)
h	: Parça yüksekliği (mm)
J	: Joule
kN	: Kilonewton
m	: Çekme oranı
mm	: Milimetre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
N	: Azot
P	: Fosfor
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (μm)
r _p	: Zımba yarıçapı (mm)
r _d	: Kalıp yarıçapı (mm)
P	: Fosfat
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
μ	: Sürtünme katsayısı
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
w _c	: Radyal boşluk
β	: Limit çekme oranı

Kısaltmalar

AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing Materials (Amerika Test Etme ve Malzeme Topluluğu)
B.Wash	: Blank Wash (Yağsız)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CVD	: Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
EDS	: Energy Dispersive Spectrometer (Enerji Dağılım Spektrometresi)
EN	: Europeane Norm (Avrupa Standardı)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Örgütü)
JIS	: Japanese Industrial Standart (Japon Endüstriyel Standart)
PVD	: Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopu)

KALIP MALZEMESİNE UYGULANAN ISIL İŞLEM VE YÜZEY KAPLAMALARININ SAC ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİLERİ

ÖZET

Sac metal şekillendirme prosesleri seri üretim şartlarına uygun olduğu ve hassas toleransta yüksek adetlerde ürün üretilebildiği için otomotivden uzay ve havacılık sektörüne kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Bu prosesler kesme, bükme, derin çekme, gererek şekillendirme ve hidroforming olarak sıralanabilmektedir.

Sac metal şekillendirme işlemi sac parçanın kalıp ile şekillendirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu işlem yapılırken kalıp ve sac parça arasında şekillendirme kuvvetleri neticesinde sürtünme kuvvetleri oluşmaktadır. Rölatif hareketler ve temas sonucunda yüksek üretim adetlerinde belirli bir süre sonra kalıp yüzeylerinde aşınmalar meydana gelmesi sonucu üretim performansı ve ürün kalitesini büyük oranda etkilemektedir. Özellikle derin çekme işlemine bakıldığında kalıplardaki yüksek şekillendirme kuvvetleri nedeniyle belli bir süre sonra aşınmanın gerçekleşmesi kaçınılmaz olmaktadır. Kalıpların performanslarının artırılarak işlem kalitesini yükseltmek ve aşınmayı engellemek için kalıp malzemesi seçimi, kalıp üzerinde yapılan her bir işlem (yüzey işleme, ısıl işlem, yüzey sertleştirme, kaplama) büyük öneme sahiptir.

Bu tez çalışması kapsamında sac metal şekillendirme proseslerinden derin çekme işlemine etki eden parametrelerin ve derin çekme kalıplarına yapılan işlemlerin performansına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Kalıpların mekanik ve yüzey özelliklerini büyük oranda etkileyen kaplamalar ele alınmıştır. 1.2379 soğuk iş takım çeliğine ısıl işlem ve yüzey işlemleri uygulandıktan sonra numune üzerine çeşitli kaplamalar yapılarak aşınma ve sürtünme performansları değerlendirilmiştir. Değerlendirmesi yapılan kaplamalar daha sonra derin çekme kalıplarına uygulanarak deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Derin Çekme, PVD Kaplama, Sac Metal Şekillendirme.

THE EFFECTS OF HEAT TREATMENTS AND SURFACE COATINGS APPLIED TO THE TOOL MATERIAL ON SHEET FORMING

ABSTRACT

Since sheet metal forming processes are suitable for mass production conditions and high numbers of products can be produced with precise tolerance, they are used in many areas from automotive to aerospace industry. These processes can be listed as cutting, bending, deep drawing, stretch forming and hydroforming.

The sheet metal forming process is based on the forming of the sheet metal part with a tool. During this process, friction forces occur between the tool and the sheet metal part as a result of the forming forces. Production performance and product quality are greatly affected as a result of wear on the tool surfaces after a certain period of time in high production quantities as a result of relative movements and contact. Especially when looking at the deep drawing process, it is inevitable that the wear will occur after a certain period of time due to the high forming forces in the dies. In order to increase the quality of the process by increasing the performance of the tools and to prevent wear, the choice of tool material, each operation on the tool (surface treatment, heat treatment, surface hardening, coating) is of great importance.

Within the scope of this thesis, it is aimed to examine the effects of the parameters affecting the deep drawing process, which is one of the sheet metal forming processes, and the effects of the processes made on the deep drawing dies on the performance. Coatings that greatly affect the mechanical and surface properties of the tools are discussed. After heat treatment and surface treatments were applied to 1.2379 cold work tool steel, various coatings were applied on the sample and its wear and friction performances were evaluated. The evaluated coatings were then applied to deep drawing tools and examined experimentally and numerically.

Keywords: Deep Drawing, PVD Coating, Sheet Metal Forming.

1. GİRİŞ

Sac metal şekillendirme yöntemleri endüstride yaygın olarak kullanılan yüksek adetlerde ürünün elde edilebildiği metal şekillendirme proseslerine dayanmaktadır. Yüksek adetlerdeki üretim ve şekillendirme kuvvetleri sonucunda kalıplarda aşınmalar meydana gelmektedir. Kalıpların optimum performansta kullanılabilmesi ve istenilen kalitede parçaların üretilmesi için prosese etki eden tüm parametreler incelenmesi gerekmektedir.

Yüksek adetlerde üretimin yanı sıra yeni geliştirilen yüksek mukavemet/ ağırlık oranlarına sahip malzemelerin endüstride kullanımının giderek yaygınlaşmasıyla birlikte prosese gelen yüklerin etkisiyle kalıp malzemeleri üzerinde oluşan artan basınç sonucunda kalıplar üzerindeki aşınmalar da giderek artmaktadır. Bu nedenle kesme ve şekillendirme kalıplarının maksimum performansta çalışarak aşınmanın engellenmesi ve kalıp ömrünün arttırılması için PVD kaplamaların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Şekillendirme kalıplarında kullanılan PVD kaplamalara CrN, DLC ve Ti bazlı ince sert kaplamalar örnek olarak verilebilir (Carlsson, 2005; Groover, 2010).

Sac metal şekillendirme proseslerine etki eden parametrelerin incelenmesi ve kaplamaların performansının ölçülmesi için tez çalışması kapsamında derin çekme kalıp üretimi gerçekleştirilmiş, çeşitli testler ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Tez çalışması kapsamında ilk olarak sac metal şekillendirme kalıplarında yaygın olarak kullanılan 1.2379 soğuk iş takım çeliği malzemelerine ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem sonrası polisaj işlemi yapılarak belirli bir yüzey pürüzlülüğü değerine getirilen numunelere geleneksel CrN kaplama ve derin çekme proseslerinde kullanılması için özel olarak Titanit Ultra Sert PVD Kaplamalar San. Tic. Ltd. Şti. tarafından geliştirilmiş çok katmanlı CrTiN+Tribo kaplama yapılmıştır. Kaplamasız ve kaplamalı numunler üzerinde aşınma ve kaplama adhezyon ölçümleri yapılarak performans değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir.

İkinci kısımda derin çekme işleminde kaplama performans değerlendirmelerinin yapılacağı derin çekme kalıp tasarımı Siemens Nx CAD programında yapılmıştır. Proses tasarımı yapılırken malzeme özellikleri, sürtünme katsayısı, pot çemberi kuvveti, çekme

hızı vb. derin çekmeye etki eden tüm parametreler dikkate alınarak sac şekillendirme simülasyonları AutoForm simülasyon programında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları dikkate alınarak kalıp imalatı gerçekleştirilmiştir. Kalıp tasarımı, sac şekillendirme simülasyonları, kalıp malzemelerinin temini ve işlenmesi Ulus Metal San. ve Tic. A.Ş. tarafından sağlanmıştır. Üretimi gerçekleştirilen laboratuvar ölçekli kalıbın derin çekme denemeleri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarında çekme cihazında bası modu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kaplamasız, geleneksel CrN kaplamalı, yeni nesil geliştirilmiş çok katmanlı CrTiN+Tribo PVD kaplamalı kalıplar kullanarak derin çekme işlemi gerçekleştirmiştir. Kaplama performansları incelenmiştir.



2. SAC METAL ŞEKİLLENDİRME

Günümüzde artan nüfus yoğunluğu ve talep nedeniyle üretim ihtiyacı sürekli artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için seri üretim koşullarına uygun malzeme kullanımı büyük önem arz etmektedir. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte birçok yeni malzeme türü ortaya çıkmasına rağmen düşük maliyetleri ve dayanıklılıklarından dolayı metaller seri üretimde yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir (Vierzigmann ve diğ., 2011). Metaller; döküm, talaşlı işlem, haddeleme vb. üretim ve işleme yöntemleriyle kütük ve sac gibi yarı mamüller ile bitmiş ürün haline gelmektedirler. Metallerin nihai ürün haline gelmesi için kullanılan üretim yöntemlerinden biri de sac metal şekillendirme yöntemidir (Masen, 2004). Bu yöntemle metallerin haddelemesi sonucu ortaya çıkan düz rulo veya plaka şeklindeki sacdan çeşitli özelliklerde karmaşık geometriye sahip bileşenler üretilmektedir (Filzek ve Groche, 2001).

Sac metal şekillendirme yöntemlerinin geçmiş yüzyıllardaki örneklerinden biri şövalyelerin zırhlarının üretilmesidir. Daha sonraki süreçlerde 18. ve 19. yüzyıllar arasında gıda sektörü için teneke kaplarının üretilmesiyle birlikte bu yöntem sürecini endüstriyel olarak devam ettirmiştir. Günümüzde sac metal şekillendirme beyaz eşya sektöründen iklimlendirme sektörüne, otomotiv sektöründen havacılık ve uzay sektörüne kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Masen, 2004; Zaid, 2016). Sac metal şekillendirme prosesleri sonucunda seri üretimde yüksek yüzey kalitesine sahip parçalar üretilmektedir (Vierzigmann ve diğ., 2011).



Şekil 2.1. Sac metal şekillendirilmiş parçaların kullanımına dair örnekler (Masen, 2004)

Sac metal şekillendirme kalınlığı 6 mm'nin altında olan metallerin plastik deformasyon mekanizması yardımıyla kalıcı şekil değişikliğine uğradığı bir prosestir. Bu yöntem genellikle oda sıcaklığında gerçekleştirilir (Chaudhari ve Patil, 2015; Gowtham ve diğ., 2012; Gürün, 2008). Genel uygulama olarak mekanik veya hidrolik preste kalıplar vasıtasıyla parça şekillendirilir (Yalçın, 2021).

Metal kalıpları üst ve alt yarıdan oluşur. Kalıp yarıları presin alt ve üst tablalarına bağlanır. Kalıp yarısının bir tarafında dişi (die, matris) diğer tarafında erkek (punch, zımba, ıstamp) bulunur. Alt kalıp yarısı sabit, üst kalıp yarısı hareketlidir. Sac metal iki kalıp arasına yerleştirilir. Pres yardımıyla saca baskı uygulanır ve dişi ile erkek kalıp arasında şekillendirme gerçekleştirilerek parça nihai formuna ulaşır. Parçanın formuna göre işlem birkaç adımda gerçekleşebilir (Yalçın, 2021).

Sac metal şekillendirme yöntemleri; kesme, bükme, gererek şekillendirme, hidroforming ve derin çekme olarak sınıflandırılabilir. Hidroforming yönteminde diğer yöntemlerden farklı olarak sacın şekillendirmesi sıvı basıncı sayesinde yapılmaktadır (Chaudhari ve Patil, 2015; Masen, 2004).

2.1. Derin Çekme

Derin çekme işlemi en yaygın kullanılan sac metal şekillendirme yöntemlerinden biridir (Bal, 2007; Chaudhari ve Patil, 2015; Masen, 2004; Özdilli ve Erdin, 2018). Derin çekme işlemi parçanın enine göre boyunun yüksek olduğu şekillendirme prosesine dayanmaktadır (Gowtham ve diğ., 2012). Bu işlem sırasında kalıp ve malzemeler üzerine yüksek kuvvetler etki etmektedir. İşlem sonunda temel olarak üç boyutlu silindirik, kutu veya konik şekillerle birlikte karışık geometriye sahip parçalar da elde edilebilmektedir (Dwivedi ve Agnihotri, 2017; Özdilli ve Erdin, 2018; Shah ve diğ., 2014; Yalçın, 2011).

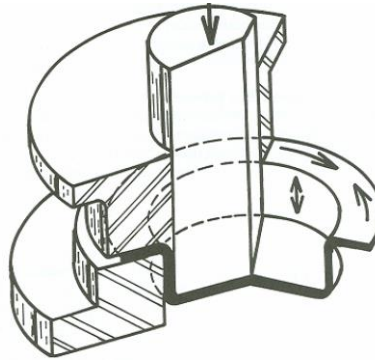
Örnek olarak araçların karoseri bölümündeki birçok kaporta parçası derin çekme ile üretilmektedir (Lestan ve diğ., 2012). Elde edilmek istenen parça formu sonucu önemli bir malzeme kaybı gerçekleşmediği için ekonomik bir yöntem olarak geçmektedir (Shah ve diğ., 2014).



Şekil 2.2. Derin çekme sonucu elde edilen parça örnekleri (Yıldız, 2017)

Derin çekme işlemi sac metal malzemenin zımba ve dişi kalıp vasıtasıyla malzemeye akma dayanımının üstünde bir kuvvet uygulanarak paçanın plastik şekil değiştirmesi işlemine dayanmaktadır. Etki eden plastik şekil değiştirme sonrası malzeme kalıcı olarak şekil değiştirmiş olur. Bu yöntemde amaç malzeme kalınlığını mümkün olduğunca az değiştirerek kaliteli ürün elde etmektedir. İşlem sırasında şekillendirme kuvveti ve kalıp üzerindeki baskıyı azalttığından dolayı düşük sürtünme kuvvetleri tavsiye edilir (Seshacharyulu ve diğ., 2018; Shah ve diğ., 2014; Zaid, 2016).

Derin çekilmiş parçanın kalitesi metal akışının düzgün şekilde yönlendirilmesine bağlıdır. Genellikle yaka kısmında malzeme kırışıklığının önlenmesi için pot çemberi kullanılır. Derin çekme işleminde parça şekillendirilirken birçok farklı gerilme türü malzemeye etki etmektedir (Şekil 2.3). Radyal çekme ve basma gerilmeleri, teğetsel gerilmeler bunlara örnek verilebilir. Parçaya etki eden farklı gerilmelerin olması ve homojen olmayan şekillendirme, derin çekme işleminin karmaşık olmasına yol açar ve işlem verimliliğini kontrol etmeyi zorlaştırır (Filzek ve Groche, 2001; Gowtham ve diğ., 2012; Özdilli ve Erdin, 2018; Seshacharyulu ve diğ., 2018; Shah ve diğ., 2014; Zaid, 2016).



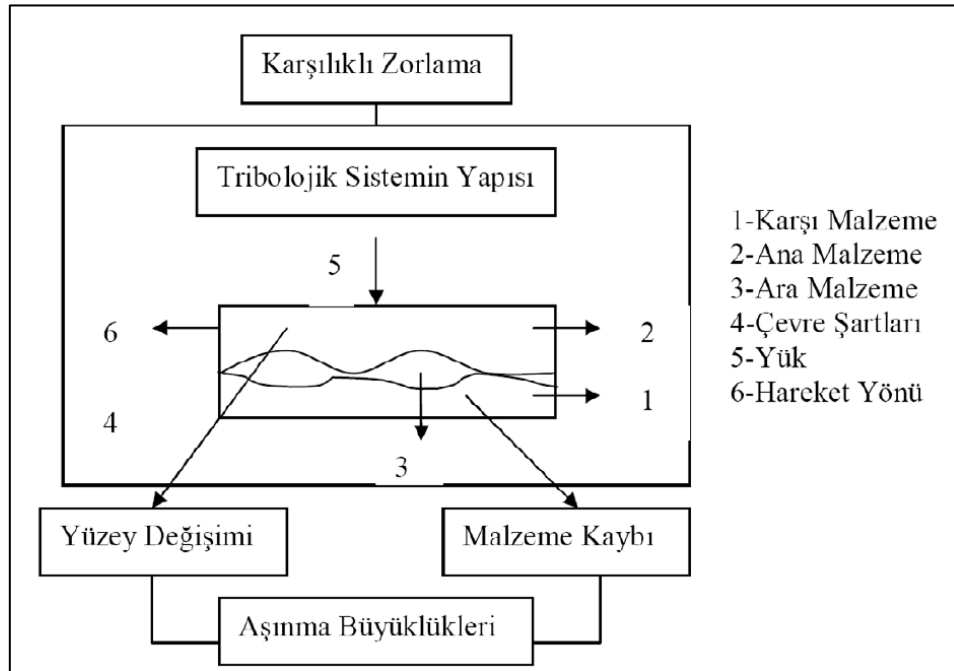
Şekil 2.3. Derin çekmeye etki eden kuvvetlerin gösterimi (Gürün, 2008)

Parça geometrisi gereği daha yüksek çekme derinliğine sahip parçalar birkaç adımda şekillendirilebilmektedir (Bal, 2007; Gowtham ve diğ., 2012; Shah ve diğ., 2014). Derin çekme prosesini etkileyen birçok parametre vardır (Şekil 2.4). Sürtünme, aşınma ve yağlamayı konu alan tribolojik koşullar, kalıp ve sac malzeme özellikleri, kalıp geometrisi, yüzey özellikleri (pürüzlülük, kaplama, yüzey işleme), ısıt işlemler, şekillendirme kuvvetleri, çekme hızı, basınç gibi birçok etken büyük oranda işlem kalitesini belirlemektedir (Masen, 2004; Seshacharyulu ve diğ., 2018).

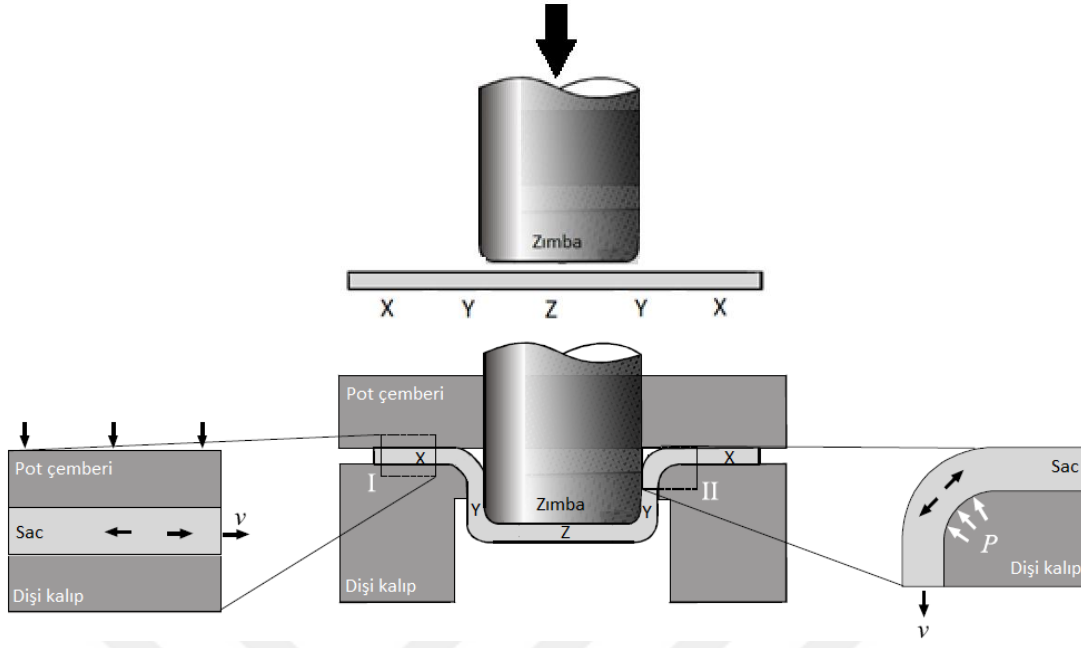


Şekil 2.4. Sac metallerin şekillendirme özelliklerini etkileyen faktörler (Carlsson, 2005)

Şekil 2.5'te tribolojik sistemin yapısı ve sac metallerin şekillendirme özelliklerini etkileyen sistem etmenleri sınıflandırılmıştır. Her bir etmenin şekil üzerinde gösterimi yapılmıştır.



Şekil 2.5. Tribolojik sistemin şematik gösterimi (Yılmaz, 2013)



Şekil 2.6. Derin çekme şeması ve kontak tipinin gösterimi (Carlsson, 2005)

Derin çekme prosesi en iyi silindirik kap çekme ile açıklanabilir (Zein ve diğ., 2013). Şekil 2.6'da silindirik kap derin çekme yöntemi gösterilmektedir. Silindirik kap derin çekme yönteminde başlangıçta sac kalıba yerleştirilir. İlk işlem olarak üst kalıp inmeye başlar ve zimba saca temas eder (z bölgesi). Bu aşamada sac dişi kalıp, zimba (erkek kalıp) ve pot çemberiyle temas halindedir (x, y, z bölgesi). Çekme işlemi devam ettiğinde zimba sacı radyal olarak dişi kalıp boşluğuna doğru iter. Bu sırada saca temas eden pot çemberi, baskı kuvveti vasıtasıyla sacın kenarlarından tutmaktadır (x, flanş/şekillendirme bölgesi). Zimba çekme işlemine devam ettiğinde sac metal malzemenin kalıp içerisine doğru akışı gerçekleşir. Pot çemberi ve sac malzeme arasında kayma ve basma gerilimi, sac malzemede radyal çekme gerilimi oluşur. Pot çemberi kuvveti fazla olması durumunda parça büküm noktasından yırtılabilmektedir. Kuvvet az olduğunda ise malzeme akışı homojen olamayacağından flanş bölgesinde kalınlaşma gerçekleşerek parçada kırışıklığına neden olmaktadır. Çekme işlemi devam ederken sac malzeme zimba radiusunun temas ettiği bölgeden bükülmeye başlar (y, büküm ve kuvvet geçiş bölgesi) ve bu kısımda sac kalınlığında incelme gerçekleşir. Son aşamada parça dişi kalıp içerisindeki son noktasına gelerek pot baskısından kurtulur ve sac metal nihai şeklini almış olur (Carlsson, 2005; C. Yalçın, 2021; S. Yalçın ve Kaftanoğlu, 2011; Dwivedi ve Agnihotri, 2017; Gowtham ve diğ., 2012).

2.1.1. Derin Çekmeyi Etkileyen Parametreler

Derin çekmeyi büyük oranda etkileyen 4 adet faktör vardır. Bunlar:

- Kalıp geometrisi
- Pot çemberi baskısı
- Sürtünme
- Malzeme özellikleri (Gowtham ve diğ., 2012; Özdilli ve Erdin, 2018)

2.1.1.1. Kalıp Geometrisi

Derin çekme işlemi parçaların şekillendirilmesi kalıplar vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Şekillendirilecek malzeme dişi ve zımba arasındaki geometrik yapıyla nihai formuna ulaşmaktadır. Kalıp üzerine gelen yükler daha çok malzemeyi yarıçap geçiş kısımlarında etkilemektedir. Kalıp yarıçaplarının büyük veya küçük olmasına göre malzemenin akışı etkilenecek hasarlar oluşabilmektedir (Zaid, 2016; Bal, 2007). Çekme yarıçapı çok büyük olduğunda sac malzeme pot çemberinden çok kısa sürede bırakılması sonucunda kırışma oluşacaktır. Çekme çapı küçük olduğunda ise malzeme akışı engellenerek incelmeye veya yırtılmaya sebebiyet verecektir (Shah ve diğ., 2014; Joshi ve diğ., 2013).

Takım geometrisi temel olarak 3 bileşenle anlatılır:

- Kalıp Yarıçapı (rd)
- Zımba Yarıçapı (rp)
- Radyal boşluk (wc)

Radyal boşluk zımba ve kalıp yarıçapları arasındaki farktır (aralarındaki boşluk). Derin çekmede malzeme kalınlığı ve malzeme özelliklerine göre radyal boşluk belirlenmelidir (Zein ve diğ., 2013).

Kalıp tasarımı yapılırken dairesel malzeme çapı ve zımba çapının etkili olduğu bir limit çekme oranı vardır (1.1). Bu oran;

$$\beta = \frac{D_{max}}{d} = \frac{1}{m} \quad (1.1)$$

D_{max} : Sac malzeme çapı

d: Derin çekilmiş parçanın ortalama çapı (zımba çapı)

m: çekme oranı

şeklindedir. Kalıp tasarımı bu oran dikkate alınarak yapılmalıdır. Aksi taktirde parçada istenmeyen sonuçlarla karşılaşabilmektedir. Dairesel malzeme yarıçapı arttıkça çekme işleminde daha yüksek zımba kuvvetleri gerekmektedir (Bal, 2007; Boljanovic, 2004; Zaid, 2016).

Basit silindirik parçalarda çekme yüksekliğinin belirlenmesi ve kaç kademede ürünün elde edilebileceğinin bulunması için aşağıda verilen Denklem 1.2 kullanılır. (Gürün, 2008; Yıldız, 2017).

$$h = \frac{D_b^2 - d^2}{4d} \quad (1.2)$$

olarak geçmektedir.

Burada;

D_b : sac metal çapı (blank) (mm)

h: çekme derinliği (mm)

d: parçanın ortalama çapı (mm) ifadeleri kullanılır.

Derin çekmede proses parametrelerinin optimizasyonu için gerçekleştirilmiş bir çalışmada (Joshi ve diğ., 2013) malzeme geçişinin sağlandığı kalıp boşluğunun (radyal boşluk) büyük olması sonucunda malzemede yırtılma gerçekleştiği, pot baskısı kuvvetinin sürtünmeyi artırıcı yönde etki ederek zımba kuvvetini arttırdığı ve düşük zımba yarıçaplarında malzemede yırtılma gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Malzeme yırtılmasının önlenmesi ve çekme yükünün azaltılması için kalıp yarıçaplarının optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Kalıp yarıçapının derin çekme işlemine etkilerinin simülasyon programı kullanarak incelendiği bir çalışmada (Gowtham ve diğ., 2012) kalıp yarıçapı küçüldükçe çekme

kuvvetinin artması gerektiği ve artan çekme kuvvetleri nedeniyle parça duvarlarında gerilme izlerinin olduğu gözlemlenmiştir.

2.1.1.2. Pot Çemberi Baskısı

Derin çekmede parçanın kalitesi malzeme akışından büyük ölçüde etkilenmektedir. İşlem boyunca pot çemberi ve sac malzeme arasındaki sürtünme ve baskı kuvvetleri sayesinde malzeme akışının düzgün olması sağlanır (Bal, 2007; Shah ve diğ., 2014). İstenilen ürün kalitesini elde edebilmek için optimum pot çemberi baskı kuvvetiyle parça şekillendirmelidir. Çalışmalar incelendiğinde düşük pot çemberi kuvvetlerinde malzemede buruşma gerçekleştiği görülmektedir. Pot çemberi kuvvetleri yüksek olduğunda yüksek sürtünme kuvvetleri nedeniyle zımba yükü artmakta ve parçada yırtılma meydana gelmektedir (Özdilli ve Erdin, 2018; Shah ve diğ., 2014).

Şekilde 2.7.'de pot çemberi kuvvetinin yetersiz kaldığı durumda malzemede oluşan kırışıklık görülmektedir.



Şekil 2.7. Pot çemberi kuvvetinin kırışıklığa etkisi (Joshi ve diğ., 2013)

Derin çekme prosesinin incelendiği bir çalışmada (Krupal ve diğ., 2014) derin çekme proses parametrelerinin parçalarda oluşan kusurlara etkilerini gözlemlemişlerdir. Daha düşük pot çemberi kuvvetinin kırışmaya neden olduğu belirlenmiştir (Shah ve diğ., 2014). Serhat Yalçın ve Bilgin Kaftanoğlu yaptıkları çalışmada 4 ayrı kalınlık değerinde, izotropik ve anizotropik özellikte sac malzemelerin farklı pot çemberi kuvvetleri vasıtasıyla derin çekme prosesini simüle ederek buruşma miktarlarını incelemişlerdir. Derin çekmede malzeme çapı ve kalınlığının artmasıyla buruşmanın azaldığı görülmüştür (Yalçın ve Kaftanoğlu, 2011).

2.1.1.3. Malzeme Özellikleri

Malzeme derin çekme işlemindeki ana elemandır. Malzemenin mekanik özellikleri çekme işlemini büyük ölçüde etkilemektedir. İstenilen kalitede parçayı üretebilmek için uygun malzeme seçilmelidir (Dwivedi ve Agnihotri, 2017). Süneklik ve akma dayanımı şekillendirme için malzemenin önemli özelliklerindendir. Çekme işleminin daha kolay gerçekleşmesi için yüksek süneklik, düşük akma değerine sahip malzeme kullanılarak yırtılmanın önüne geçmek hedeflenir (Shah ve diğ., 2014). Malzeme özelliklerinin kalıp tasarımında da büyük etkisi vardır. Yüksek mukavemete sahip malzemeler kullanıldığında daha yüksek çekme kuvvetleri gerekmektedir. Yüksek kuvvetler altında kalıplarda aşınma daha hızlı meydana gelmekte ve kalıp hasar görmektedir (Hedrick, 2016). Yüksek mukavemete sahip malzemelerde geri yaylanma etkileri daha çok olduğu için kalıp tasarımı buna göre yapılmalıdır (Lestan ve diğ., 2012).

2.1.1.4. Sürtünme Kuvvetleri

Malzeme şekillendirmesinin sağlanması için kalıp ve sac arasında belirli bir sürtünme kuvvetine ihtiyaç vardır. Sürtünme kuvvet değerleri düşük olduğunda malzeme istenildiği gibi şekillendirilememektedir. Yüksek sürtünme kuvvetlerinde ise prosese etki eden yükler yüksek ise kalıp ve malzeme aşınması meydana gelerek ürün kalitesi olumsuz etkilenmekte ve kalıpta arızalar meydana gelerek bakım maliyetleri ortaya çıkmaktadır. Prosesin maksimum verimde gerçekleştirilmesi için optimum sürtünme kuvvetlerini sağlayacak yöntemler uygulanmalıdır (kaplama, yüzey işlemleri, yağlayıcılar).

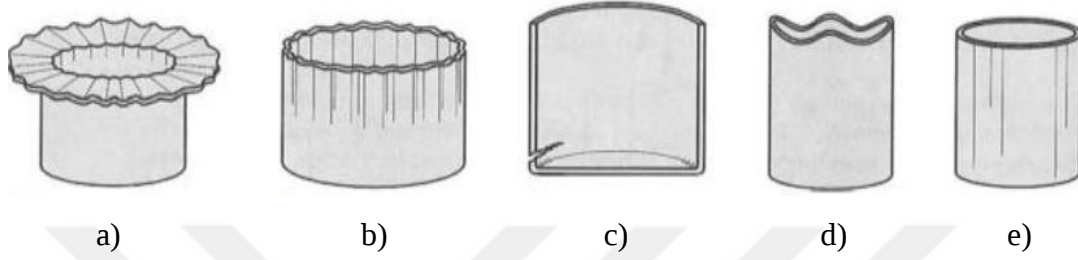
Üç farklı noktada sürtünme kuvvetleri etkilidir:

- Sac malzeme ve pot çemberi arasındaki sürtünme kuvveti
- Sac malzeme ve kalıp arasındaki sürtünme kuvveti
- Sac malzeme ve zimba arasındaki sürtünme kuvveti

Farklı malzemelerle gerçekleştirilen bir çalışmada (Özdilli ve Erdin, 2018) 4 farklı sac malzemesinin (DD13, DD14, DC01 ve DC04) Simufact Forming yazılımında derin çekme işlemini simüle ederek farklı pot çemberi ve sürtünme kuvvetleri altında bu malzemelerin karşılaştırılmasını yapmışlardır. Sürtünme katsayısının yüksek olduğunda malzemelerde hasar oluştuğu, daha düşük sürtünme kuvvetinde hasar oluşmadığı

gözlemlenmiştir. Derin çekme işleminde sürtünme koşullarının büyük etkiye neden olduğu sonucuna varılmıştır.

Derin çekmede parametrelerin doğru seçilmemesinden, üretim koşullarından, malzeme özelliklerinden dolayı parçada çeşitli kusurlar meydana gelmektedir (Joshi ve diğ., 2013). Şekil 2.8’de bu kusurlar gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Derin çekme kusurları a) flanşa kırışma b) duvar kırışması c) yırtılma d) kulaklanma e) yüzey çizikleri (Joshi ve diğ., 2013)

Flanşa kırışma: Pot çemberi kuvveti yetersiz kaldığında malzeme kalıp boşluğuna daha fazla akarak istemesi sonucu parçada radyal olarak kırışma meydana gelmektedir.

Duvar kırışması: Flanştaki kırışıklar içeri çekildiğinde veya çekme boşluğu çok büyükse meydana gelir. Pot çemberi kuvvetinin artmasıyla sürtünme kuvvetlerinde artış gerçekleştirilerek malzeme akışının düzenlenmesiyle buruşma önlenir.

Yırtılma: Yüksek çekme gerilmeleri sonucu zımba radiusunun parçayı şekillendirdiği parça tabanına yakın yerde metaldeki incelmeden dolayı meydana gelir. Zımba yarıçapı çok küçükse çekme işlemi zorlaşacağından dolayı bu hata gerçekleşebilir.

Kulaklanma: Malzemedeki düzlemsel anizotropiden dolayı metal akışının düzgün olmadığı yerlerde parçanın duvarı boyunca meydana gelir.

Yüzey çizikleri: Kalıp ve malzeme arasında istenmeyen partiküllerin yüzey hasarı oluşturmalarıdır (Joshi ve diğ., 2013; Shah ve diğ., 2014).

3. KALIP MALZEMELERİ VE KALIPLARA YAPILAN İŞLEMLER

3.1. Takım Çelikleri

Malzemelerin şekillendirilebilmesi ve işlenebilmesi için tasarlanmış olan takım çelikleri ağır işlem şartlarında altında çalışacakları için yüksek dayanım ve sertlik özellikleri sağlamaktadırlar. Takım çelikleri soğuk ve sıcak şekillendirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan geniş bir alaşım grubunu kapsamaktadır (Krauss, 2015). Şekillendirme ve işleme uygulamalarında gerekli olan özelliklerin sağlanabilmesi için çeliklerin çoğunlukla sertleştirme, temperleme ve ısıtım işlem yapılması gerekmektedir (Boljanovic, 2004).

3.1.1. Takım çeliklerinin Sınıflandırılması

Takım çelikleri AISI (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü) ve Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) dernekleri tarafından sınıflandırılmaları yapılmıştır. Sınıflandırma esasları harflendirme ile sağlanmaktadır.

W: Suda sertleşebilen takım çeliğini belirtmektedir. Bu çelik türünde düşük alaşım özelliklerinden dolayı sertleşebilme kabiliyeti düşüktür.

S: AISI S tipi takım çeliği W grubundan daha düşük karbon, daha yüksek alaşım oranı içerirler. Darbeye dayanıklıdır.

Soğuk iş takım çelikleri A, D ve O olmak üzere 3 sınıfa sahiptirler. Tüm soğuk iş takım çelikleri soğuk şekillendirme uygulamalarında yüksek aşınma ve sertleşme direncine sahip olmaları için yüksek karbon içerirler.

O: Yağda sertleştirilebilir çelikler.

A ve D sınıfları havada sertleştirilirler. Yüksek krom ve molibden içerdiklerinden dolayı karbür partikül oranları yüksektir. Bu da bu takım çeliklerinin aşınma davranışının yüksek olmasını sağlar.

L: Düşük alaşımlı özel amaçlı takım çelikleri düşük karbon oranından dolayı O tipine göre daha yüksek tokluğa değerlerine sahiptirler.

P: Plastik kalıplamada kullanılır. Plastik kalıplamada aşınma şiddeti daha az olduğu için daha düşük karbon oranına sahiptirler.

Sıcak şekillendirme uygulamalarında sıklıkla kullanılan sıcak iş takım çelikleri molibden, tungsten ve krom içeriğine göre 3'e ayrılır.

H: Dövme, ekstrüzyon ve döküm kalıplarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Orta karbonlu çeliklere kıyasla yüksek alaşım oranına sahip olan bu çelikler havada sertleşebilirler.

T ve M tipi yüksek hız takım çelikleri olarak geçmektedir. Molibden ve tungsten içeriği çok yüksektir. Yüksek alaşımlıdır. Yüksek hızlı kesme ve işleme uygulamalarında kullanılmaktadır. T tipinde ana alaşım elementi tungsten, M tipinde ise molibdendir (Krauss, 2015).

Tabloda soğuk iş takım çelikleri kimyasal içerikleri verilmektedir. Sac metal şekillendirmede yer alan derin çekme işlemi kalıplarında D2 soğuk iş takım çeliği yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tablo 3.1. Soğuk iş takım çelikleri kompozisyon aralığı (Krauss, 2015)

Kompozisyon (ağ.%) *									
AISI	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Ni
Yağda Sertleştirilmiş Soğuk İş Takım Çeliği									
O1	0,90	1,00	-	0,50	-	0,50	-	-	-
O2	0,90	1,60	-	-	-	-	-	-	-
O6(b)	1,45	0,80	1,00	-	-	-	0,25	-	-
O7	1,20	-	-	1,75	-	1,75	-	-	-
Havada Sertleştirilmiş Orta Alaşımlı Soğuk İş Takım Çeliği									
A2	1,00	-	-	5,00	-	-	1,00	-	-
A3	1,25	-	-	5,00	1,00	-	1,00	-	-
A4	1,00	2,00	-	1,00	-	-	1,00	-	-
A6	0,70	2,00	-	1,00	-	-	1,25	-	-
A7	2,25	-	-	5,25	4,75	1 (c)	1,00	-	-
A8	0,55	-	-	5,00	-	1,25	1,25	-	-
A9	0,50	-	-	5,00	1,00	-	1,40	-	1,50
A10(b)	1,35	1,80	1,25	-	-	-	1,50	-	1,80
Yüksek Karbon Yüksek Krom Soğuk İş Takım Çeliği									
D2	1,50	-	-	12,00	1,00	-	1,00	-	-
D3	2,25	-	-	12,00	-	-	-	-	-
D4	2,25	-	-	12,00	-	-	1,00	-	-
D5	1,50	-	-	12,00	-	-	1,00	3,00	-
D7	2,35	-	-	12,00	4,00	-	1,00	-	-

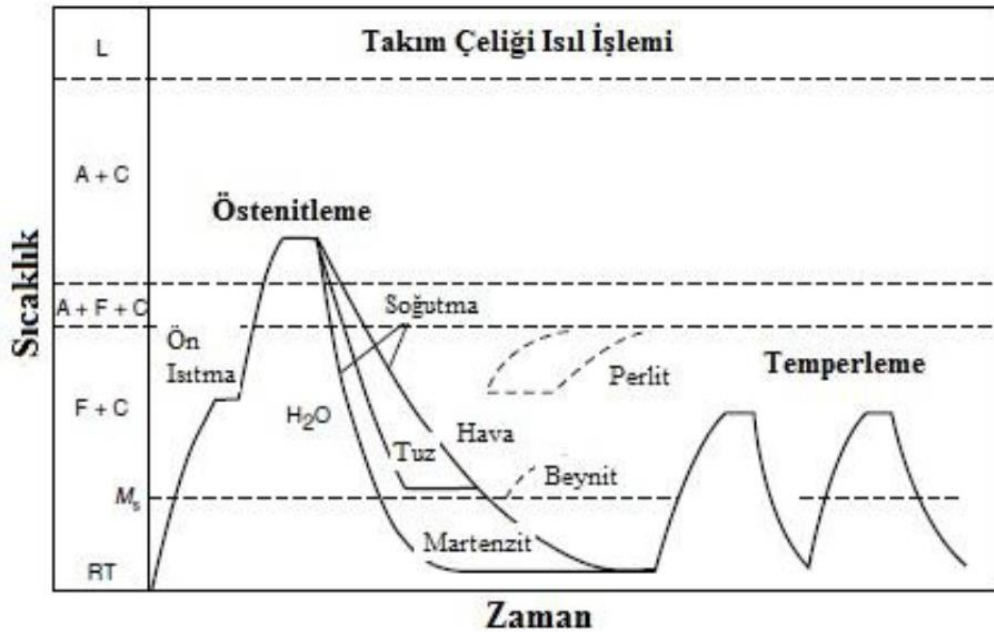
3.2. Isıl İşlemler

Malzemelerin istenen dayanım ve sertliğe ulaştırılması, mikroyapı içerisinde bulunan çarpılmaların giderilmesi, tokluk değerlerinin artırılması gibi birçok özellik için malzemelere ısı işlemleri uygulanmaktadır. Isıl işlem malzemelerin mekanik özelliklerini değiştirmede büyük öneme sahiptir.

Temel olarak takım çeliklerinin ısı işlemlerine bakıldığında yumuşak çeliklere benzer şekilde;

- 1- Östenitleme oluşturma,
- 2- Hızlı soğutma ile martenzit oluşturma,
- 3- Tavlama (menevişleme)

olarak 3 adımda gerçekleştirilmektedir (Krauss, 2015). Isıl işlemle birlikte takım çelikleri istenen dayanım özelliklerine kavuşturulmaktadır (Toptop, 2011). Şekil 3.1’de takım çeliklerine uygulanan ısı işlem adımları görülmektedir. Ön ısıtma malzemenin homojen olarak östenit sıcaklığına ulaşarak malzemedeki lokal şok ve çarpılmaları önlemek için tercih edilmektedir (Aktaş, 2014).



Şekil 3.1. Takım çeliğine uygulanan ısı işlem adımları (Toptop, 2011)

3.2.1. Östenitleştirme

Takım çeliklerinde sertlik ve dayanım kazanılması için gerçekleştirilen ilk adım östenitleştirme işlemidir. Takım çeliği alaşım özellikleri dikkate alınarak faz diyagramında A3 sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa çıkarılarak homojen östenit fazı elde edilir (Aktaş, 2014). Bu işlem takım çeliklerinin ısıtılmasındaki en kritik adımdır. Bu aşamada malzemenin gerekenden uzun süre ısıtılması veya daha yüksek sıcaklıklara çıkarılması sonucunda malzemede dayanım azalması, tane büyümesi gibi istenmeyen durumlarla karşılaşılabilir (Toptop, 2011).

3.2.2. Martenzit Oluşturma

Tamamen östenit fazına geçmiş olan çeliğin martenzit fazına dönüşümünün sağlanması için hızlı bir şekilde soğutulması gerekmektedir. Çeliklerdeki hızlı soğutma farklı ortamlarda yapılabilmektedir. Bunlar temel olarak; su, yağ, tuz banyosu veya gaz ortamı olarak sıralanabilir (Toptop, 2011). En hızlı şekilde soğutma su ortamında sağlanmaktadır.

3.2.3. Menevişleme

Çeliğe yapılan hızlı soğutma işleminden sonra elde edilen martenzit yapıda çelik yüksek sertliğe sahip olmakta fakat kırılgan yapıdadır. Malzeme içerisinde kalıntı östenit yapıların karbürlerin heterojen dağılımı nedeniyle malzeme düşük tokluğa sahip olmaktadır. Çeliğin tokluğunu arttırmak ve gevrekliğini azaltmak için son bir işlem olan menevişleme (tavlama) işlemi yapılmaktadır. Menevişleme işleminde çelik A1 sıcaklığının altında bir sıcaklığa kadar ısıtılır daha sonrasında yavaşça soğutulur. Soğuk iş takım çeliklerinde genellikle tek seferde menevişleme işlemi yeterli olmadığı için daha kısa sürede iki seferde menevişleme işlemi tercih edilmektedir (Aktaş, 2014; Toptop, 2011). Menevişleme işlemi ile çeliğin tokluğu arttırmasının yanında mukavemeti ve sertliğinde bir miktar azalma gerçekleşmektedir (Krauss, 2015).

3.3.Yüzey İşlemleri

Sac metal şekillendirme işlemlerinde kesme, derin çekme gibi yüksek kuvvetlerin geldiği kalıplarda, işleme takımlarında yüksek kuvvetlerin etkisiyle aşınmalar meydana

gelmektedir. Kalıp malzemelerinin, takımların dayanımının, sertliğinin arttırılması için çeşitli yüzey mühendisliği uygulamaları kullanılmaktadır.

Bunlar yüzey sertleştirme uygulamaları, nitrürleme, kriyojenik işlemler, lazer yüzey ergitmeye kadar giden termokimyasal uygulamalara ek olarak kaplama uygulamaları olarak sıralanabilir.

Sac metal şekillendirme işlemlerinde yaygın olarak kaplama uygulaması yapılmakta ve kalıpların performansı arttırılmaktadır. Kaplama öncesi yapılan nitrasyon işlemi de kaplama özelliklerini iyileştirmektedir. Tezin bu kısmında nitrasyon ve kaplama uygulaması anlatılacaktır.

3.3.1. Nitrürleme

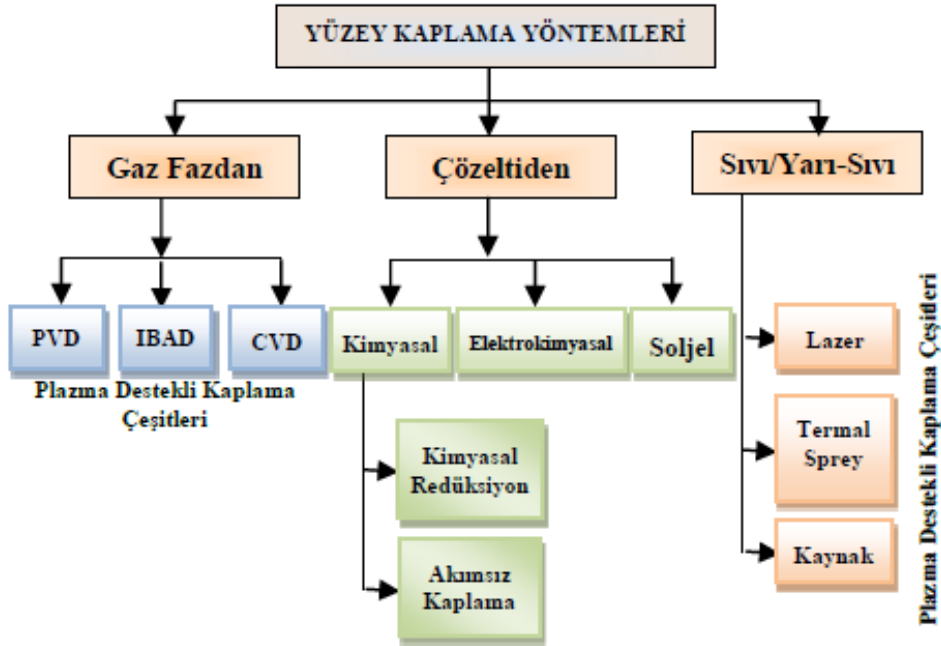
Nitrürleme işlemi hacim merkezli kübik yapıya sahip çeliklerin yüzey tabakalarında N atomlarının biriktirilmesi olayına dayanmaktadır. Nitrürleme işleminin amacı çelik üzerinde elde edilen nitrür tabakasıyla çeliğe sertlik kazandırmaktır. Bu işlemde çeliğin ısıtılarak östenit bölgesine çıkarılıp tekrar soğutma ile gevrek martenzitik yapı elde edilmeden sertlik kazandırıldığı için daha avantajlıdır. İşlem sıcaklığı alaşım türü ve özelliklerine göre 495-595°C arasında değişmektedir. Nitrürleme işlemi reaksiyonu incelendiğinde amonyak gazının $\text{NH}_3 \rightarrow \text{N} + 3\text{H}$ dönüşümü ile yüzey tabakasına yayınma sağlanır ve çelik üzerinde demir nitrürler oluşur (Topçu, 2010). Demir nitrürlerin yüzeyde birikmesiyle yüzey üzerinde beyaz tabaka denen sert bir tabaka oluşur (Aktaş, 2014). Arada bir geçiş bölgesi olarak difüzyon bölgesi oluşur. Böylece çeliğin yüzeyinin sert olduğu içeri doğru gidildikçe toklaştığı bir yapı elde edilmiş olur.

DIN 1.2344 takım çeliği üzerinde yapılan bir çalışmada Bakmedir ve diğ. (2020) gaz nitrürleme işleminin takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Malzeme yüzeyinde oluşan nitrür tabakasından dolayı takımın aşınma dayanımının arttığı görülmüştür. Shu-Hung Yeh ve arkadaşları JIS SACM 645 çeliği üzerine yapılan nitrürleme işleminin malzemedeki mekanik ve korozyon özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerde nitrür tabakasının çeliğin aşınma ve yorulma davranışını iyileştirdiğini görmüşlerdir (Yeh ve diğ., 2011).

3.3.2. Kaplama

Günümüzde artan üretim talepleriyle birlikte yüksek adette gerçekleşen üretimlerde sürekli temas sonucunda kalıp ve takım malzemelerinde aşınmalar meydana gelmektedir. Sac şekillendirme proseslerinde aşınmanın azaltılarak proses verimliliğini artırılması için yağlayıcı ve kaplama uygulamaları sık kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Yeni gelen kısıtlamalar ile birlikte yağlayıcı kullanımının azaltılması hedeflenmesiyle kaplamaların kullanımının yaygınlığı artmıştır. Kaplamalar tribolojik özelliklerin iyileştirilerek aşınmanın azaltılmasında, takım ömrünü arttırmada büyük öneme sahiptir. Son yıllarda birçok kaplama yöntemi ve türü geliştirilmiştir (Groover, 2010; Podgornik ve Leskovšek, 2015; Sousa ve diğ., 2021; Watcharasresomroeng ve diğ., 2011).

Kaplamadan beklenen özellikler yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı, iyi ara yüzey bağlantısı, tokluk, adhesif ve abraziv aşınmaya karşı direnç olarak sıralanabilmektedir (Günay ve diğ., 2020; <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/coating-for-stamping-and-forming-tools>). Uygulanan işlem sonucunda kalıplardan üretilen parçaların kalitesinin artması sonucu hurda miktarı azalmaktadır (Carlsson, 2005).

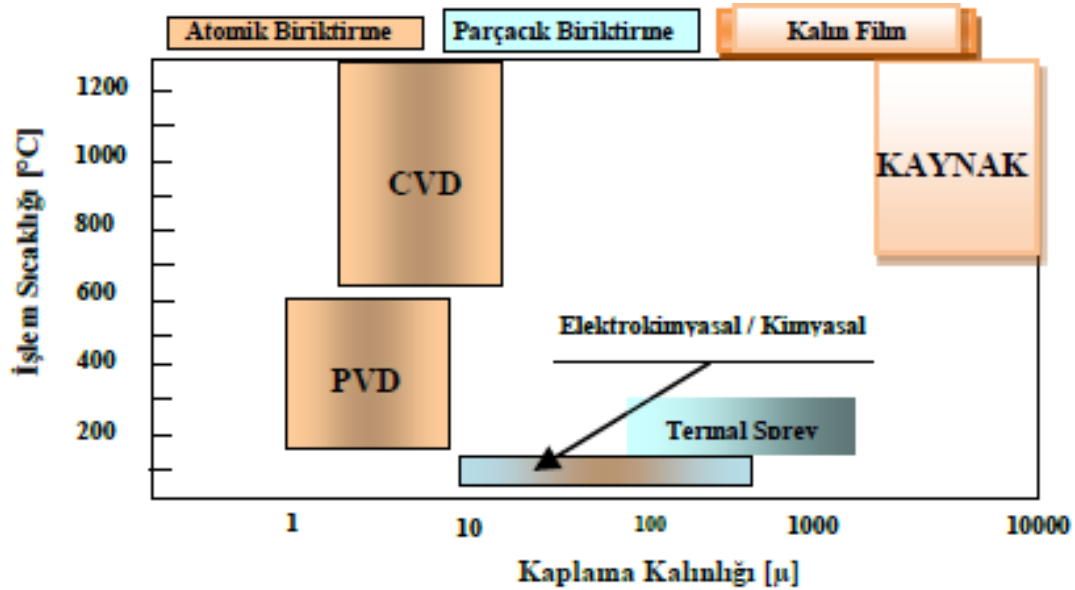


Şekil 3.2. Kullanılan malzeme faz durumuna göre kaplamaların sınıflandırılması (Aytaç ve Malayoğlu, 2018)

Kaplamalar proseste kullanılan malzemelerin fazlarına göre sınıflandırılabilir. Sıvı/yarı-sıvı, çözelti veya gaz fazdan kaplama gerçekleştirilebilir. Şekil 3.2'deki şemada kullanılan malzeme fazı özelliklerine göre kaplama yöntemleri sınıflandırılmıştır.

Kaplama yönteminin seçiminde kaplama kalınlığı ve kaplama sıcaklığı önemli iki parametredir. Kaplama yöntemlerinde 1-10µm arasında yapılan kaplamalar ince film kaplama, 10 µm üstü kalınlıklardaki kaplamalar ise kalın film kaplama olarak geçmektedir. İnce film kaplamalarda kaplama malzemesinin atomik düzeyde birikimi gerçekleştirilir (Aytaç ve Malayoğlu, 2018).

Sac metal şekillendirmede farklı temas ve yükleme koşullarından dolayı doğru kaplamanın seçimi kritik öneme sahiptir (Zdravecká ve diğ., 2014). Son yıllarda tribolojik özelliklerin iyileştirilmesi ve aşınma performansın artırılması için şekillendirme proseslerinde sert kaplamalar yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Podgornik ve Leskovšek, 2015). Endüstrideki şekillendirme proseslerinde en yaygın olarak kullanılan kaplama yöntemleri kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve termal difüzyondur (Watcharasresomroeng ve diğ., 2011). Yapılan araştırmalarda daha yüksek özellikte takım malzemesi kullanmak yerine nispeten daha düşük kaliteye sahip malzemeler kullanılarak CVD ve PVD gibi kaplama yöntemleriyle takım ömrünün uzatılmasının daha ekonomik olduğu sonucuna varılmıştır (Günay ve diğ., 2020).



Şekil 3.3. İşlem sıcaklığı ve malzeme kalınlığına göre kaplamaların kullanımı (Aytaç ve Malayoğlu, 2018)

Şekil 3.3'te kaplama kalınlığı ve işlem sıcaklığına göre kaplama yöntemleri gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi CVD kaplama proseslerinde yüksek işlem sıcaklıklarında kaplama yapılmaktadır. Sac şekillendirme kalıplarında kullanılan kalıp malzemelerinin yüksek sıcaklıktan dolayı mekanik özelliklerinin etkilenmesini önlemek için daha düşük sıcaklıklarda (200-500°C) çalışan PVD kaplamalar tercih edilmektedir (Watcharasresomroeng ve diğ., 2011).

3.3.2.1.PVD Kaplama

PVD kaplamalar aşınma ve korozyon dayanımını geliştirme, yüksek işlem hızları ve iyi yapışma özellikleri nedeniyle kullanımı son yıllarda giderek yaygınlaşmaktadır (Carlsson, 2005; Türküz, 2006). PVD kaplamalar sac metal şekillendirme (kesme, bükme, form verme vb.), plastik enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplarından dekoratif uygulamalara kadar bir çok alanda uygulanmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. PVD kaplama yapılmış uygulamalar (<https://www.titanit.com.tr/pvd-kaplama/super-tin/>)

PVD yönteminde vakum odasında buhar fazına dönüştürülen kaplama malzemesinin alt tabaka malzemesi yüzeyi üzerine çok ince bir film tabakası halinde biriktirilmesi işlemine dayanmaktadır (Groover, 2010). Bu yöntemle yapılan kaplamalarda kaplama kalınlığının 1-10 µm olması sebebiyle ince film kaplama kategorisine girmektedir (Aytaç ve Malayoğlu, 2018; Türküz, 2006).

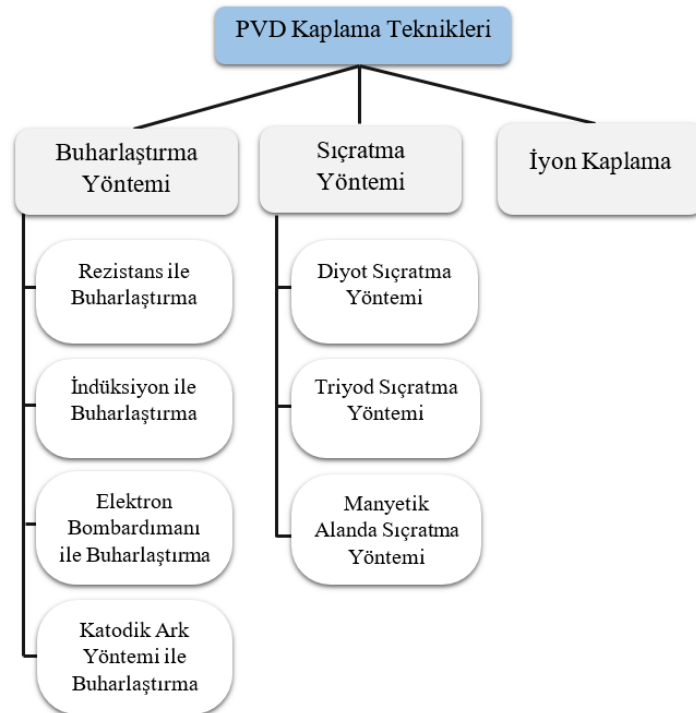
PVD yöntemi diğer yöntemlerden ayıran en önemli özelliği düşük sıcaklıklarda (200-500°C) kaplamanın gerçekleşmesinden dolayı kalıp malzemesinin mekanik özelliklerinin daha az etkilenmesinin sağlanmasıdır (Carlsson, 2005).

PVD prosesin kaplama malzemesinin buhar formuna dönüştürülerek alt tabaka yüzeyine atomik düzeyde ince bir film tabakası halinde biriktirilmesine dayanır (İvan, 2012).

Fiziksel buhar biriktirme prosesleri aşağıdaki adımlardan oluşur:

- (1) kaplama malzemesinin buharlaştırılması,
- (2) alt tabaka malzemesine buharın taşınması,
- (3) alt tabaka yüzeyi üzerinde buharların yoğunlaşarak tabaka oluşturması (Groover, 2010).

Kaplamaların yapıları incelendiğinde birçok varyasyonda kaplama biriktirme çeşidinin olduğu görülmektedir. Temel olarak PVD kaplamalar incelendiğinde prosesin ikiye ayrıldığı görülmektedir. Buharlaştırma ve sıçratma (püskürtme) ile kaplama malzemesinin atomik veya iyonlaşma ile biriktirme sağlanır (Groover, 2010). İyon kaplamada ise iyonize edilmiş atomlar vasıtasıyla kaplama yapılmaktadır (Şekil 3.5).

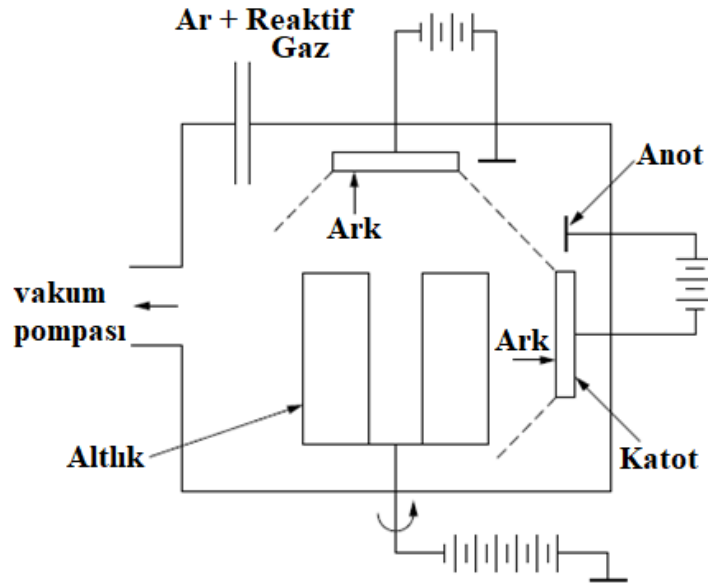


Şekil 3.5. PVD kaplama teknikleri (İvan, 2012)

PVD teknolojisinde en yaygın olarak kullanılan yöntemler püskürtme ve katodik ark biriktirme yöntemidir (Aytaç ve Malayoğlu, 2018).

Katodik Ark Biriktirme Yöntemi

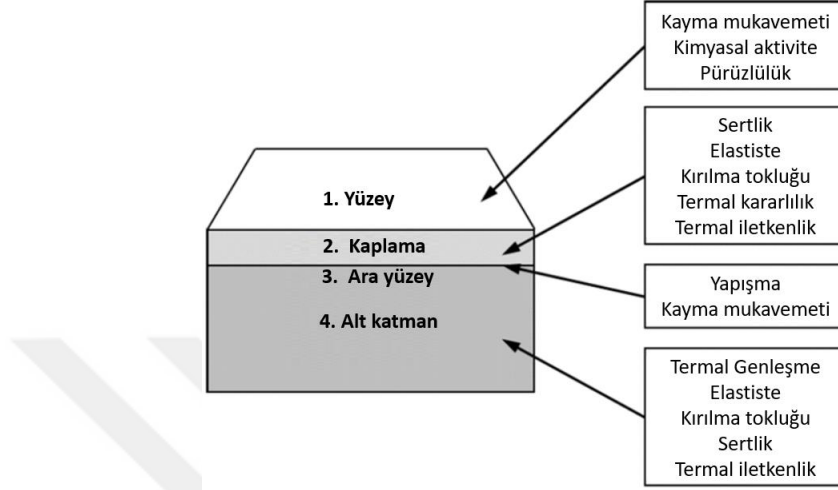
Katodik ark biriktirme yöntemi aşınmaya dayanıklı, sert kaplamaların uygulanmasında yaygın olarak kullanılan PVD yöntemlerinden biridir (Tracton, 2006). Bu yöntemde vakum altında kaplama malzemesinin buharlaşması ark ile sağlanmaktadır. Katodik ark biriktirme yönteminde yüksek iyonizasyon ile buharlaşma sağlanması, kaplamanın homojen olarak yüzeye uygulaması, yüksek adezyon etkileri avantaj sağlarken buharın metal yüzeyinde damlacık yoluyla makropartüküllerin oluşturması dezavantaj oluşturmaktadır. Vakum odasına yerleştirilen kaplama yapılacak altık malzemesi işlem sırasında anot görevi görürken kaplama malzemeleri katot görevi görürler (Tracton, 2006; Aktaş, 2014; Cora, 2009).



Şekil 3.6. Katodik ark biriktirme yöntemi (Tracton, 2006)

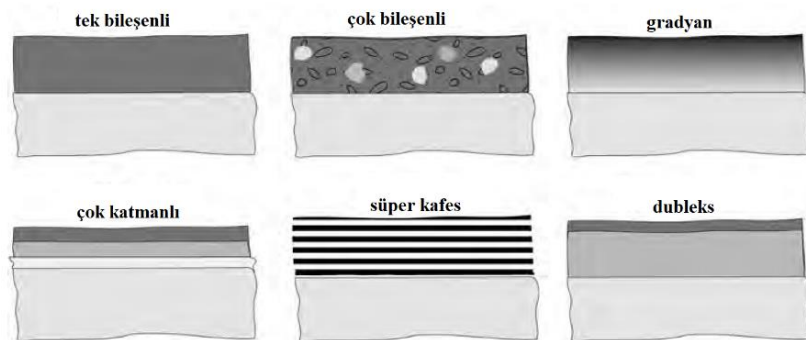
Katodik ark biriktirme yönteminde (Şekil 3.6) buharlaşmanın sağlanması için düşük basınç ve yüksek akım sayesinde katot yüzeyinde ark oluşarak sıcaklığın artması sağlanır. Sıcaklığın çok yükselmesiyle birlikte kaplama malzemesi buharlaşır ve elektrot arasında plazma meydana gelir. İyonize olmuş yapı anot üzerine birikerek kaplama tabakasını oluştururlar (Aktaş, 2014; Türküz, 2006).

İnce film kaplamaların uygulanmasıyla sınırlı özellikteki alt tabaka malzemesinin mekanik özelliklerinin artırılması sağlanır (Vidakis ve diğ., 2003). Şekil 3.7’de kaplama ve taban malzemelerinin özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Kaplama ve taban malzeme özelliklerinin gösterimi (Nilsson, 2012)

Yeni biriktirme teknikleriyle kaplama yapıları tek bileşenli, çok bileşenli, çok katmanlı, dupleks vb. olarak birçok türde kaplama yapısı geliştirilmiştir (Şekil 3.8). Her bir kaplama yapısının kendine özgü özellikleri mevcuttur. Aynı kalınlığa sahip birden fazla ince katman içeren çok katmanlı kaplamalar ile tek bileşene sahip kalın kaplamalar kıyaslandığında çok katmanlı kaplamada daha yüksek mukavemet, daha düşük stress yükü olduğu bildirilmiştir. Çok katmanlı kaplama sayesinde yüzeyde oluşacak çatlakların altlık malzemesine iletilmesi daha uzun sürede gerçekleşecek ve hasar geç olacaktır (Holmberg ve Matthews, 2009).

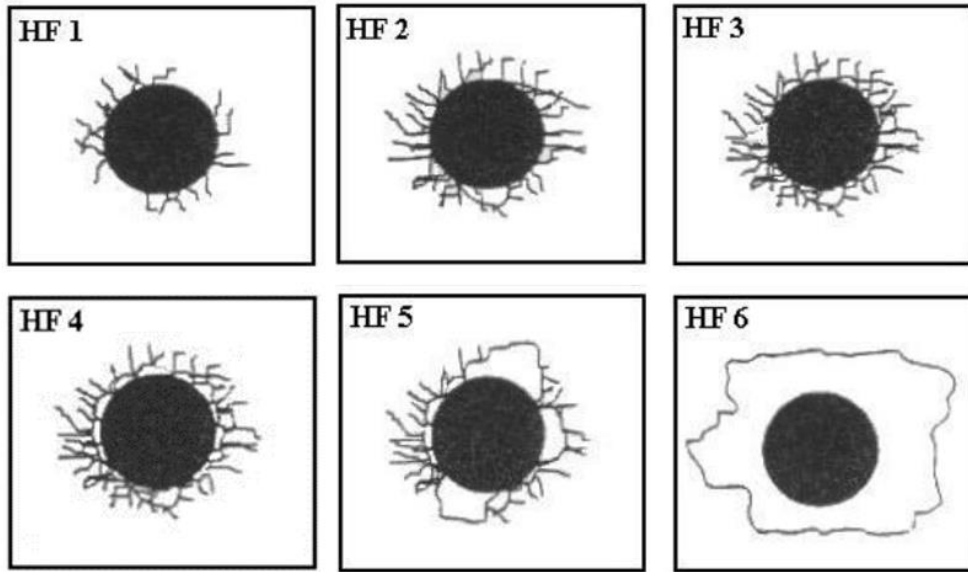


Şekil 3.8. Tribolojik kaplamaların olası karmaşık yapıları (Holmberg ve Matthews, 2009)

Kaplama bileşimleri incelendiğinde CrN, DLC ve Ti bazlı PVD kaplamaların kesme ve şekillendirme kalıplarında yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Carlsson, 2005; Türküz, 2006). CrN kaplama yüksek termal ve oksidasyon dayanım, yüksek korozyon dayanımı, yüksek aşınma dayanımı ve düşük yapışma etkisi nedeniyle şekillendirme kalıplarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Carlsson, 2005). CrN kaplamalar adhesif aşınma dayanımları iyi olsa da yüksek yüklerdeki abrazyif aşınma dayanımı yetersiz kalabilmektedir. TiN kaplamalar sıklıkla kesme ve şekillendirme kalıplarında kullanılmaktadır. (Holmberg ve Matthews, 2009).

Geleneksel TiN, CrN, TiC tek katmanlı sert kaplamalar yüksek yüklerdeki belirli koşullar altında gerekli dayanımı sağlayamadığı ve yetersiz sürtünme ve sertlikte olduğu için yeni geliştirilen çok katmanlı kaplamalar tek katmanlı kaplamalara göre yüksek özellik sergilemektedir. Kalıplardaki farklı temas ve basınç değerlerinden dolayı kaplama seçimi kritik önem taşımaktadır. Kaplamanın taban malzeme üzerine iyi yapışması, düşük sürtünme ve yüksek aşınma dayanımı sağlaması istenmektedir (Zdravecká ve diğ., 2014).

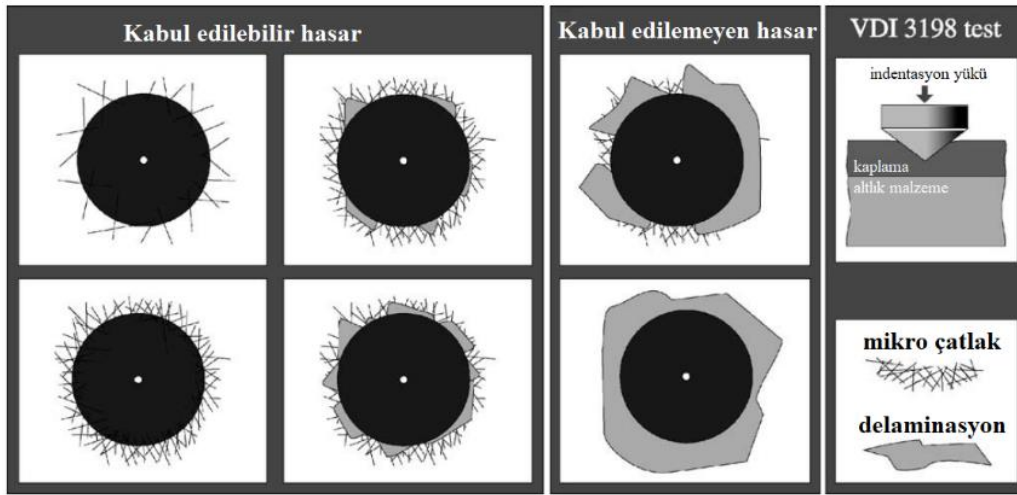
Kaplama performansını incelemek için kaplama sonrası malzemeler üzerinde çeşitli testler yapılmaktadır. Kaplamanın altlık malzemesine yapışmasının incelenmesinde Rockwell C indentasyon testi örnek gösterilebilir. Bu test kaplama malzemesinin altlık üzerine yapışma düzeyini gösterir ve endüstride yaygın bir şekilde kullanılır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Rockwell C indentasyon testi hasar türü skalası (Türküz, 2006)

Rockwell C testi Numunelere standart Rocwell C sertlik deneyi 150 kg'lık bir normal kuvvet değeri baz alınarak yapılır. Test sonucu oluşan izler detaylı incelendiğinde iz etrafındaki çatlaklar bize kaplamanın ne kadar iyi yapışıp yapışmadığını gösterecektir. Yapışmanın düzeyini gösteren HF1-HF6 arasında bir değerlendirme skalası vardır. Bu skalaya göre kaplamaların yapışma performansı değerlendirilir (Türküz, 2006).

N. Vidakis ve arkadaşları kaplama performansını ölçen VDI 3198 indentasyon test standardına göre yapılan Rockwell C indentasyon testinin metodolojisini ve tipik sonuçlarını yaptıkları çalışmada açıklamışlardır. Şekil 3.10'da VDI 3198 indentasyon testi sonuçlarına göre kabul edilebilir ve kabul edilemez hata şekilleri verilmiştir (Vidakis ve diğ., 2003).



Şekil 3.10. VDI 3198 indentasyon testine göre kabul edilebilir ve kabul edilemez hasar türlerinin şematik gösterimi (Vidakis ve diğ., 2003)

PVD kaplamalarla ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Chi-Lung Chang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Nano çok katmanlı TiSiN/TiAlN kaplamayı çift katodik ark biriktirme PVD yöntemi ile WC-Co alt tabaka malzemesi üzerine uygulamışlardır. Çok katmanlı TiSiN/TiAlN kaplamaların sürtünme katsayısının TiAlN ve TiSiN kaplamalardan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Chang ve diğ., 2007).

E. Zdravecká ve arkadaşları yaptıkları çalışmada PVD-TiN ve Tribo kaplamalı P / M Vanadis 6 ledeburitik çeliğin aşınma davranışlarını incelemek için aşınma testi ve kaplama derinlik ölçümü yapmışlardır. Sonuçları değerlendirmek için aşınma testi uygulanmış numuneleri SEM cihazı kullanarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda

PVD kaplamanın soğuk şekillendirme prosesinde aşınma direncini dolayısıyla kalıp ömrünü ve arttırmak için etkili olduğu görülmüştür (Zdravecká ve diğ., 2014).

Ayhan Aytaç ve Muhammed İlivan yaptıkları çalışmada katodik ark PVD yöntemiyle 2550 soğuk iş takım çeliği malzemesi üzerine TiN ve CrN ince sert film kaplama uygulamışlardır. Kaplama performanslarını değerlendirmek çizik testi yapılarak kaplamalı numune kesitlerinin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelemesi yapılmıştır. Kaplama sonrası yüzey pürüzlülük, sertlik ve kalınlık değerleri incelenmiştir. Kaplamalı numunelerin kaplamasız numunelere göre sertlik değerinin %159 daha fazla olduğunu, CrN kaplamanın mikrosertlik oranının TiN kaplamaya göre %30 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama malzeme, kalınlık ve koşullarının altlık malzemeye yapışması için etkili kriter olduğu sonucuna varılmıştır (Aytaç ve İlivan, 2018).

L. Fernandes ve arkadaşları Kalay kaplı çelik sac malzeme ve geliştirilmiş iki farklı PVD kaplamayla (B4C ve Mo) kaplanmış kalıplar kullanarak hangi tür kaplamanın çalışma koşullarında daha iyi aşınma davranışı sergilediğini öğrenmek için orta yükte tribolojik testler yapmışlardır. Aşınmış yüzeyleri SEM ile malzeme transferini EDS ile analiz etmişlerdir. Test edilen bazı kaplamaların sonucunda elde edilen verilere göre şekillendirme prosesinde kaplamaların kalay transferinin indirgenmesinde, kalıp ömrünün uzamasında, takım bakım işlemlerinin azaltılmasında ve genel ekipman verimliliğinin iyileştirilmesinde (OEE) etkinliğinin mümkün olduğunu doğrulamıştır (Fernandes ve diğ., 2017).

E.E. Vera ve arkadaşları kuru temas altında aşınma davranışını değerlendirmek için 3 farklı çelik alt tabaka üzerine (4230,8620 ve 4140) TiN, CrN ve WC/C PVD kaplamaları uygulamışlardır. İki farklı yük altında gerçekleştirilen testler sonucunda WC/C kaplamanın en iyi aşınma davranışı ve en iyi sürtünme sonuçlarını sergilediğini bulmuşlardır (Vera ve diğ., 2010.)

Varunee P. ve arkadaşları yaptıkları çalışmada gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerin (AHSS) CrN kaplanmış malzeme ile yapışma davranışını incelemişleridir. İnce sert film kaplama varyasyonları olarak CrN, TiN radikal nitrür ve CrN radikal nitrür kaplanmış malzemelerin yapışma bağ dokusunu incelemek için çizik testi yapmışlardır. CrN kaplı malzemenin gelişmiş yüksek mukavemetli çelikte aşınmayı kontrol etmede etkili

olduğunu ve önceden yapılan radikal nitrür işlemiyle birlikte film ve altlık malzeme arasındaki bağ kuvvetini arttırdığını gözlemlemişlerdir (Watcharasresomroeng ve diğ., 2011).

Liliana Fernandes ve arkadaşları gıda endüstrisinde ince sacların düşük çekme derinliğinde şekillendirme prosesiyle üretilmesinde kullanılan kalıp malzemelerinin TiAlN PVD kaplamasını gerçekleştirerek kaplama performansını incelemişlerdir. TiAlN kaplamanın yumuşak malzeme şekillendirme kalıplarında yüksek potansiyele sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Kaplanmamış kalıp PVD kaplanmış kalıpla kıyaslandığında kalıp ömrünün %500'den fazla arttığı gözlemlenmiştir (Liliana ve diğ., 2019). Hilal Günay ve arkadaşları 1.2379 soğuk iş takım çeliği üzerine TiN, AlTiN ve TiSiN PVD kaplama yaparak endüstriyel uygulamada delme kalıplarındaki kaplanmış çeliklerinin aşınma davranışını incelemişlerdir. 1.2379 soğuk iş takım çeliğinin PVD kaplama yapılmasıyla takım ömrünün geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında %500 oranında arttığı görülmüştür (Günay ve diğ., 2020).

M. Adamiak ve arkadaşları ısıtılmış ve plazma nitrürlenmiş sıcak iş çeliği X37CrMoV5-1 üzerine çok katmanlı TiN/(Ti,Al)N PVD kaplama yaparak malzemelerin tribolojik ve yapışma özelliklerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre plazma nitrürlenmiş ve TiN/(Ti,Al)N kaplamayla kaplanmış malzemelerin ısıtılmış işlem yapılarak TiN/(Ti,Al)N kaplanmış malzemelere göre daha iyi yapışma özellikleri sergilediklerini ve daha az aşınmaya maruz kaldığını görmüşlerdir (Liliana ve diğ., 2019).

4. SÜRTÜNME VE AŞINMA

Sac metal şekillendirme ile üretilen parçaların kalitesi sürtünme, aşınma ve yağlayıcıyı konu alan tribolojik koşullara büyük ölçüde bağlıdır. Proses esnasında yüksek verimin sağlanması için ideal tribolojik koşulların optimum seviyede sağlanması gerekir (Sigvant ve diğ., 2018).

Sac metal şekillendirmedeki derin çekme işlemlerinde parçalar şekillendirilirken zımba, kalıp, pot çemberi ve sac metal arasında proses esnasında yüzey teması gerçekleşmektedir. Şekillendirme işlemlerindeki bu temas ve tekrarlı kayma kuvvetleri etkisinde yüksek basınç ve sürtünmenin etkisiyle birlikte kalıplarda aşınma ve çeşitli hasarlar meydana gelmektedir. Aşınmanın önlenmesi için kalıp malzemesi mekanik özelliklerinin, yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, kaplamaların uygulanması ve yağlayıcı kullanımı örnek olarak verilebilmektedir. Soğuk şekillendirmede yaygın olarak gerçekleşen aşınma ve hasar mekanizmaları aşağıda sıralanmıştır (Madorsky ve Thompson, 2005; Podgornik ve Leskovšek, 2015; Türküz, 2006).



Şekil 4.1. Takım malzemelerinde gerçekleşen hasar mekanizmaları (Madorsky ve Thompson, 2005)

- Abrazif Aşınma
- Adhesif aşınma
- Plastik deformasyon
- Ufalanma
- Kırılma, çatlak (Madorsky ve Thompson, 2005)

Özellikle otomotiv sektöründeki gelişmelerle yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip malzemelerin kullanımının giderek yaygınlaşmasıyla birlikte işlem esnasında gereken kuvvetin artmasıyla sürtünme kuvvetlerinin artması ve aşınmanın gerçekleşmesi kaçınılmaz olmaktadır. Ek olarak yağlayıcı kullanımında gerçekleşen kısıtlamalarla işlem performansı daha da kötü etkilenmektedir. İşlem sırasında şiddetli yükler sonucunda aşınmanın artmasıyla birlikte takım ömrü azalmaktadır (Dwivedi ve Agnihotri, 2017). Bunun önüne geçmek için kalıp kaplamalarının uygulanması sektörde giderek yaygınlaşmaktadır.

4.1. Sürtünme

Temas halinde bulunan malzemelerin yüzeylerinde rölatif hareket sonucunda bir direnç kuvveti oluşur. Bu kuvvete sürtünme kuvveti denir. Sürtünme katsayısı ve kuvvetinin belirlenmesinde metal şekillendirme işlemlerinde sabit sürtünme yasası “Coulomb Sürtünmesi” kullanılmaktadır (Seshacharyulu ve diğ., 2018; Carlsson, 2005). Bu yasaya göre malzemeler arasındaki teğetsel sürtünme kuvveti (F_S), malzeme çifti arasındaki sürtünme katsayısının (μ) yüzeye dik etki eden normal kuvvetle (F_N) çarpılması sonucu elde edilir (Aktaş, 2014).

$$F_S = \mu \cdot F_N \quad (3.1)$$

Sürtünme katsayısı μ_s (statik sürtünme katsayısı) ve μ_k (dinamik sürtünme katsayısı) olarak iki şekilde belirtilmektedir. Kuvvet etkisi altında cisimler arasında herhangi bir hareket gerçekleşmeyip cisimler sabit duruyorsa bu durumda;

$$F_S = \mu_s \cdot F_N \quad (3.2)$$

denklemleri geçerli olmaktadır. Hareket başladıktan sonra sürtünme kuvvetinde bir düşüş gerçekleşmektedir. Bu durumda;

$$F_S = \mu_k \cdot F_N \quad (3.3)$$

denklemleri geçerli olmaktadır (Türküz, 2006).

Sac metal şekillendirme işlemlerinde kalıp ve sac metal arasındaki sürtünme kuvvetleri prosesi ciddi oranda etkilemektedir (Dwivedi ve Agnihotri, 2017). Kalıp ve sac metal

malzeme çifti arasındaki sürtünme katsayısı değerleri sac malzeme akışının nasıl olacağını, zımba yükünü, malzemelerin aşınma davranışını vb. etkilemektedir. Yüksek sürtünme kuvvetlerinde kalıba gelen yüklerin de yüksek olması durumunda kalıpta aşınma meydana gelmesi kaçınılmaz olmaktadır (Vidakis ve diğ., 2003). Kalıp aşınmasının engellenmesi, malzeme akışının sağlanması için olabilecek minimum sürtünme kuvvetlerinde parça şekillendirilmek istenir. Bunun sağlanabilmesi için çeşitli yağlayıcılar, kalıp kaplamaları, yüzey işlemleri kullanılmaktadır (Zein ve diğ., 2013). Sürtünme katsayısı; temas basıncı, sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerden etkilenmektedir (Dwivedi ve Agnihotri, 2017).

Minimum sürtünme kuvvetleri genel olarak istense bile parça şekillendirilmesi yapılırken malzeme akışının sağlanması için belli bir oranda sürtünme gerekmektedir. Buna örnek olarak derin çekme işleminde zımba kuvvetinin optimum seviyede saca aktarılması ve şekillendirmenin sağlanması için zımba ve sac arasında yüksek sürtünme katsayısı istenmesi gösterilebilir. İstenen bu durumda sac ve zımbanın yağlanmaması gerekmektedir. Optimum değer bu olsa bile zımbanın aşınması göz önüne alınarak işlem yapılmalıdır (Yalçın C., 2021; Zein ve diğ., 2013).

4.2. Aşınma

Aşınma temas eden ve etkileşimde olan yüzeylerin rölatif hareketleri sonucunda malzeme ağırlığında azalmanın meydana geldiği bir mekanizmadır. Sürtünme ile aşınmanın doğru oranda ilerlediği genel olarak görülse bile bunu tersine çeviren örnekler de görülmüştür (Aktaş, 2014). Genel olarak bakıldığında aşınma istenmeyen bir durumdur. Endüstriyel uygulamalarda takım ve kalıplarda oluşan aşınma sonucu parça kalitesi etkilenmektedir (Zdravecká ve diğ., 2014).



Şekil 4.2. Aşınmış kalıp ve parça görseli

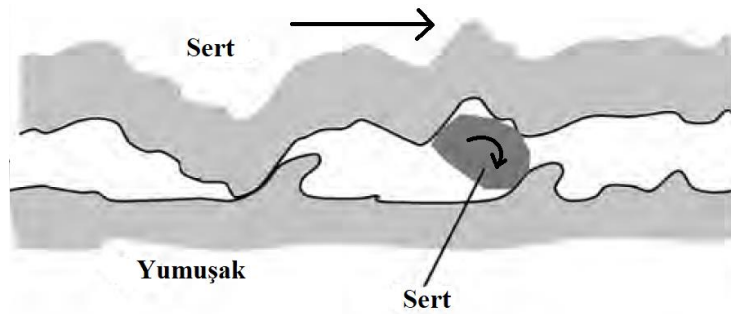
Şekil 4.2’de kalıp aşınması sonucu üretilmiş parçadaki hasar görülmektedir. Yapılan çalışmalarda aşınma mekanizmaları incelendiğinde tek bir aşınma mekanizması yerine birden fazla aşınma mekanizmasının etki ettiği görülmüştür (Carlsson, 2005).

Aşınma mekanizmaları DIN 50320 standardında göre temel olarak dörde ayrılmıştır (Aktaş, 2014). Bunlar; abrazif aşınma, adhesif aşınma, tribokimyasal aşınma ve yorulma aşınmasıdır (Holmberg ve Matthews, 2009; Podgornik ve Leskovšek, 2015; Zdravecká ve diğ., 2014;).

4.2.1. Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma birbirine göre sertlikleri farklı olan malzemelerin etkileşimi sırasında meydana gelmektedir. Daha sert olan malzemenin yumuşak olan malzemeyi aşındırması sonucu malzeme yüzeyinde oluklar ve çizikler oluşmaktadır (Holmberg ve Matthews, 2009). Şekil 4.3’te abrazif aşınma mekanizması gösterilmektedir.

Abrazif aşınma iki elemanlı ve üç elemanlı olarak iki kategoride incelenebilir. İlk malzeme yüzeyinde bulunan sert partiküllerin sebep olduğu aşınma iken ikincisinde ise farklı iki malzeme arasına giren sert partiküller aşınmaya sebep olmaktadır (Özkeklik, 2013).



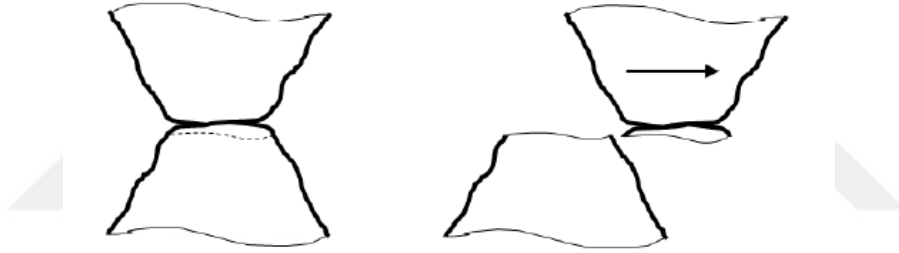
Şekil 4.3. Abrazif aşınma şematik gösterimi (Holmberg ve Matthews, 2009)

Çok hızlı gerçekleşen ve çabuk ilerleyen bir aşınma mekanizması olduğundan dolayı büyük kayıplara sebebiyet vermemesi için önlem alınması gerekir (Özkeklik, 2013). Abrazif aşınmanın engellenmesi için yüzey sertliklerinin artırılması, yağlayıcı kullanımı, yüzey kaplaması gibi uygulamalar kullanılabilir (Türküz, 2006).

4.2.2. Adhesif Aşınma

Soğuk şekillendirme işlemlerindeki en baskın aşınma mekanizması adhesiv aşınmadır. Sac metal şekillendirme işlemlerinde yapışma aşınması olarak da geçen adhesif aşınma şekillendirme proseslerinde kritik rol oynamaktadır (Podgornik ve Leskovšek, 2015).

Bu aşınma mekanizmasında temas eden yüzeylerde bulunan pürüzlerin yüksek kuvvetlerde plastik deformasyona uğraması sonucu yerel yapışma (mikro kaynak) gerçekleşir. Yüzeylerin kayar hareketiyle bu pürüzlerin kırılarak yüzeyler arasında geçici veya kalıcı malzeme transferine adhesif aşınma denir (Carlsson, 2005; Aktaş, 2014). Şekil 4.4'te adhesif aşınma şematik olarak gösterilmektedir. Sac metal şekillendirmede kalıp/takım malzemesi üzerinde kalıcı olarak gerçekleşen malzeme transferine sıvanma/sarma denmektedir (Özkeklik, 2013).



Şekil 4.4. Adhesif aşınma şematik gösterimi (Nilsson, 2012)

Malzemelerin adhesif aşınmaya direncinin olması için yüzeyin sert olmasıyla birlikte yeterli sünekliğe sahip olması, düşük yüzey pürüzlülüğüne ve düşük sürtünme katsayısına sahip olması gerekir. Aşınmanın engellenmesi için yağlayıcı kullanımı, kaplama uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır (Podgornik ve Leskovšek, 2015).

4.2.3. Tribokimyasal Aşınma

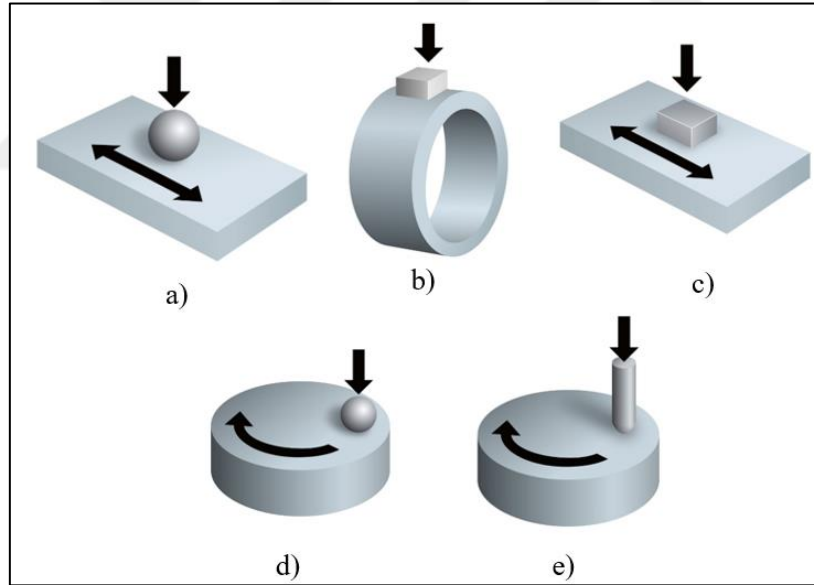
Tribokimyasal aşınma birbiriyle temas eden yüzeylerden herhangi birinde çevresel koşullardan, yağlayıcı vb. maddelerden dolayı kimyasal reaksiyon gerçekleşmesiyle malzeme yüzeylerinde oluşan aşınmadır. Kimyasal etki kendi başına bir aşınma mekanizması olmayıp diğer aşınma mekanizmalarıyla ortak hareket etmektedir. Sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle oluşan ısı aşınmanın oluşmasında tetikleyici rol oynar (Carlsson, 2005; Masen, 2004; Yalçın, 2021).

4.2.4. Yorulma Aşınması

Yüzeyde oluşan tekrarlı yüklemeler sonucunda yüzey tabakasının altında oluşan mikro çatlağın devam eden süreçte yayılarak yüzeye ulaşması ve malzeme kaybı gerçekleştirmesi olayına yorulma aşınması denir. Daha çok rulo gibi tekrarı döner hareket yapan mekanizmalarda gerçekleşir. Çoklu aşınma mekanizmalarında malzemeye düşük yük uygulansa dahi bu aşınma gerçekleşebilir. Yüzey sertleştirme uygulamalarıyla yorulma aşınmasının önüne geçilebilir (Aktaş, 2014; Nilsson, 2012; Türküz, 2006).

4.3. Aşınma Test Düzenekleri

Aşınma testleri yaygın olarak temas sonucu oluşan aşınmanın simüle edilmesi için kullanılmaktadır. Çeşitli kontak temasları için birçok aşınma testi geliştirilmiştir. Testlerde bilye, pin veya düzlemsel malzeme kullanılabilmektedir. Temas çeşitleri noktasal, çizgisel veya düzlemsel olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 4.5. Aşınma test şemaları a) ball-on-plate b) block-on-ring c) block-on-plate d) ball-on-disk e) pin-on-disk (https://www.face-kyowa.co.jp/english/en_science/en_what_friction.html)

Ball on plate testinde sabit düzlemsel malzeme üstünde üzerine yük uygulanmış bilyenin ileri geri hareketiyle düzlemsel malzemede aşınma gerçekleştirilmektedir (Şekil 4.5a). Block on ring testinde dönen silindirik malzemenin üzerine düzlemsel malzeme baskısı gerçekleştirilerek test gerçekleştirilir (Şekil 4.5b). ‘Block on plate’ testinde ileri geri

hareketli düzlemsel temas mevcuttur (Şekil 4.5c). Düzlemsel malzeme üzerine belirli bir yük uygulanır. Alttaki malzeme ileri geri hareket eder ve aşınma gerçekleşir. ‘Ball on disk’ testinde disk malzemesi rotasyonel hareket eder (Şekil 4.5d). Üzerine yük uygulanmış sabit bilye ile aşınma gerçekleştirilir. Son olarak ‘pin on disk’ test yönteminde üzerine belirli bir yük uygulanmış sabit pin disk üzerine basıtırılır (Şekil 4.5e). Disk malzemesi rotasyonel hareket yapar ve aşınma gerçekleştirilir. Test koşullarında malzeme, uygulanan yük, yağlama durumu, bağıl kayma hızı, atmosfer koşulları, sıcaklık, mesafe belirlenmesi gereken test parametrelerdir (ASTM, 2005). Uygulanan test sonucunda numune ve bilye, pin veya düzlemsel malzeme üzerindeki aşınma izlerinin incelemesi yapılarak aşınma hacimleri hesaplanabilir. Ya da her iki malzemedeki ağırlık değişimleri ölçülerek aşınma miktarı hesaplanabilmektedir. Bu test yöntemleri dışında da birçok test yöntemi mevcuttur. ‘Ball on plate’ testiyle aşınma hacimlerinin hesaplanabileceği gibi kinetik sürtünme katsayısı da hesaplanabilmektedir (ASTM, 2005).

5. TASARIM, MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada sac metal şekillendirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan 1.2379 (AISI D2) soğuk iş takım çeliği kalıp malzemesi olarak seçilmiştir. Kalıp malzemesi üzerine farklı PVD kaplamalar yapılmıştır. Malzemelerin aşınma ve kaplama adhezyon testleri gerçekleştirilerek değerlendirilmesi yapılmıştır.

Derin çekme işleminde kaplama performansını incelemek için tasarım ve simülasyonu yapılan kalıpların üretimi gerçekleştirilmiştir. Derin çekme sürecinde şekillendirme süresince uygulanan kuvvet ve yer değiştirme miktarları kayıt edilerek şekillendirme esnasında elde edilen maksimum kuvvet, toplam şekillendirme enerjisi değerleri ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre kaplama performansları değerlendirilmiştir.

5.1. Malzeme Seçimi

Sac metal şekillendirme uygulamalarında endüstride yaygın olarak kullanılan yüksek aşınma dayanımına sahip, ısıtıl işlem sırasında yüksek kararlılık gösteren, sertleştirme ve kaplama uygulamalarının kolaylıkla uygulanabildiği 1.2379 (X153CrMoV12) soğuk iş takım çeliği deney malzemesi olarak seçilmiştir.

Tablo 5.1. 1.2379 takım çeliği adlandırma (arascelik.com.tr/urunler/soguk-is-takim-celikleri/12379/11)

Malzeme	AISI	ISO	JIS
1.2379	D2	X153CrMoV12	SKD 11

Tablo 5.2. 1.2379 takım çeliği kimyasal bileşimi (%) (arascelik.com.tr/urunler/soguk-is-takim-celikleri/12379/11)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1,55	0,5	0,4	11,5	0,8	0,8

Kalıp malzemelerine kaplama uygulamalarının yapılması için 1.2379 malzemedan kupon numuneler üretilmiştir. Numune boyutları 25x25x5 olarak seçilmiştir. Malzemeler ilk olarak bu boyutlardan biraz fazla olacak şekilde işlenmiştir.



Şekil 5.1. 1.2379 malzeme kupon numuneler

Derin çekme işlemi ile şekillendirilmek üzere sac şekillendirmede yaygın olarak kullanılan DD13 (Erdemir 6224 kalite) malzeme seçilmiştir. Sac malzeme lazerde Ø60 mm ölçüsünde kesilmiştir.

Tablo 5.3. DD13 malzemesi kimyasal bileşimi (%) (<https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files>)

Malzeme	EN	C max.	Mn max.	P max.	S max.
DD13	10111:2008	0,07	0,35	0,025	0,025

5.2. Isıl İşlem

Soğuk şekillendirmede kullanılan 1.2379 soğuk iş takım çeliği malzemesinin dayanım ve sertliğini arttırılması için malzemelere ısıtılma işlemi uygulanmaktadır. İstenilen sertlik, tokluk ve dayanımın elde edilmesi için deneyde kullanılacak olan kupon numunelere Steeltech firmasında vakum fırınlarında ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Numunelere 54-58 HRC sertliğe gelecek şekilde özel ısıtılma işlemi (yüksek sıcaklık temperi) yaptırılmış ve sertleştirilmiştir.

Isıl işlem için ilk olarak parçalar vakum fırınına yerleştirilmiştir. Malzemelere ilk önce 3 kez farklı sıcaklıklarda ön ısıtılma yapılmıştır. Daha sonra malzeme sıcaklığı 1020-1080°C ye gelene kadar ısıtılmış ve 20-60 dk arası fırında bekletilerek malzemelerin östenit fazına geçişi sağlanmıştır. Yeterli beklemeden sonra fırın alt ve üst kısmından malzeme yüzeyine homojen olarak 3-5 bar aralığında azot gazı püskürtülerek malzemelerin soğuması sağlanmıştır. Soğuyarak sertleşen ve içyapıda gerilimi bulunan gevrek

malzemelerin tokluğunun artırılması için 2 kez altıyar saat menevişleme (temperleme) işlemi uygulanmıştır. Son olarak malzeme 1,5-2 bar azot gazı ile sıcaklığı 80 °C'ye gelene kadar soğutulmuş ve vakum fırınından çıkarılmıştır. Aynı ısıtım işlem adımları derin çekme setindeki dişi ve erkek kalıplara da uygulanmıştır.

Tablo 5.4. 1.2379 Soğuk iş takım çeliğine yapılan ısıtım işlem adımları

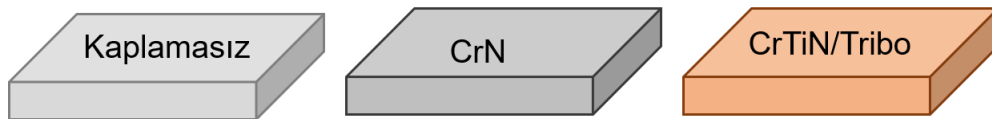
Malzeme	Ön Isıtma	Östenitleştirme	Sertleştirme	Temperleme
1.2379	<u>Ön Isıtma I</u> 400-450°C 30-60dk	1020-1080°C 20-60dk	3-5 bar Azot gazı	<u>Temperleme I</u> 500-550°C 6 saat
	<u>Ön Isıtma II</u> 600-650°C 30-60dk			<u>Temperleme II</u> 500-550°C 6 saat
	<u>Ön Isıtma III</u> 800°C 30-60dk			

5.3.Yüzey İşlem Uygulaması

Numunelere ısıtım işleminden sonra numune yüzeylerine hassas taşlama ve polisaj işlemi yapılmıştır. Numune ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değeri 0,08 mikron düzeyine indirilmiştir. Daha sonrasında numunelere PVD kaplama uygulaması yapılmıştır.

5.4. PVD Kaplama

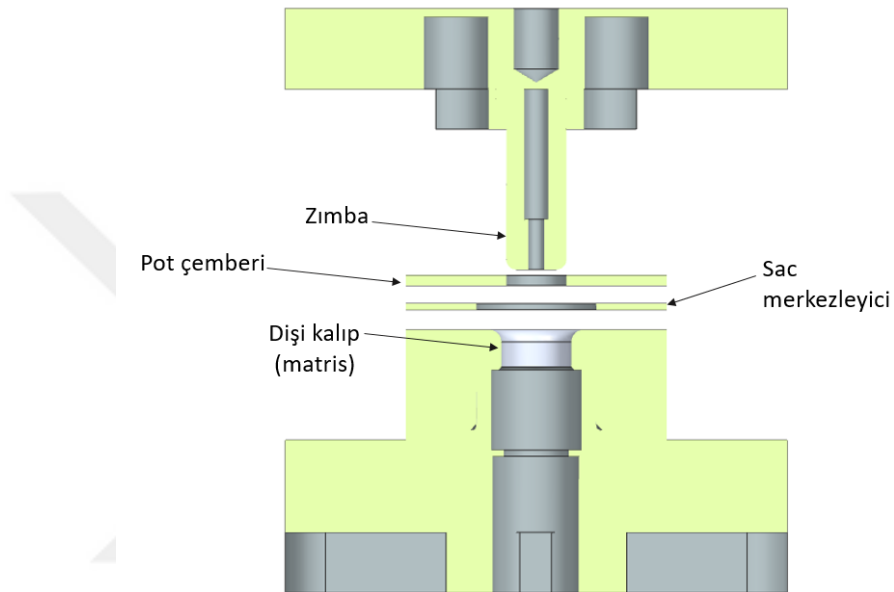
Numunelere Titanit Ulta Sert PVD Kaplamalar San. Tic. Ltd. Şti. tarafından katodik ark biriktirme PVD yöntemiyle iki farklı kaplama uygulanmıştır (Şekil 5.2). Bu kaplamaların ilki Moldex (CrN bazlı) geleneksel kaplamadır. Diğer kaplama ise TÜBİTAK TEYDEB projesi kapsamında derin çekme için özel olarak geliştirilmiş nanoteknolojik PVD kaplamadır. Bu kaplama Potenta Tribo (CrTiN+Tribo bazlı) kaplama olarak geçmektedir (<https://www.titanit.com.tr/pvd-kaplama/>).



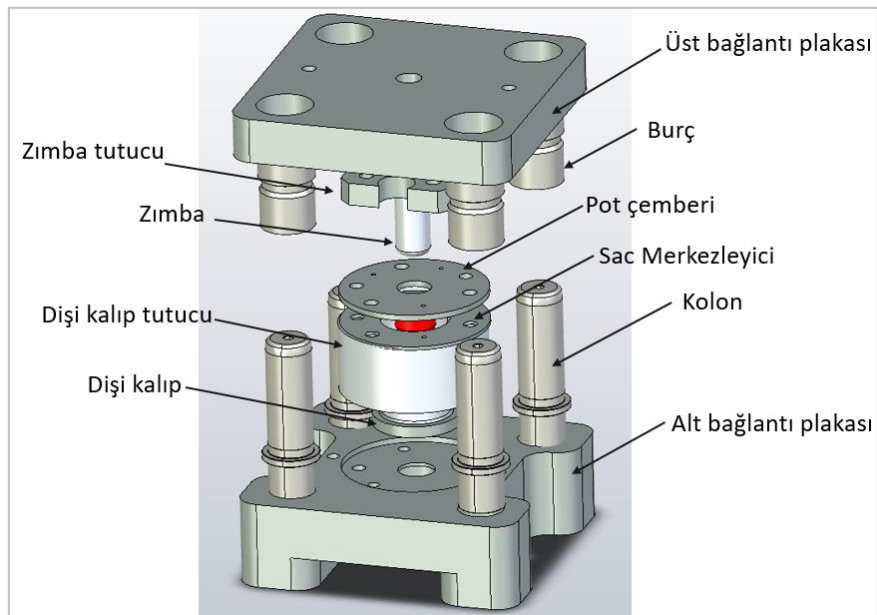
Şekil 5.2. Numunelerin şematik gösterimi

5.5. Deney Tasarımı, Simülasyonu ve Üretimi

Derin çekme işlemini simüle ederek silindirik kap üretimini sağlayacak kalıp tasarımı Siemens NX programında yapılmıştır. Şekillerde de görüleceği gibi derin çekme deney setinin temel elemanları Şekil 5.3'te verilen kesit görüntüsüne belirtilen zımba (punch), dişi kalıp (matris), pot çemberi, sac merkezleyicidir. Şekil 5.4'te da deney setinin detaylı olarak elemanları gösterilmiştir.

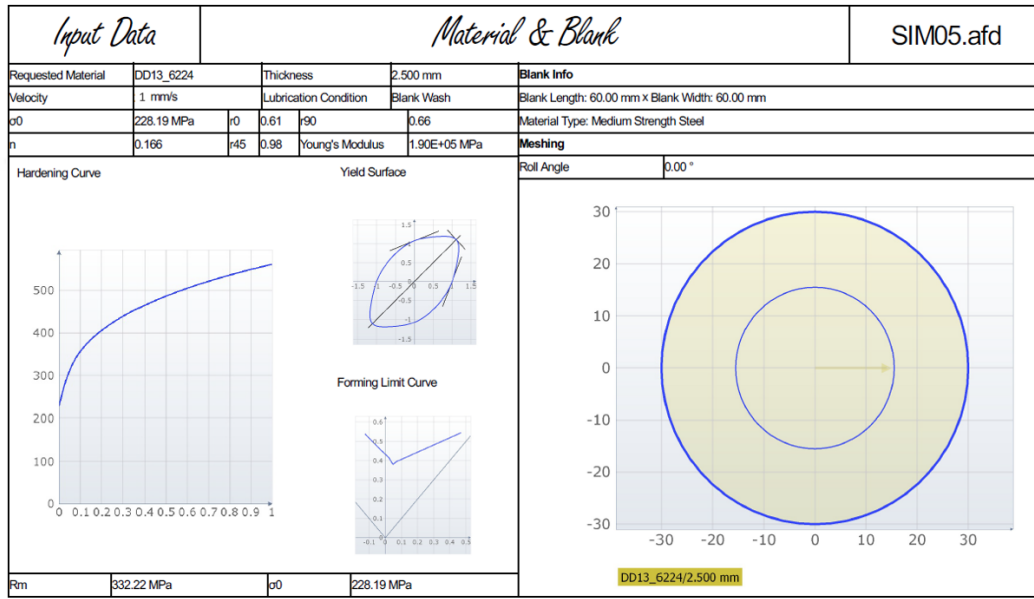


Şekil 5.3. Deney seti kesit görüntüsü

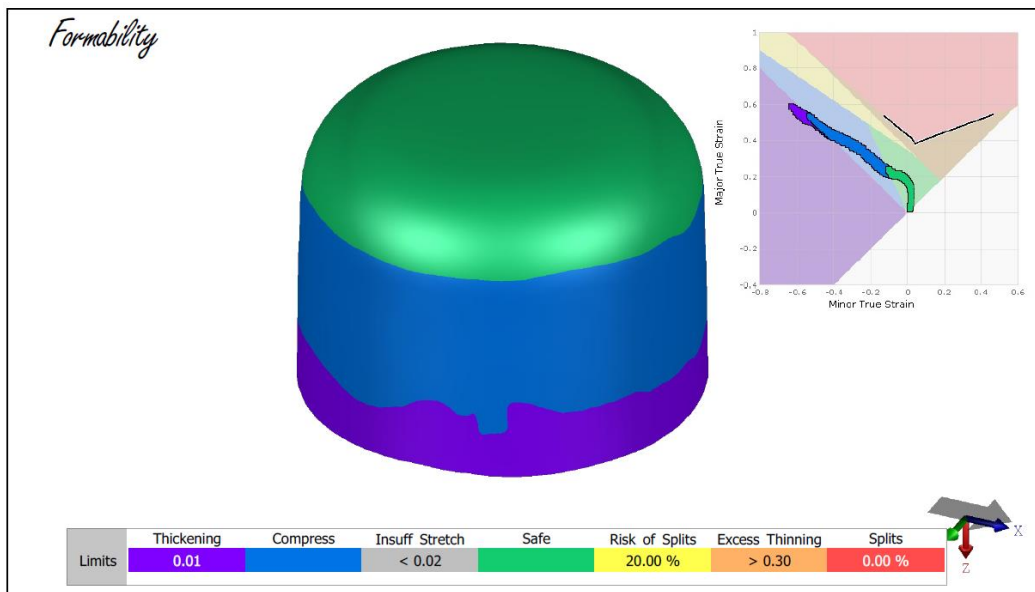


Şekil 5.4. Deney seti tasarımı

Deney seti tasarımı sonrasında parçanın şekillendirilebilirliğinin incelenmesi için sac metal şekillendirmede yaygın olarak kullanılan AutoForm simülasyon programı ile deney parametreleri simüle edilmiştir. Sacın şekillendirilebilirliğinin net şekilde görülebilmesi için AutoForm programında “Blank Wash” yağsız durumda Ø60 DD13 sac malzeme, Ø30 zımba çapı, Ø35 dişi kalıp çapı, R6 eğrilik yarıçaplarında, pot çemberi etkisi kullanılarak 1 mm/s çekme hızında sacın şekillendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.5’te simülasyon test parametreleri gösterilmektedir.



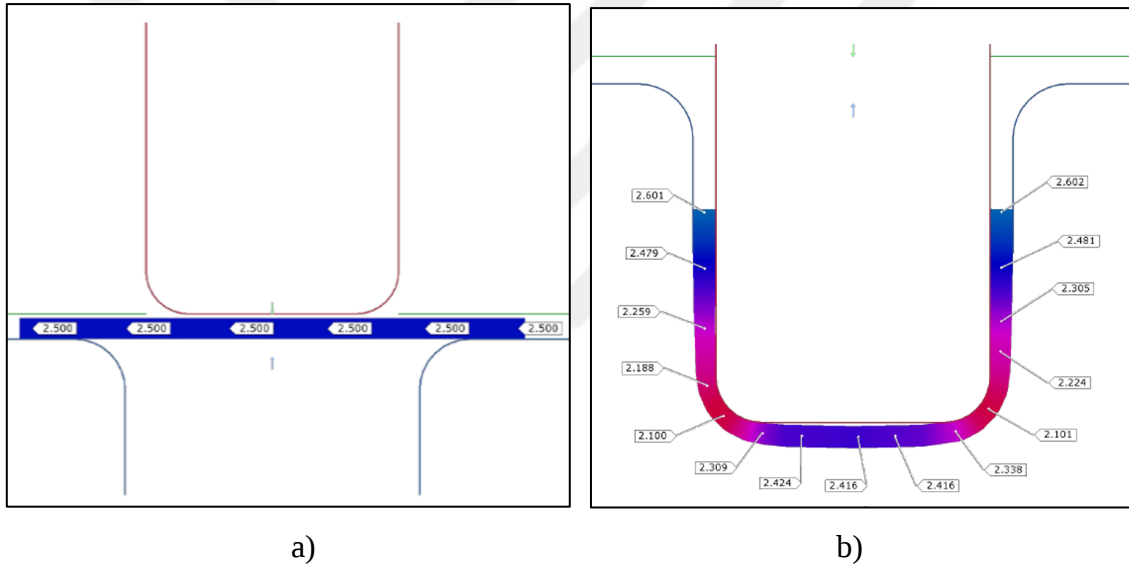
Şekil 5.5. AutoForm test parametresi



Şekil 5.6. AutoForm şekillendirme simülasyon sonuçları

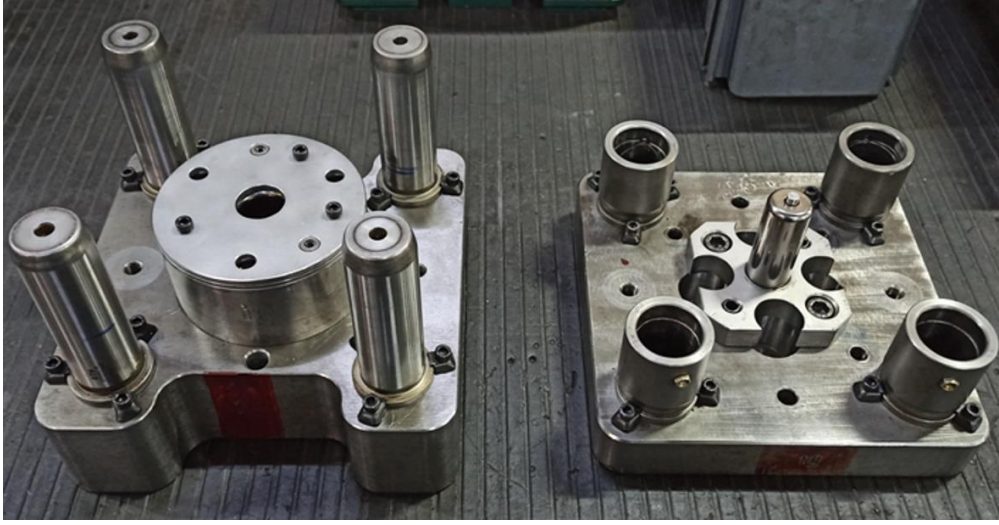
Simülasyon şekillendirme diyagramına (Şekil 5.6) bakıldığında 2,5 mm'lik sac malzemenin mevcut kalıp geometrisinde yırtılmadan şekillendirilebileceği görülmektedir.

AutoForm simülasyonunda parça şekillendirilmesi öncesi kalınlık dağılımı şekildedeki (Şekil 5.7a) görüldüğü gibi tüm noktalarda sabittir. Şekillendirme gerçekleşip parça nihai formunu aldığı anda kesit alınmış kalınlık dağılımına (Şekil 5.7b) bakıldığında parçanın kenar kısımlarında kalınlaşma gerçekleştiği, zımbanın temas ettiği parçanın orta kısmında nispeten incelme gerçekleştiği ve en fazla incelmenin radyus kısımlarında olduğu görülmektedir. Test parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonucunda parçanın şekillendirme sonucu elde edilen sınır diyagramı incelenmiştir.

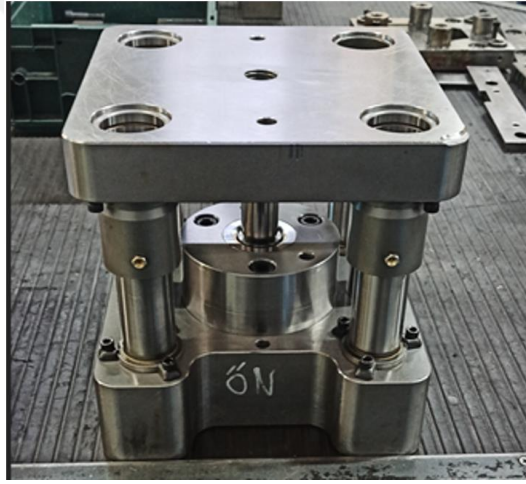


Şekil 5.7. AutoForm simülasyonu kalınlık dağılımı a) şekillendirme başlangıcı b) şekillendirme sonu

İnceleme sonucunda Ø60 2,5 mm DD13 malzeme kullanılarak gerçekleştirilecek derin çekme işleminde parçada herhangi bir buruşma veya yırtılma gerçekleşmeyeceği görülmüştür. Deney seti tasarımının üretilebilirliği onaylanmıştır. Tasarlanan ve simülasyonu yapılan deney setinin imalatı gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da imalatı gerçekleştirilen deney setinin açık ve kapalı haline ek olarak sac merkezleyici ve pot plakası görülmektedir. Sac merkezleyici ile dairesel kesilmiş parça merkezlemesi, pot plakası ile malzemenin homojen olarak şekillendirilmesi sağlanır.



Şekil 5.8. İmal edilen deney seti (açık)



a)



b)



c)

Şekil 5.9. a) İmal edilen deney seti (kapalı) b) pot plakası c) sac merkezleyici

Derin çekme ile şekillendirilecek sac malzeme 60 mm çap 2,5 mm kalınlık ölçülerine sahiptir. Malzemenin şekillendirilmesini sağlayan zımba 30 mm çapında 90 mm uzunluğunda imal edilmiştir. Zımbanın eğrilik yarıçapı 5 mm'dir. Dişi kalıp iç çapı 35 mm boyu 60 mm eğrilik yarıçapı 6 mm'dir. Literatürde zımba ve dişi kalıp arası boşluğun sac kalınlığının minimum 1.1 katı olması istenmiştir (Yalçın, 2021). Fakat yapılan derin çekme denemelerinde kaplama performansının daha iyi görülebilmesi için sacın sıvanmasına izin verecek ölçüde kalıp boşluğu ayarlanmıştır. Kalıp boşluğu 2,5 mm olacak şekilde zımba ve dişi kalıp ölçüleri belirlenmiştir. Şekil 5.10'da zımba ve dişi kalıp görülmektedir.



Şekil 5.10. Zimba ve dişi kalıp

Dişi kalıbın test cihazına bağlanması için alt bağlantı tablası imal edilmiştir. Dişi kalıp dişi kalıp tutucu içerisine yerleştirilerek kalıp tutucu vasıtasıyla 3 adet M12 cıvata kullanılarak alt bağlantı tablasına sabitlenir. Dişi kalıp tutucu üzerine 3 mm ortasında Ø60 mm delik olan sac merkezleyici yerleştirilmektedir. Sac merkezleyicinin delik kısmına sac malzeme (iş parçası) yerleştirilir. Daha sonra kalınlığı 5 mm ortasında zımbanın geçişini sağlayan Ø30 mm boşluk bulunan Hardox malzemedan üretilmiş pot plakası sac merkezleyici ve iş parçası üzerine yerleştirilir. Pot plakası ve sac merkezleyicinin eksende sabit kalmasını dişi kalıp tutucuda var olan M12 merkezleme pimleri sağlanmaktadır. Pot plakası dişi kalıp tutucuya 3 adet M6 cıvata ile sabitlenmektedir.

Test cihazının üst tarafına deney setinin bağlanması için üst bağlantı plakası yer almaktadır. Zimba, zimba tutucu vasıtasıyla M12 cıvata ve M12 merkezleme pimi ile üst bağlantı plakasına sabitlenir. Üst ve alt deney setinin merkezlenmesi burç ve kolonlar ile sağlanmaktadır.

5.6. Testler

Aşağıda belirtilen kaplamasız ve katodik ark PVD yöntemiyle kaplanan numunelerin kaplama adhezyon ve aşınma testleri, yüzey incelemeleri TÜBİTAK TEYDEB projesi kapsamında Titanit Ulta Sert PVD Kaplamalar San. Tic. Ltd. Şti. firması tarafından gerçekleştirilmiştir.

5.6.1. Kaplama Adhezon Testi

Kaplama adhezyonu 150 kg. Rockwell-C indentasyon yöntemiyle ölçülmüştür.

5.6.2. Aşınma Testleri

Kaplamanın performansının belirlenebilmesi için aşınma simülasyon deneylerinde Şekil 5.11’de verilen (Deniz Harp Okulu) Makine Fakültesi Triboloji Laboratuvarında bulunan ASTM G133 ball-on-flat test yöntemi standardına uygun olan UTS marka reciprocating tipi tribometre kullanılmıştır. Bu test yönteminde düz numune üzerine bilyenin belirli bir kuvvetle bastırılarak ileri geri hareket etmesi sağlanır ve numune üzerinde aşınma gerçekleştirilir (Karabaşoğlu, 2008). Test oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıkta yağlı veya yağsız gerçekleştirilebilmektedir. Çalışma kapsamında kaplamanın performansı değerlendirileceği için kuru sürtünme koşullarında oda sıcaklığında testler gerçekleştirilmiştir. Test sırasındaki alınan verilerle sürtünme katsayısı değişimleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.11. Deneysel çalışmada kullanılan UTS marka reciprocating tipi tribometre

İlk yapılan kaplamasız ve CrN kaplama için 10 mm. çapında 304 paslanmaz çelik bilye ile 6 Newton normal yükte aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. 100 metre mesafeli reciprocating tipi aşınma simülasyon deneyleri yapılmıştır.

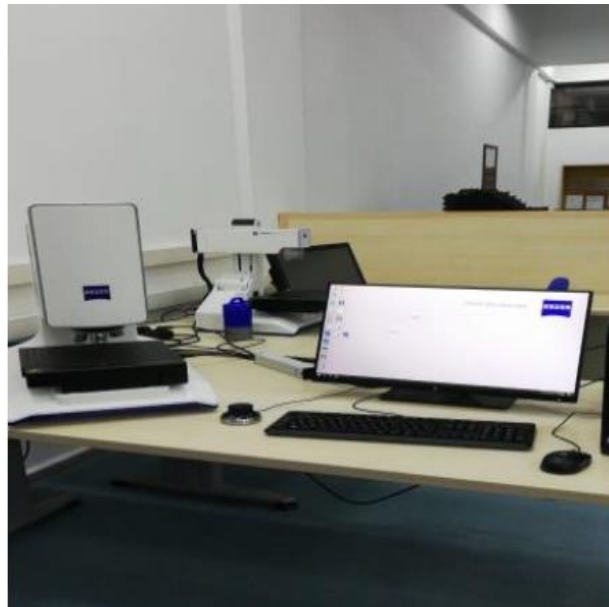
Derin çekme prosesinde ağır basınçlar altında sac şekillendirme sırasında hem adhesif (yapışmalı) hem de abrazif (kazımalı) aşınma mekanizmaları baskın olduğu için daha sonra gerçekleştirilen kaplamalı numunler için (CrN ve CrTiN+Tribo kaplama) aşınma deney tasarımı iki farklı yükte abrazif aşınma, iki farklı yükte de adhesif aşınma koşulları simüle edilmiştir. Tablo 5.5.’te test parametreleri verilmiştir.

Tablo 5.5. Aşınma testi parametreleri

Parametre	Uygulanan Değer
Modül Hareket Hızı	30 mm/sn.
Hareket Genliği (Stoke)	5 mm.
Aşınma süresi (Dakika)	56 dakika abrazif aşınma 28 dakika adhesif aşınma
Kayma Mesafesi (Metre)	100 metre abrazif aşınma 50 metre adhesif aşınma
Aşındırıcı Bilye	Çap 10 mm. Seramik (Alümina) bilye (Abrazif aşınma) Çap 10 mm. yumuşatılmış 1010 çelik bilye (Adhesif aşınma)
Normal Yük (Newton)	15 N ve 30 N (Seramik bilye) (Abrazif aşınma) 6 N ve 10 N (Çelik bilye) (Adhesif aşınma)
Veri Toplama Hızı	10 Hz (10 veri/sn.)

5.6.3. Aşınma Yüzeyi İncelemesi

Aşınma testlerinden sonra aşınma hacim ölçümleri verilen (DHO) Makine Fakültesi Triboloji Laboratuvarında bulunan Zeiss marka 3 boyutlu optik profilometre kullanılmıştır.



Şekil 5.12. Deneysel çalışmada kullanılan Zeiss marka optik profilometre

5.6.4. Derin Çekme Kalıp Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Tasarımı gerçekleştirilen kalıbın üretiminden sonra kaplama öncesi ve sonrası kalıp pürüzlülük değerleri Şekil 5.13'te görülen Ulus Metal San. ve Tic. A.Ş. de bulunan SJ-210 model yüzey pürüzlülük cihazıyla ölçülmüştür.



Şekil 5.13. Mutituyo SJ-210 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

5.6.5. Kalınlık Ölçümü

Deney sonucunda üretilen parçaların kesitleri alındıktan sonra kesit kalınlık ölçümleri için görüntülem HP Scanjet G4010 tarama cihazıyla taranmış daha sonrasında taranan görüntülerden kalınlık ölçümü Stream Start programı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.14).

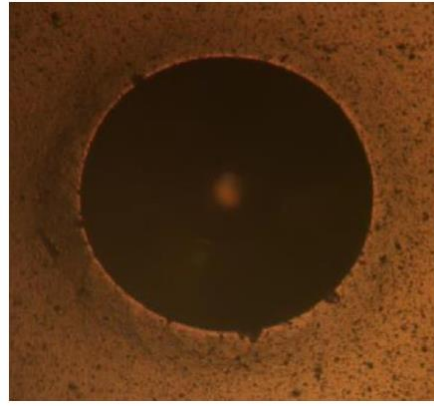


Şekil 5.14. Kalınlık ölçümü a) görüntü tarama cihazı b) program ekran görüntüsü

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Kaplamasız ve CrN Kaplamalı Numune Test Sonuçları

İlk olarak CrN kaplamanın malzeme üzerine yapışmasının (adhezyon) ölçülmesi için Rockwell-C indentasyon testi kullanılmıştır. ISO26443:2008 standardında belirtildiği gibi küresel çelik ucun alt tabaka yüzeyine 150 kgf kuvvet uygulanmıştır. Test sonucu elde edilen iz literatürde de bahsedilen DIN (Daimler-Benz) VDI 3198 indentasyon standardı baz alınarak değerlendirilmiştir. Şekil 6.1’de CrN kaplamalı numunenin indentasyon izi görülmektedir.

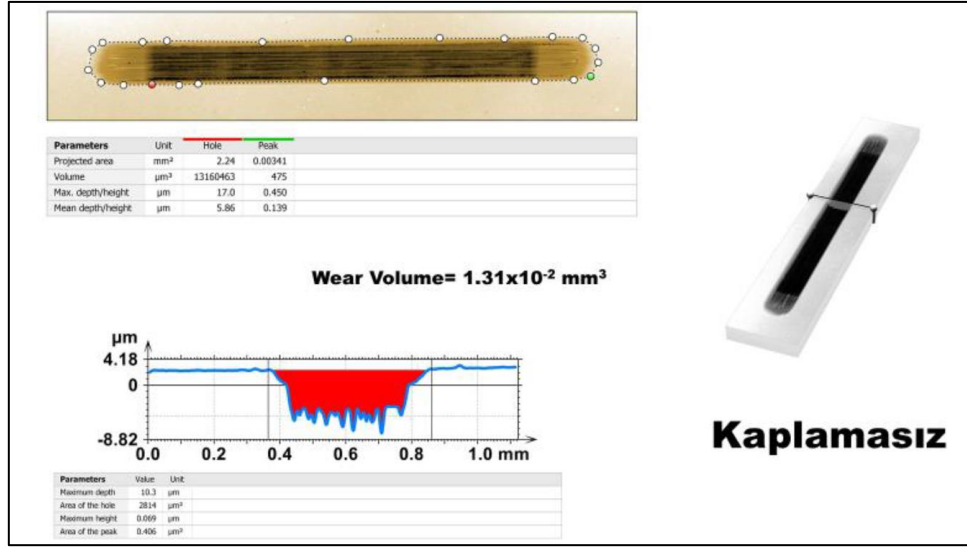


Şekil 6.1. CrN kaplamalı numune indentasyon iz görüntüsü

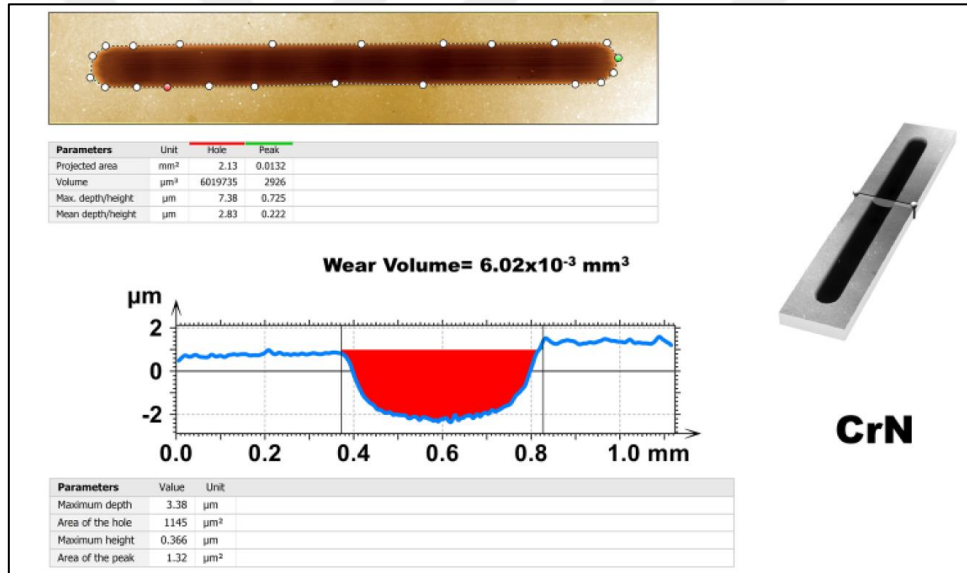
Kapama adhezyonu için gerçekleştirilen Rockwell-C indentasyon testi sonucu elde edilen iz incelendiğinde DIN VDI-3198 numaralı standarda göre HF1-HF2 skalasında olduğu görülmüştür. Taban malzeme ile kaplamanın yapışması oldukça iyi olduğu anlaşılmıştır (Vidakis ve diğ., 2003).

Sonraki aşamada kaplamasız ve CrN kaplamalı 2379 çelik numunelere UTS marka tribometre ile derin çekme proses basınç değeri olarak belirlenen 193 MPa derin çekme basıncında ve kayma gerilmesi değerlerinde yapılan hesaplamalarla birlikte 6 N yükte 100 metre mesafeli reciprocating tipi aşınma simülasyon deneyleri yapılmıştır.

Aşınma deneyleri sonrasında oluşan aşınma izleri Zeiss marka optik profilometre ile ölçülmüş ve aşınma hacimleri belirlenmiştir (Şekil 6.2, 6.3). Kaplamasız kalıp numunesi ve CrN kaplanmış kalıp numunesi üzerindeki izlerin optik profilometre görüntüleri Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’te gösterilmiştir.

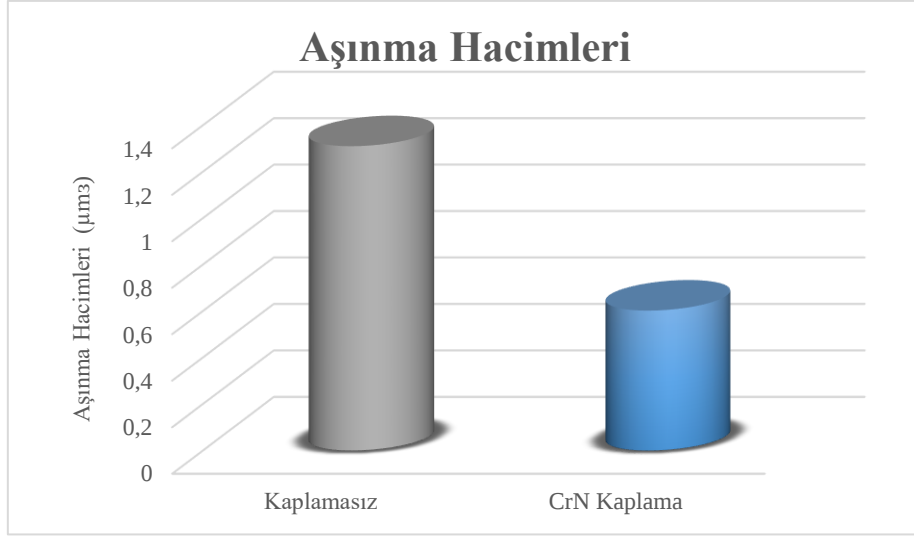


Şekil 6.2. Kaplamasız numune aşınma hacmi ölçümü

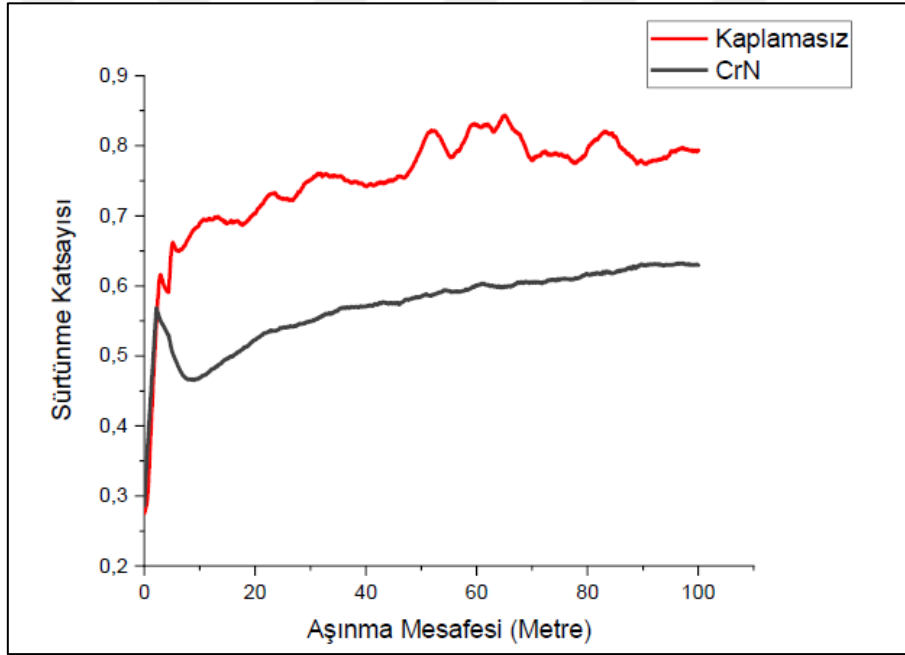


Şekil 6.3. CrN kaplamalı numune aşınma hacmi ölçümü

CrN kaplamalı ve kaplamasız numunelerin aşınma karakteristikleri incelendiğinde (Şekil 6.2 ve Şekil 6.3) şekilde görülen aşınma hacimlerine bakıldığında CrN kaplamanın aşınma hacmi $6,02 \times 10^6 \mu\text{m}^3$, kaplamasız numunede ise $1,31 \times 10^7 \mu\text{m}^3$ hacimde aşınma gerçekleştiği görülmüştür. Kaplamasız numunede aşındırıcı ucun batma derinliği 17 μm, CrN kaplamalı numunede 7,38 μm derinlik oluşmuştur. CrN kaplamada kaplamasız numuneye göre aşınma hacmi %46 oranında daha düşük olduğu görülmüştür. Bunda CrN kaplamanın sürtünme özelliğinin ve yüzey sertliğinin kaplamasız numuneden daha yüksek olmasının etkisi vardır.



Şekil 6.4. Numunelerin aşınma hacimleri kıyaslaması



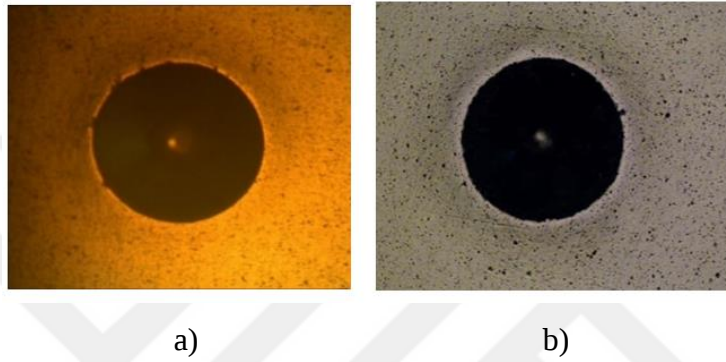
Şekil 6.5. CrN ve kaplamasız kalıp aşınma mesafesine göre sürtünme katsayısı değişimi

Aşınma testi boyunca elde edilen sürtünme katsayısı değişimine bakıldığında kaplamasız numunede kuru koşullarda sürtünme katsayısı 0,8-0,9 aralığında olduğu gözlenmiştir. CrN kaplamalı numunede ise aynı koşullar altında sürtünme katsayısının 0,5-0,6 aralığında olduğu görülmüştür.

Bu veriler sonucunda CrN kaplamalı numune referans alınarak derin çekme prosesi için yeni geliştirilecek olan kaplamanın kıyaslaması yapılacaktır.

6.2. Kaplamalı Numune Test Sonuçları

Kaplamasız kalıpla gerçekleştirilen testler sonucu CrN ve yeni geliştirilmiş nanoteknolojik PVD kaplamalı kalıplar üzerinde aşınma testleri ve kaplama adhezyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Adhezyon ölçümleri için uygulanan 150 kg Rockwell-C indentasyon yöntemiyle elde edilmiş kaplama yüzeyinde oluşan izler incelendiğinde kaplamaların HF1-HF2 aralığında yüksek kalitede yüzey özelliği gösterdiği görülmüştür (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Kaplamalı numune Rockwell-C indentasyon testi iz görüntüleri a)CrN b) CrTiN+Tribo

CrN kaplama kalınlığı 4,2, CrTiN+Tribo kaplamanın kalınlığı ise 6,1 olarak Calotest (bilye ile krater oluşturma) yöntemiyle ölçülmüştür. Kaplama özellikleri Tablo 6.1’de verilmiştir.

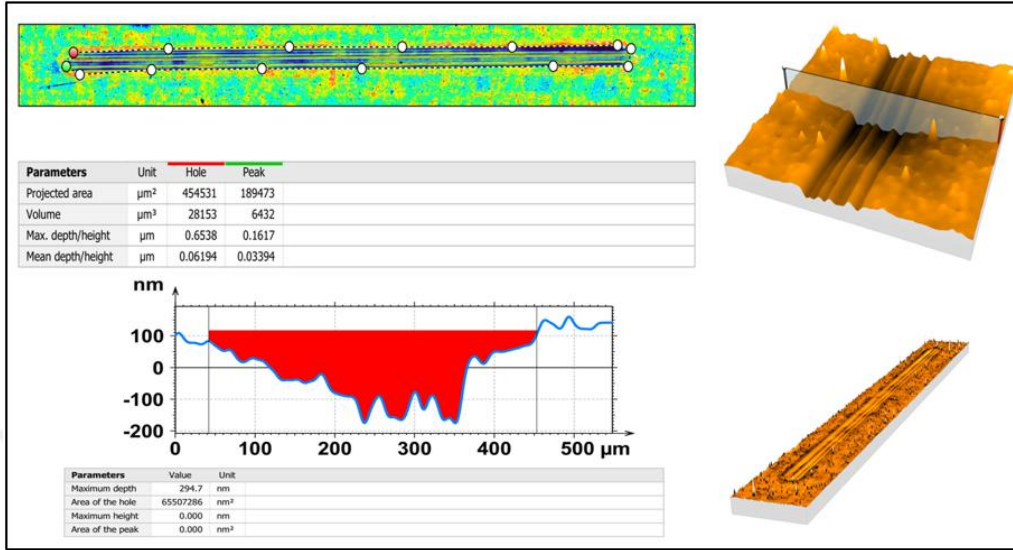
Tablo 6.1. Kaplama Özellikleri

Kaplama	Kalınlık (mikron)	Kaplama Sertliği (GPa)	Kaplama Elastiste Modülü (E*)	Tokluk (H/E) (*10 ⁻²)
CrN	4,2	21,7	377	5,8
CrTiN+Tribo	6,1	37,5	483	7,8

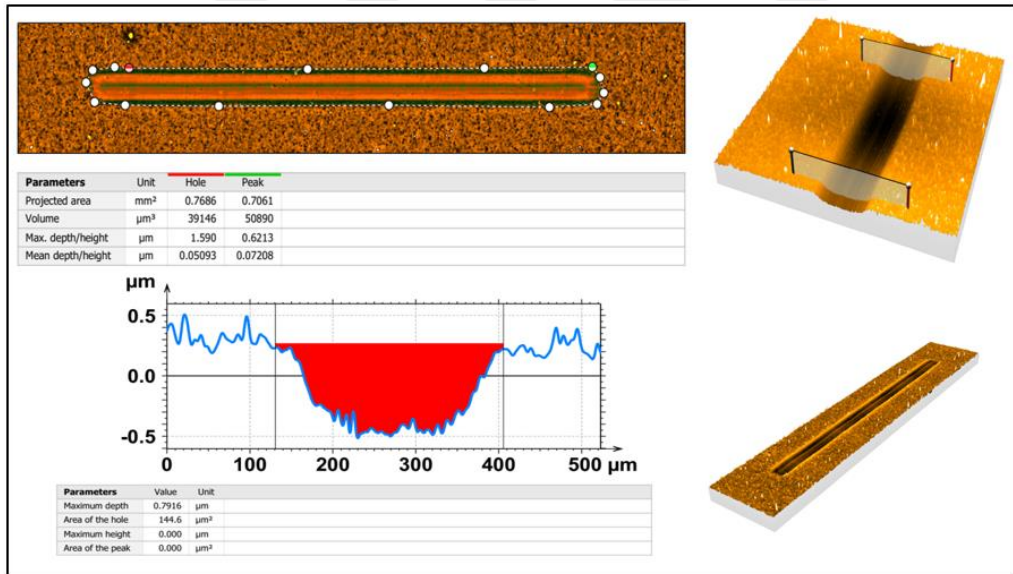
*düzeltilmiş Elastiste modülü

CrN kaplamalı numune referans alınarak yeni nesil geliştirilmiş nanoteknolojik CrTiN+Tribo katmanlı kaplanmış numunelerin adhesif ve abrazif aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. 15 ve 30 N yükte gerçekleştirilen abrazif aşınma, 6 ve 10 N yükte gerçekleştirilen adhesif aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma yüzeyleri optik

profilometre ile incelenmiştir. Aşınma hacimleri ölçümleri yapılarak kaplama performansları değerlendirilmiştir.



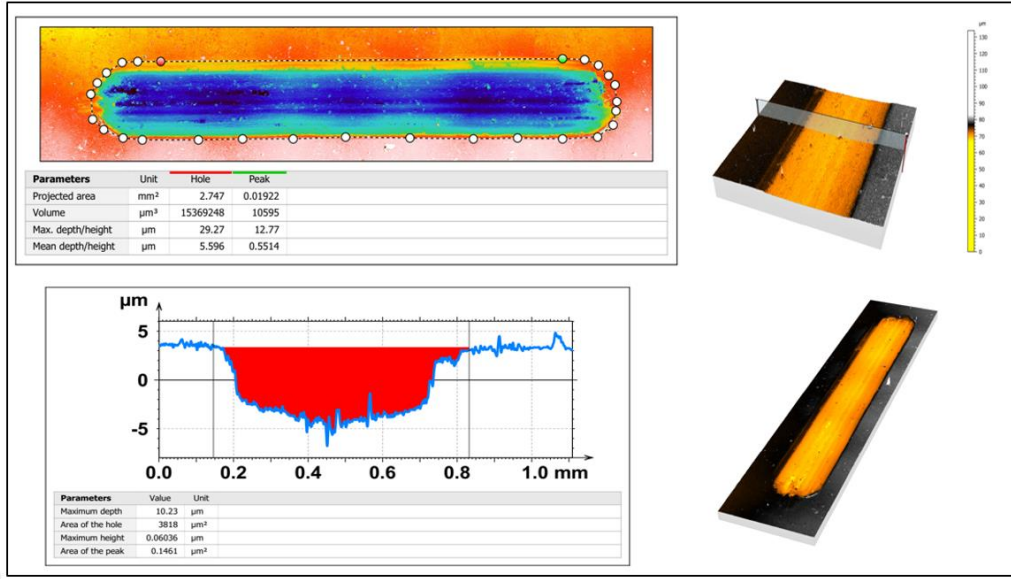
a)



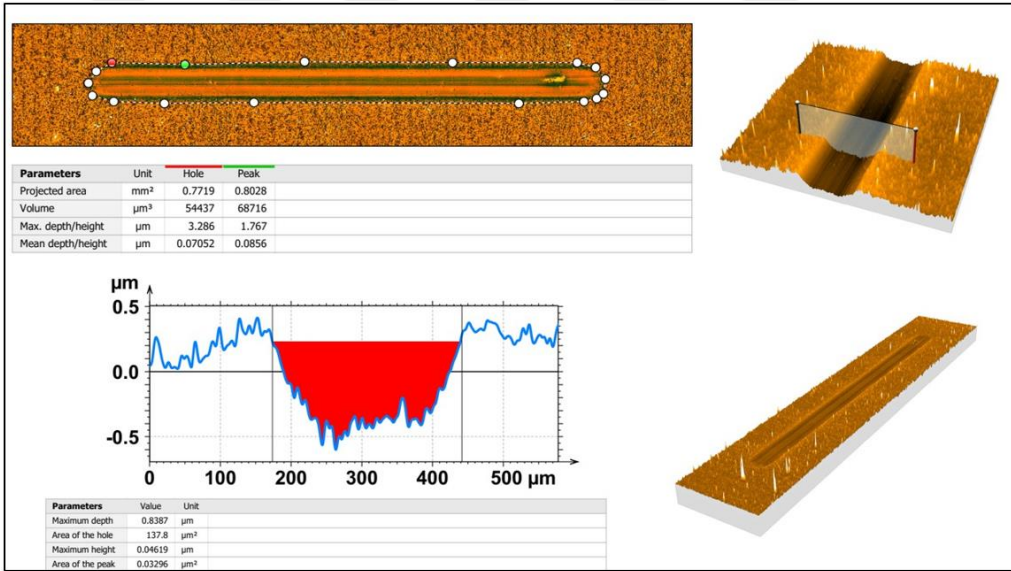
b)

Şekil 6.7. 15 N Yükte abrazif aşınma izlerine ait optik profilometre iz ve kesit görüntüleri a)CrN b) CrTiN+Tribo

Şekil 6.7’de 15 N yükte iki farklı kaplamanın profilometre görüntüleri ve ölçüm sonuçları görülmektedir. Aşınma ölçüm sonucu elde edilmiş profilometre görüntülerinden CrN kaplamada $28 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ hacimde aşınma gerçekleştiği, CrTiN+Tribo kaplamada $40 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ hacimde aşınma gerçekleştiği görülmüştür.



a)

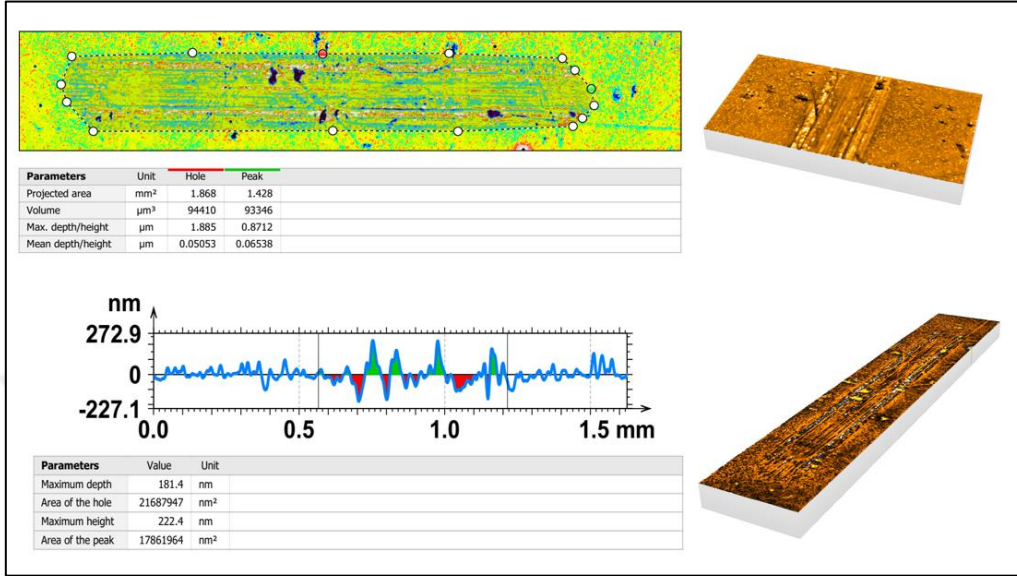


b)

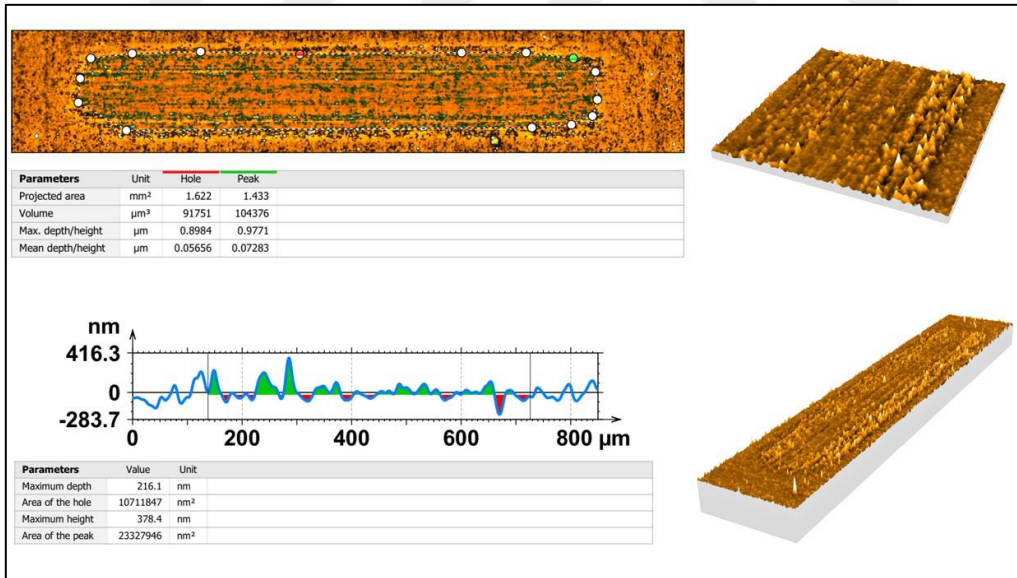
Şekil 6.8. 30 N Yükte abrazif aşınma izlerine ait optik profilometre iz ve kesit görüntüleri
a)CrN b) CrTiN+Tribo

Şekil 6.8’de 30 N yükte iki farklı kaplamanın profilometre görüntüleri ve ölçüm sonuçları görülmektedir. Aşınma ölçüm sonucu elde edilmiş profiometre görüntülerinden CrN kaplamada $1.530 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ hacimde aşınma gerçekleştiği, CrTiN+Tribo kaplamada $55 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ hacimde aşınma gerçekleştiği görülmüştür.

Adhesif (yapışmalı) aşınma testleri 6N ve 10N yüklerde yumuşatılmış 1010 çelik bilye ile 28 dk boyunca 50 metrelik mesafede gerçekleştirilmiştir. Kaplama numuneleri üzerindeki aşınma izleri üzerinden optik profilometre ile ölçülmüştür.



a)

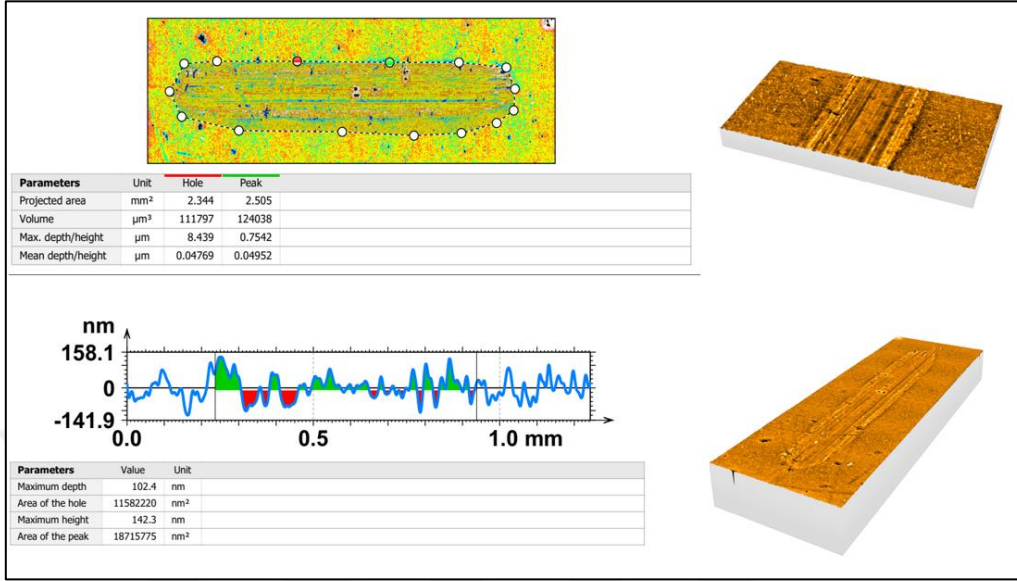


b)

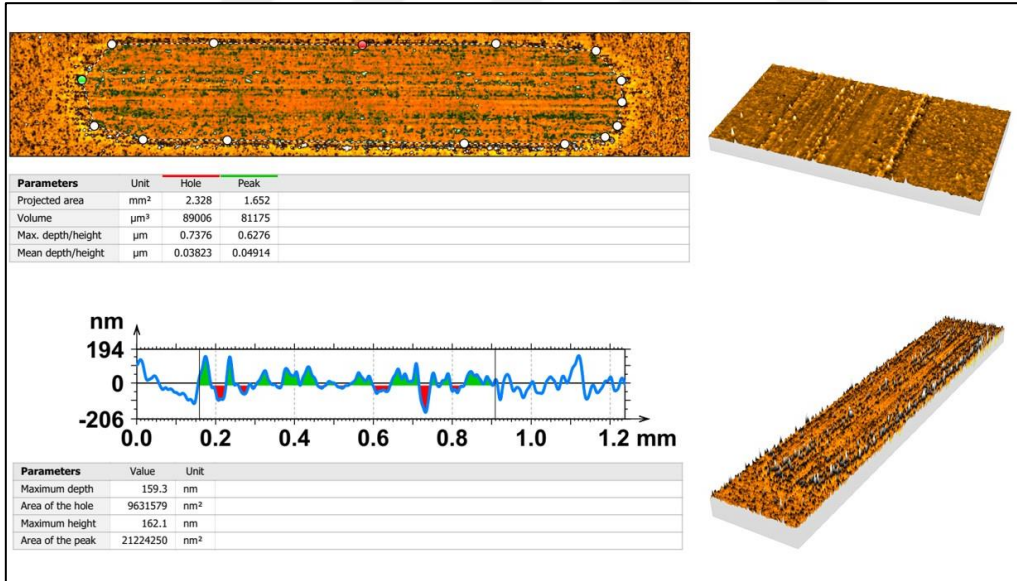
Şekil 6.9. 6 N Yükte adhesif aşınma izlerine ait optik profilometre iz ve kesit görüntüleri
a)CrN b) CrTiN+Tribo

Şekil 6.9'da 6 N yükte iki farklı kaplamanın profilometre görüntüleri ve ölçüm sonuçları görülmektedir. Aşınma ölçüm sonucu elde edilmiş profiometre görüntülerinden CrN

kaplamada $1,87 \times 10^2 \mu\text{m}^3$ hacimde aşınma gerçekleştiği, CrTiN+Tribo kaplamada $1,7 \times 10^2 \mu\text{m}^3$ hacimde aşınma gerçekleştiği görülmüştür.



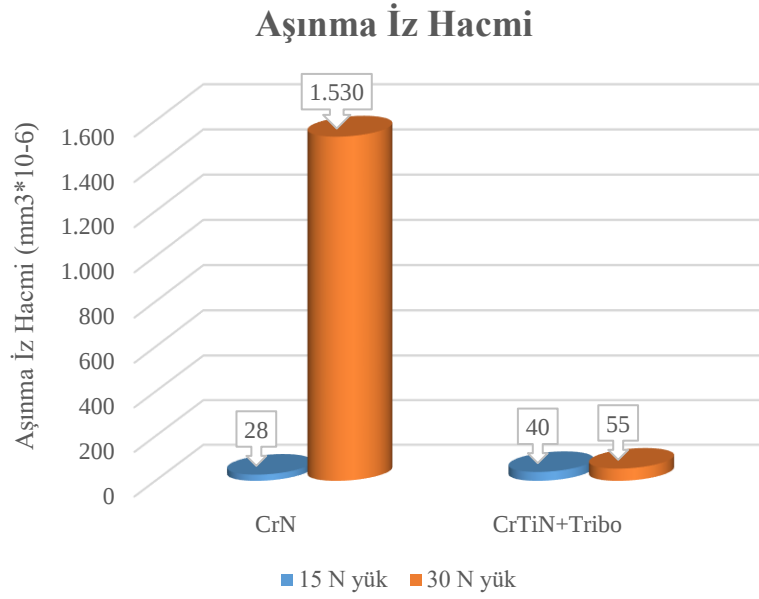
a)



b)

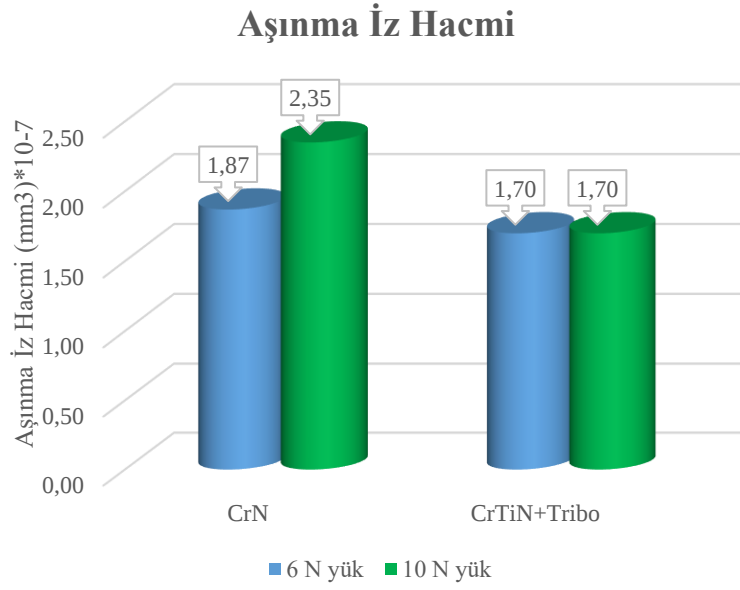
Şekil 6.10. 10 N Yükte adhesif aşınma izlerine ait optik profilometre iz ve kesit görüntüleri a)CrN b) CrTiN+Tribo

Şekil 6.10'da 10N yükte iki farklı kaplamanın profilometre görüntüleri ve ölçüm sonuçları görülmektedir. Aşınma ölçüm sonucu elde edilmiş profiometre görüntülerinden CrN kaplamada $2,35 \times 10^2 \mu\text{m}^3$ hacimde aşınma gerçekleştiği, CrTiN+Tribo kaplamada $1,70 \times 10^2 \mu\text{m}^3$ hacimde aşınma gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 6.11. 15N ve 30N yüklerde abrazif aşınma sonucu elde edilen aşınma iz hacimleri CrN ve CrTiN+Tribo kaplama

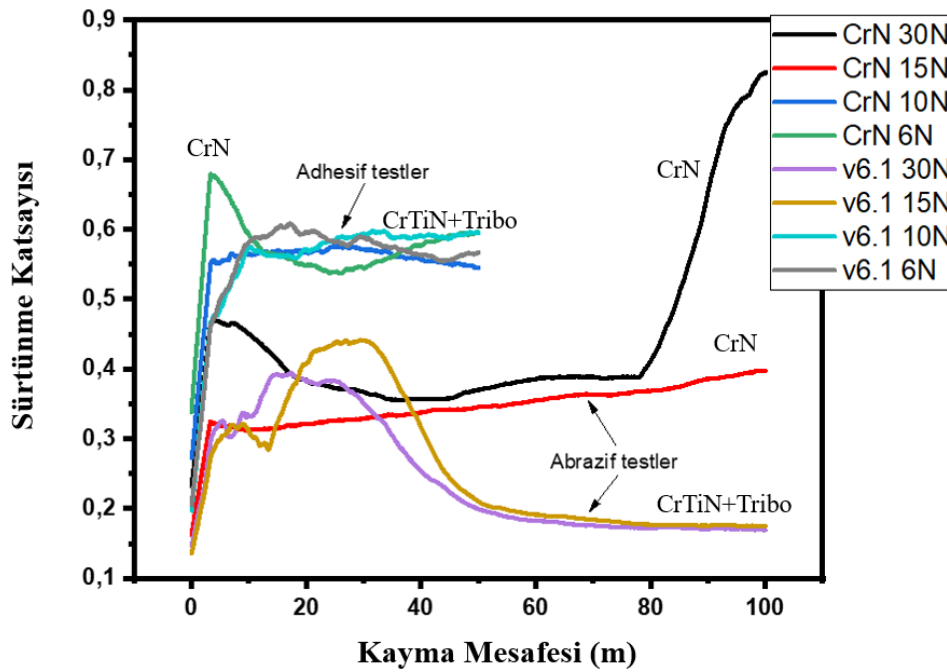
15 ve 30N yüklerde abrazif aşınma sonucu elde edilen aşınma iz hacimlerine bakıldığında (Şekil 6.11) CrN kaplamada özellikle yüksek yükteki abrazif aşınma testinde aşınma oranı yüksek olmuştur. Bu bize CrN kaplamanın yüksek yüklerdeki şekillendirme işlemlerinde kaplamanın hızlı hasara uğrayacağını göstermektedir. CrTiN+Tribo kaplamaya bakıldığında özellikle yüksek yükte gerçekleşen abrazif aşınmada CrN kaplamaya göre 28 kat daha az aşınma hacmi elde edilmiştir ve çok daha iyi performans sergilemiştir. CrTiN+Tribo kaplamanın aşınma değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. CrN kaplamada gerçekleşen yüksek yükte gerçekleşen bu aşınmanın iki farklı sebebi olduğu düşünülmektedir. İlk olarak daha düşük yükte adhesif ilerleyen aşınma yüksek yükte kaplama tabakası ile alt tabaka arasındaki adhezyon etkilerinin ortadan kalkarak kaplamanın delamine olması sonucu aşınma alt tabakadaki malzemede gerçekleşerek daha yüksek aşınma gerçekleşmesi, ikinci olarak delamine olan sert CrN kaplama partiküllerinin aşındırıcı partikül olarak 3 cisimli abrazif aşınmaya sebep olması olarak sıralayabiliriz. Bu iki muhtemel sebepten dolayı CrN kaplamalı malzemede yüksek yükte aşınma hacmi çok daha yüksek olmuştur. Bu sonuçlar bağlamında CrN kaplamanın, düşük şekil verme yüklerinin olduğu form-sıvama kalıpları için görece uygun bir kaplama olduğu, ancak yüksek basınçların ve sürtünme kuvvetlerinin olduğu derin çekme kalıplarında, kalıp üzerinde oluşan abrazif aşınma etkilerine nispeten dayanıksız olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.12. 6N ve 10N yüklerde adhesif aşınma sonucu elde edilen aşınma iz hacimleri

Profilemetre görüntüleri incelendiğinde (Şekil 6.12) adhesif aşınmada iki farklı yükleme durumunda da en fazla aşınma CrN kaplamalı numunede gerçekleşmiştir. Abrasif aşınma testleriyle paralel olarak yüksek yükte gerçekleşen testte CrN numunede aşınma daha hızlı gerçekleşmiştir. CrTiN+Tribo kaplamalı numunede daha az aşınma gerçekleşmiştir. Tüm sonuçlar incelendiğinde yeni nesil geliştirilmiş kaplamada yüksek sertlik, tokluk, iyi adhezyon değeri ve aşınma performansı sağladığı görülmüştür. Adhesif ve abrasif aşınma testleri sonucu CrN ve CrTiN+Tribo kaplamalı numunelerde testler sırasında elde edilen sürtünme katsayısı değişimleri incelenmiştir. Sürtünme katsayısı değişimlerinde adhesif aşınmada iki kaplamanın benzer sürtünme davranışı sergilediği, CrN kaplamada 6N yükteki testte ilk kısımda bir artış olduğu görülmektedir. Bu değerler aşınma hacimleriyle doğru orantılıdır.

Adhesif ve abrasif aşınma testleri sırasında değişen sürtünme katsayısı değerleri incelendiğine abrasif aşınmada CrN kaplamanın ilk aşamada nispeten belli bir mesafeye kadar kararlı bir sürtünme grafiği izlediği belli bir değerden sonra ani bir şekilde sürtünme katsayısının yükseldiği görülmektedir (Şekil 6.13). Bu değer aşınma testlerinde de görülmüş olduğu gibi 30N yüksek yükte CrN kaplamada hasar olduğu ve aşınmadan dolayı sürtünmenin arttığı belirlenmiştir. CrTiN+Tribo kaplamanın sürtünme davranışı incelendiğinde daha stabil bir grafik elde edilmiştir.



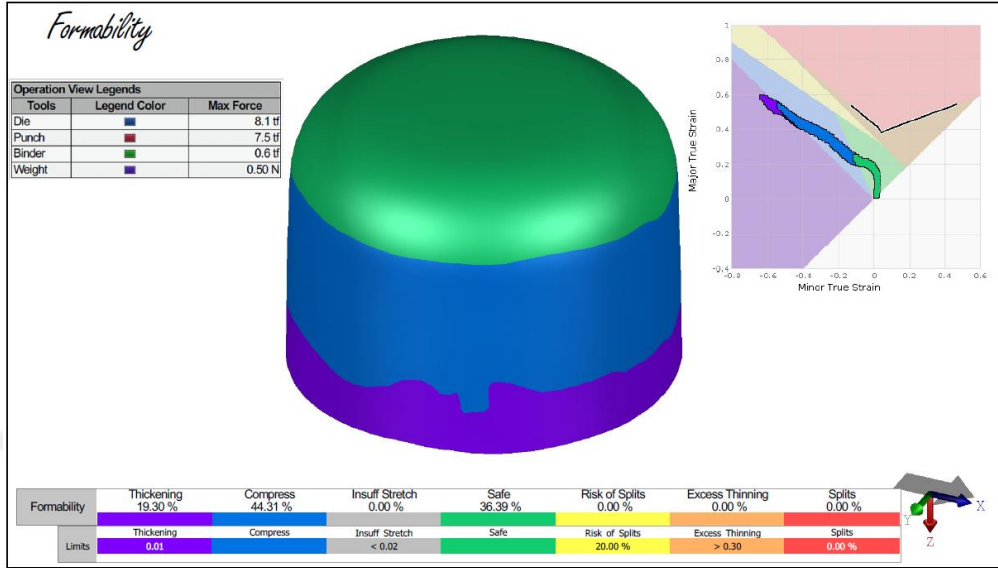
Şekil 6.13. Adhesif ve abrazif aşınma testi sürtünme katsayısı değişim grafikleri

İki kaplama için kararlı durumdaki sürtünme katsayısı değerlerinin ortalaması alınarak ortalama sürtünme katsayısı değeri oluşturulmuştur. CrN kaplamalı numunenin kararlı durumdaki sürtünme katsayısı 0,51, CrTiN+Tribo kaplamalı numunenin kararlı durumdaki sürtünme katsayısı değeri 0,37 olarak hesaplanmıştır. CrTiN+Tribo kaplama daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Üç farklı kalıp numunesinde kaplamasız ve kaplamalı kalıp numuneleri için gerçekleştirilen iki farklı test kıyaslanarak incelendiğinde en düşük sürtünme katsayısı değerinin CrTiN+Tribo kaplamalı kalıp numunesinde, en yüksek sürtünme katsayısı değerinin kaplamasız kalıp numunesinde olduğu görülmüştür.

6.3. Derin Çekme Simülasyon ve Deney Sonuçları

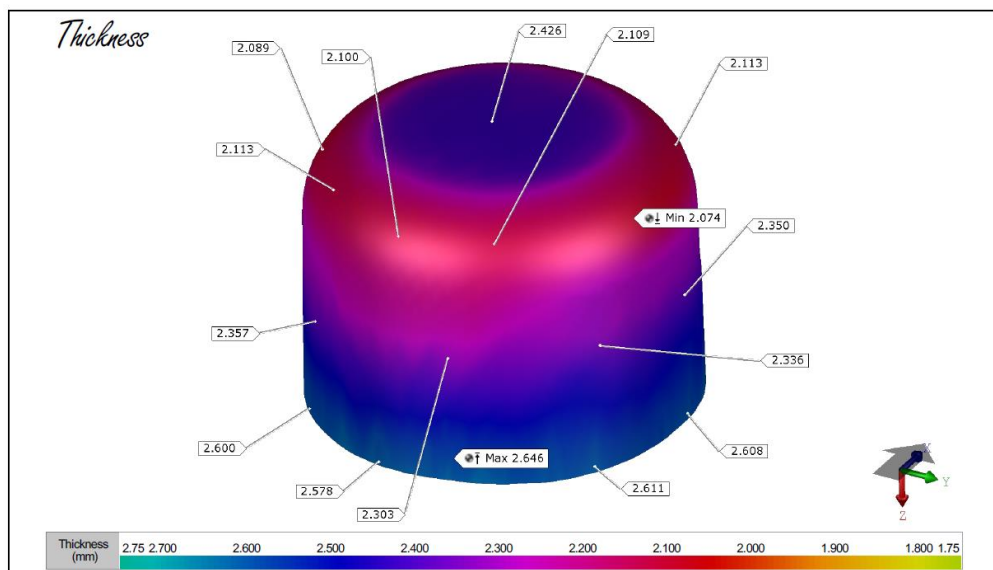
Derin çekme işlemindeki sürtünme katsayısındaki değişimin parçaya etkilerini görebilmek için AutoForm simülasyon programında üç farklı yağlama koşulunda geliştirilmiş Coloumb yasası baz alınarak belirlenmiş üç farklı sürtünme katsayısı değerinde parça şekillendirmesi yapılmıştır. Böylece farklı sürtünme katsayısı değerlerinin şekillendirmeye etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu üç parametre Blank Wash ($\mu=0,2$), Mill Oil ($\mu=0,15$), Pre Lube ($\mu=0,1$) modlarıdır. Ø60 DD13 2,5 mm sac kullanılarak 1 mm/s hızda $\mu=0,2-0,15-0,1$ değerlerinde AutoForm programında

simülasyon yapılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarından şekillendirilebilirlik, maksimum kuvvet ve kalınlık değeri incelenmiştir.



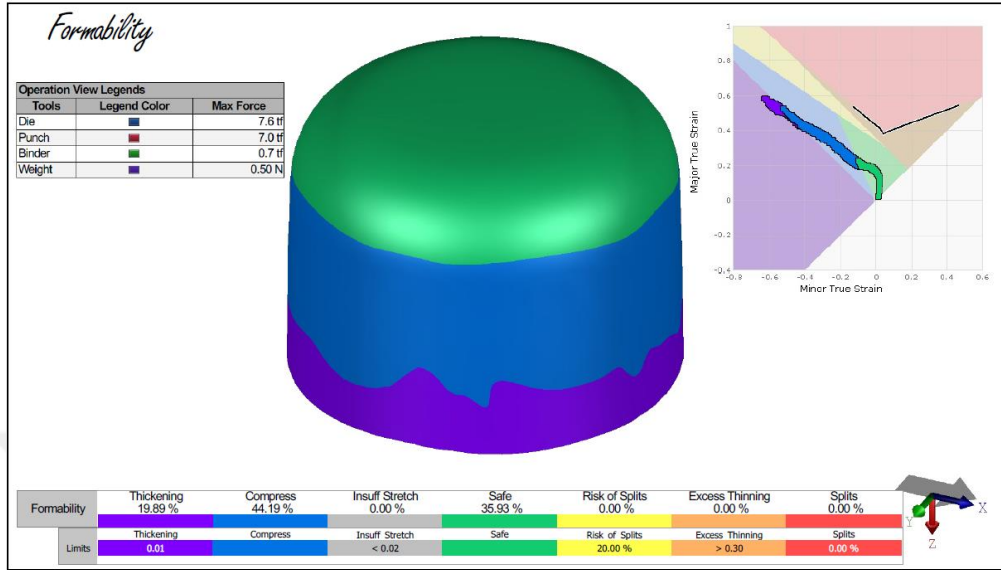
Şekil 6.14. Blank Wash ($\mu=0,2$) şekillendirilebilirlik ve kuvvet değeri sonuçları

Şekil 6.14’te “Blank Wash” parametresinde parçanın şekillendirilebilirlik ve kuvvet değerleri görülmektedir. Parçanın şekillendirilebilirliğine bakıldığında parçadaki %19,30 alanda kalınlaşma ve %44,31’lik bir alanda sıkışma gerçekleşmiştir. %36,39’luk bir alanda ise parça istenen güvenli bölge sınırları içerisinde şekillendirilmiştir. Parça şekillendirilirken maksimum 79,4339 kN kuvvet oluşmuştur.



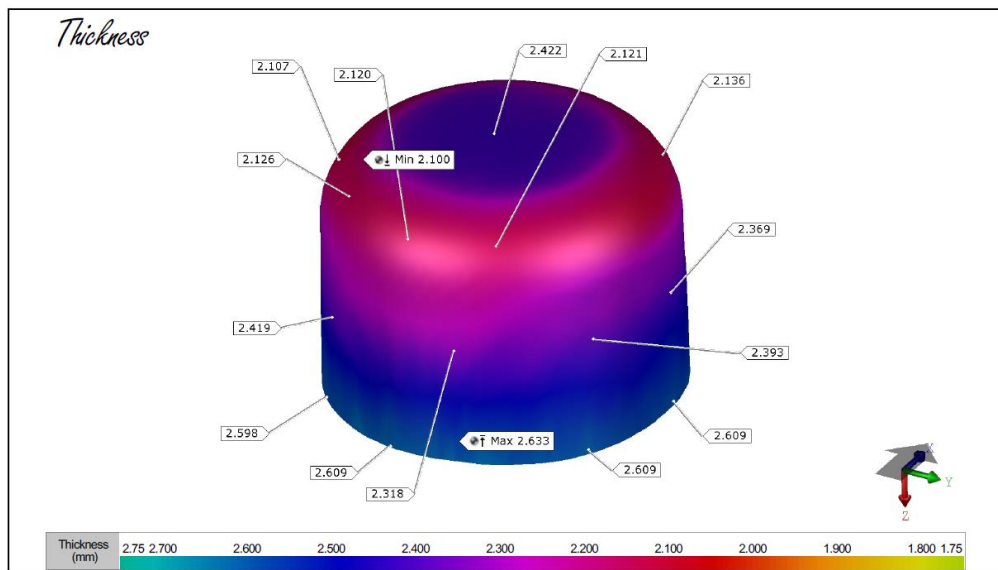
Şekil 6.15. Blank Wash ($\mu=0,2$) kalınlık değeri sonuçları

Parça kalınlık değeri (Şekil 6.15) incelendiğinde maksimum kalınlık değeri 2,646 mm, minimum kalınlık değeri 2,074 mm olduğu görülmüştür.



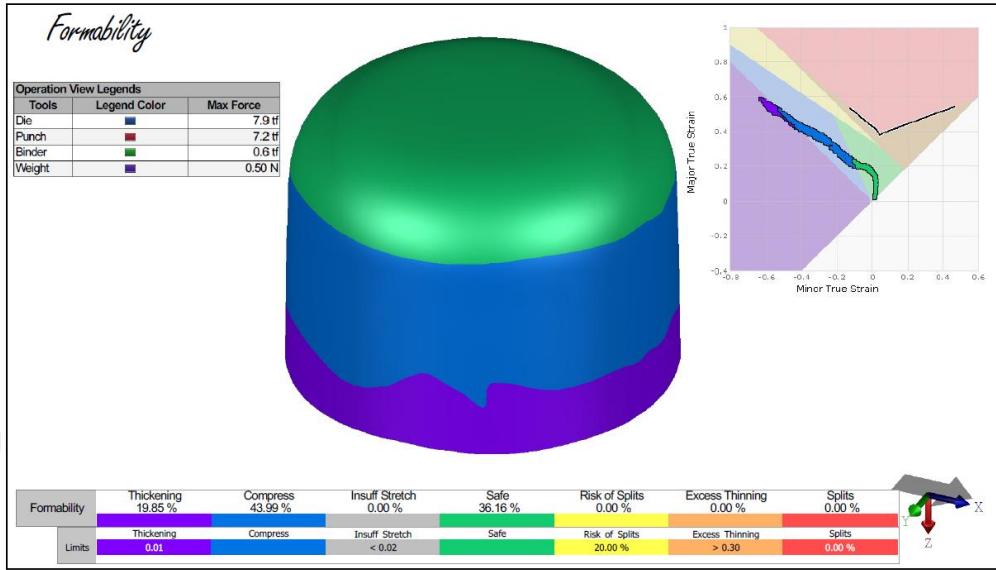
Şekil 6.16. Mill Oil ($\mu=0,15$) şekillendirilebilirlik ve kuvvet değeri sonuçları

Şekil 6.16'ya bakıldığında “Mill Oil” parametresinde derin çekilmiş parçanın şekillendirilebilirlik sonuçları görülmektedir. %19,89'luk bir alanda parçada kalınlaşma ve %44,19'luk bir alanda parçada sıkışma gerçekleşmiştir. %35,93'lük bir alanda parça istenilen sınırlarda şekillendirilmiştir. Parça şekillendirilirken maksimum 77,4726 kN kuvvet oluşmuştur.



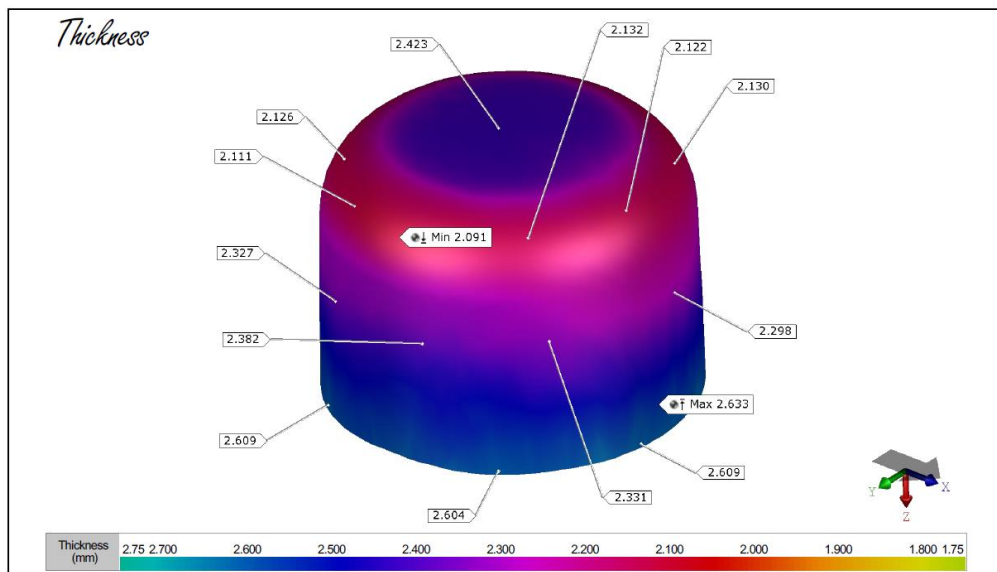
Şekil 6.17. Mill Oil ($\mu=0,2$) kalınlık değeri sonuçları

Parça kalınlık değerleri (Şekil 6.17) incelendiğinde maksimum kalınlık değerinin 2,633 mm, minimum kalınlık değerinin 2,1 mm olduğu görölmüşür.



Şekil 6.18. PreLube ($\mu=0,1$) şekillendirilebilirlik ve kuvvet değeri sonuçları

Şekil 6.18'e bakıldığında “PreLube” parametresinde derin çekilmiş parçanın şekillendirilebilirlik sonuçları görölmektedir. %19,85’lik bir değerde parçada kalınlaşma ve %43,99’luk bir alanda parçada sıkışma gerçekleşmiştir. %36,16’lık bir alanda parça istenilen sınırlarda şekillendirilmiştir. Parça şekillendirilirken maksimum 74,5306 kN kuvvet oluşmuştur.



Şekil 6.19. Pre Lube ($\mu=0,2$) kalınlık değeri sonuçları

Parça kalınlık değerleri (Şekil 6.19) incelendiğinde maksimum kalınlık değerinin 2,633 mm, minimum kalınlık değerinin 2,091 mm olduğu görülmüştür. Simülasyon sonucu elde edilmiş tüm sonuçlar incelenerek tablo haline getirilmiştir ve aşağıdaki Tablo 6.2’de verilmiştir.

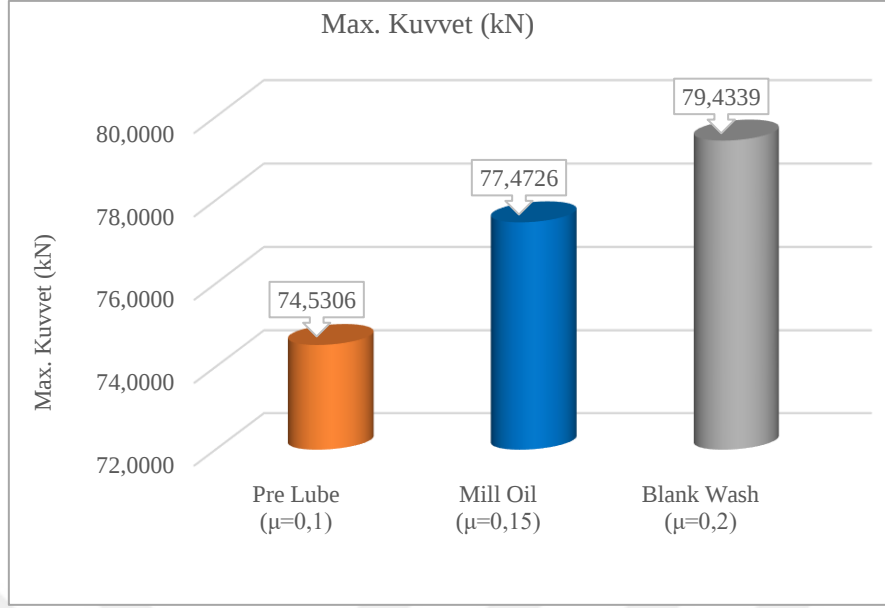
Tablo 6.2’ye bakıldığında üç farklı durum için parçada gerçekleşen şekillendirme sonuçları ve kalınlık değerlerinin yakın olduğu görülmüştür. Bunun sebebi çekme test cihazına uygun boyutlarda gerçekleştirilen kalıp tasarımı sonucu elde edilen parçanın boyutlarının küçük olması sebebiyledir. Daha büyük yüzey alanına sahip parçalarda sürtünme katsayısının etkisi daha net görülebilecektir (Yalçın, 2021). Fakat elde edilen sonuçlarda maksimum şekillendirme kuvvetlerinde ve toplam harcanan şekillendirme enerjisinde sürtünme katsayısının etkisi daha net görülmüştür.

Tablo 6.2. Simülasyon Sonuçları

Simülasyon Koşulu	Kalınlaşma (%Alan)	Ezilme (%Alan)	Güvenli (%Alan)	Max. Kalınlık (mm)	Min. Kalınlık (mm)	Max. Kuvvet (kN)
Pre Lube ($\mu=0,1$)	19,89	44,19	35,93	2,633	2,100	74,5306
Mill Oil ($\mu=0,15$)	19,85	43,49	36,16	2,633	2,091	77,4726
Blank Wash ($\mu=0,2$)	19,30	44,31	36,39	2,646	2,074	79,4339

Şekil 6.20’de simülasyondaki tüm durumlar için elde edilen maksimum kuvvetler gösterilmiştir. “PreLube” parametresinde maksimum 74.5306 kN, “Mill Oil” parametresinde maksimum 77,4726 kN ve “Blank Wash” parametresinde maksimum 79,4339 kN kuvvet elde edilmiştir. “PreLube” parametresi baz alındığında “Mill Oil” parametresinde %3,94, “Blank Wash ” parametresinde %6,58 maksimum kuvvette artış meydana gelmiştir.

Sürtünme katsayısı değeri düştüğünde harcanan maksimum kuvvetin de düştüğü görülmüştür. Daha düşük sürtünme katsayısı değerlerinde daha az kuvvete ihtiyaç duyulmuştur ve parçanın şekillendirilmesi daha kolay olmuştur. Elde edilen simülasyon çıktıları ile daha sonra gerçekleştirilecek derin çekme testlerinin sonuçları kıyaslanacaktır.



Şekil 6.20. Simülasyon maksimum kuvvet değerleri

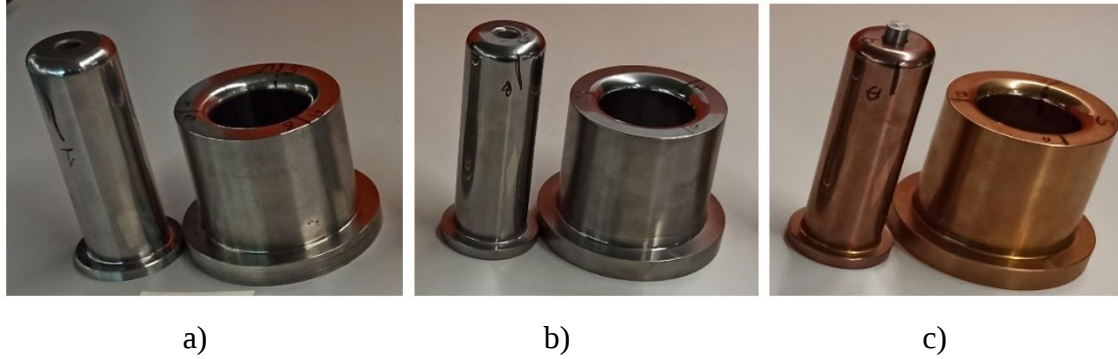
Derin çekme kalıplarının kaplama öncesi Mutituyo marka SJ-210 model cihazla yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Derin çekme deneylerinin yapılabilmesi için 1.2379 malzemeden üretilmiş ısıtılmış dişi ve erkek kalıpların yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.21’de yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilen kaplamasız kalıplar görülmektedir.



Şekil 6.21. Yüzey pürüzlülük ölçümü yapılmış kaplamasız kalıplar

Yüzey pürüzlülük ölçümü sonrası kalıpların üzerine daha öncesinde numune üzerinde karakterizasyonu ve çeşitli testleri gerçekleştirilen CrN, CrTiN+Tribo kaplama

kaplanmıştır. Tekrar yüzey pürüzlülük ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.22’de kaplamasız, CrN ve CrTiN+Tribo katmanlı kaplama görülmektedir.



Şekil 6.22. Deneyde kullanılan kalıplar a) kaplamasız b) CrN kaplama c) CrTiN+Tribo katmanlı kaplama

Kaplanmış kalıpların yüzey pürüzlülük değerleri Mutituyo SJ-210 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür (Tablo 6.3). Tablodaki kaplama öncesi ve sonrası ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde zımba yüzeyinde kaplamasız kalıp değerleriyle kıyaslandığında kaplama sonrası yüzey pürüzlülük değerinde yaklaşık 3 kat azalma gerçekleştiği görülmektedir. Dişi kalıp iç yüzeyi incelendiğinde 4 katlık bir azalma görülmektedir. Dişi kalıp dış yüzey pürüzlülük değerlerine bakıldığında yaklaşık değerlerin mevcut olduğu görülmüştür. Kaplamasız kalıpta polisaj işlemi yapılmadığı için yüzey pürüzlülük değerleri daha yüksek çıkmıştır.

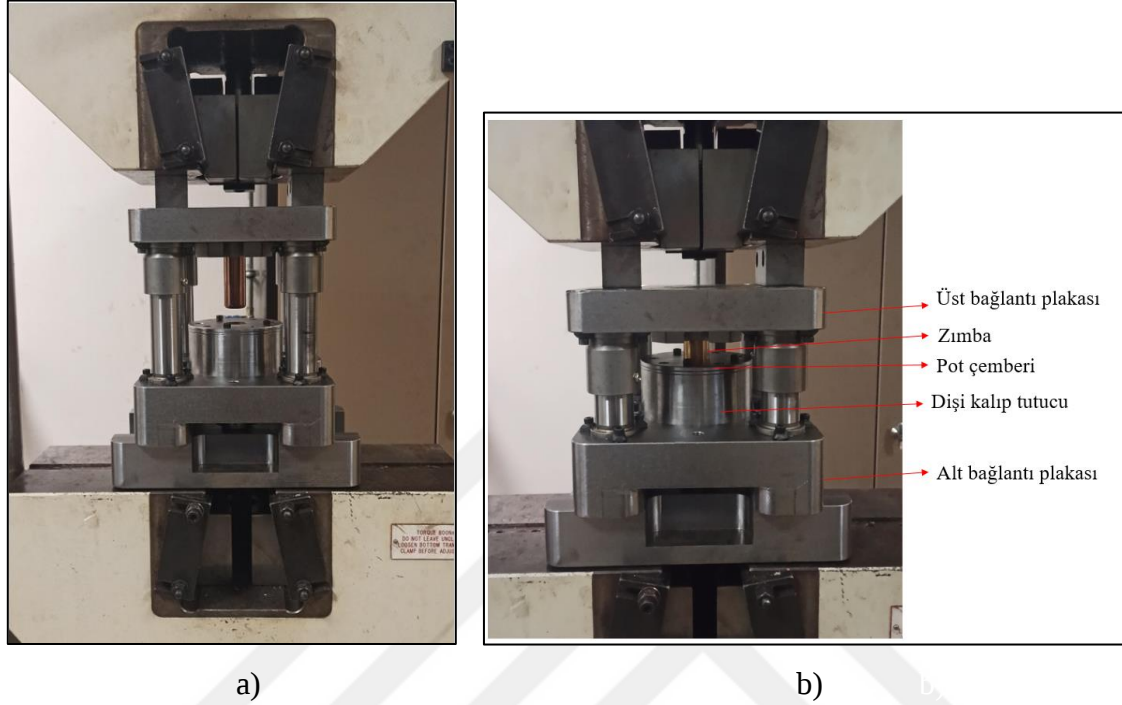
Tablo 6.3. Yüzey kaplamasız ve kaplamalı kalıp yüzey pürüzlülük ölçümü

Kaplama	Zımba Yüzeyi Ra (μm)	Dişi Kalıp İç Yüzey Ra (μm)	Dişi Kalıp Dış Yüzey Ra (μm)
*Kaplamasız	0,343	0,410	0,240
CrN	0,108	0,097	0,206
CrTiN+Tribo	0,128	0,101	0,166

* Kaplamasız olarak ölçülen kalıpların ortalama yüzey pürüzlülük değerinin ortalaması alınmıştır.

Kaplamasız ve kaplaması yapılan kalıplar kullanılarak Kocaeli Üniversitesi mühendislik fakültesi laboratuvarında bulunan Dartec çekme test cihazının (Şekil 6.23) bası modunda

derin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Derin çekme işleminde elde edilen veriler her bir deneme için kaydedilmiştir.



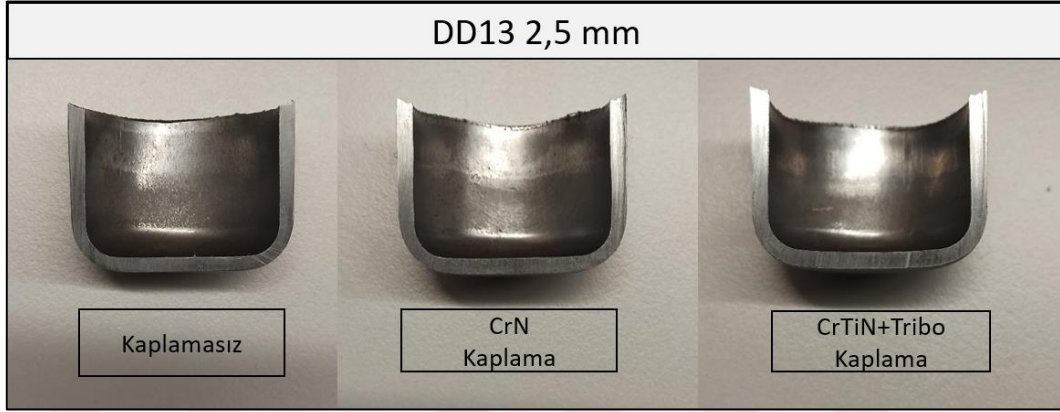
Şekil 6.23. Kocaeli Üniversitesi çekme test cihazı derin çekme denemeleri kalıp a)açık hali b)kapalı hali

Derin çekme işleminin başlangıç aşamasında kalıp açık pozisyonunda (Şekil 6.22a) sac malzeme dişi kalıp üzerine yerleştirilmiştir. Pot çemberi bağlantıları yapıldıktan sonra kalıp kapatılarak (Şekil 6.22b) parça şekillendirilmiştir. Kaplamasız, CrN kaplama ve CrTiN+Tribo kaplamalı kalıplar kullanılarak üretimi gerçekleştirilen parçalar Şekil 6.24'te görülmektedir.



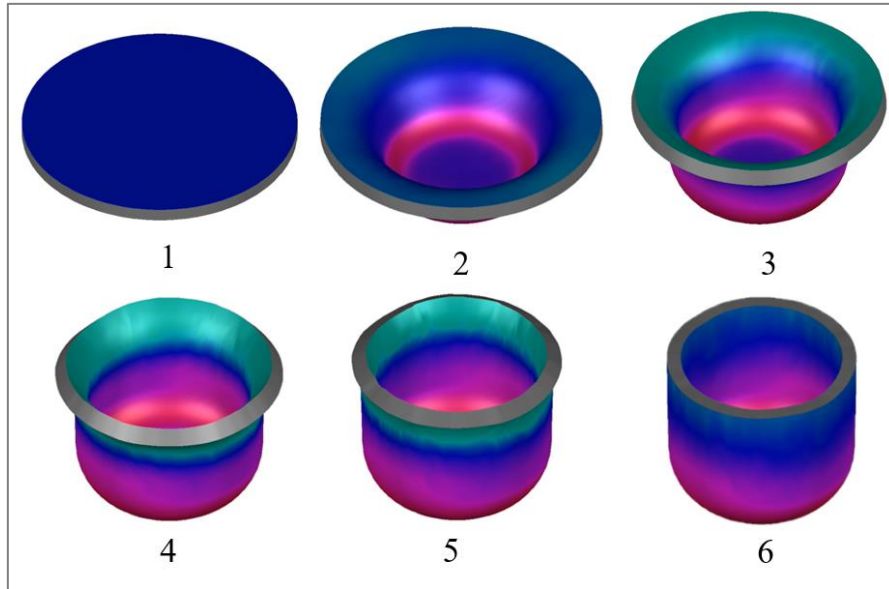
Şekil 6.24. Derin çekme denemeleri sonucu üretilen parçalar

Üretimi gerçekleştirilen parçaların kalınlık ölçümlerinin yapılabilmesi için parçalar kesilerek kesitleri alınmıştır (Şekil 6.25). Kesitleri alınan parçaların et kalınlığı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.25. Deney sonucu elde edilen parçaların kesit görselleri

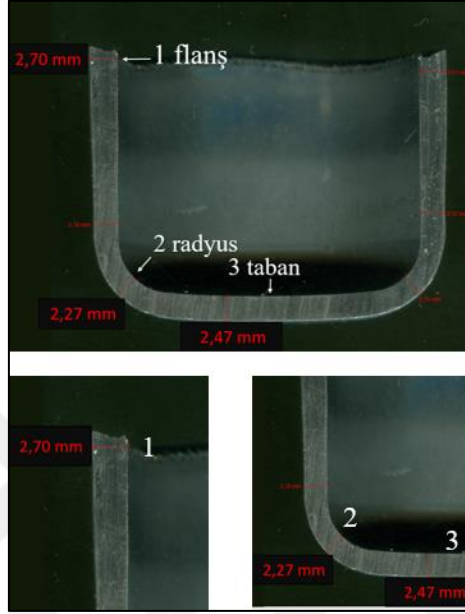
Ölçümlerde AutoForm simülasyonunda 1mm/s hızda 2,5 mm parça kalınlığında “PreLube” parametresinde kalınlık değişimine bağlı parça şekillendirmesi incelenmiştir (Şekil 6.26). Simülasyonda parça şekillendirilirken yeşil bölgelerde kalınlaşma kırmızı bölgelerde incelme meydana geldiği görülmüştür (Şekil 6.25).



Şekil 6.26. Simülasyon parçadaki incelme ve kalınlaşmanın kademeli olarak gösterimi

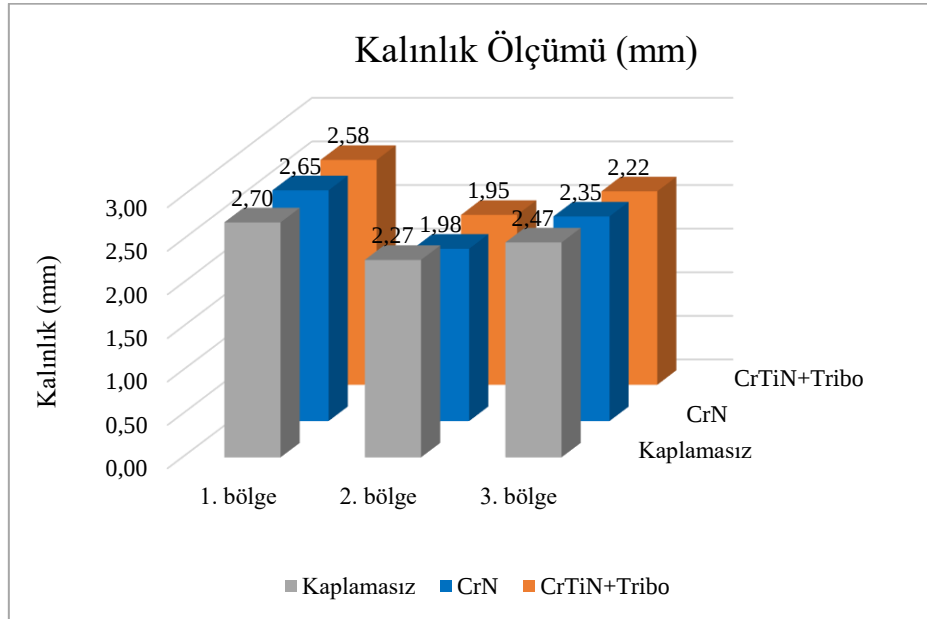
Simülasyon kalınlık değişim bölgeleri dikkate alınarak parça kesit alındıktan sonra belirlenen bu bölümlerde kalınlık ölçümleri yapılmıştır. Kalınlık ölçümleri 3 farklı

bölgede gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.27). 1.bölge parçada en fazla kalınlaşmanın gerçekleştiği parçanın flanş kısmıdır. 2. bölge parçanın zımba radyusu ile temas ettiği radyal çekme kuvvetlerinin sonucunda en fazla incelmenin gerçekleştiği radyus kısmıdır. 3. bölgede ise zımba yüzeyinin parçayla temas ettiği taban kısmıdır.



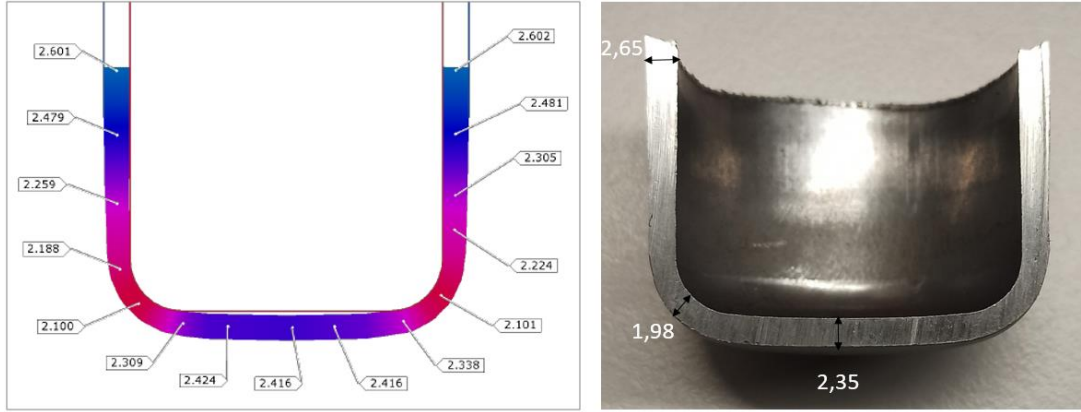
Şekil 6.27. Parça kalınlık ölçüm noktaları

Kaplamasız, CrN ve CrTiN+Tribo kaplamalı kalıpla üretilen kesiti alınmış parçaların 3 bölge için kalınlıkları incelenmiştir (Şekil 6.28).



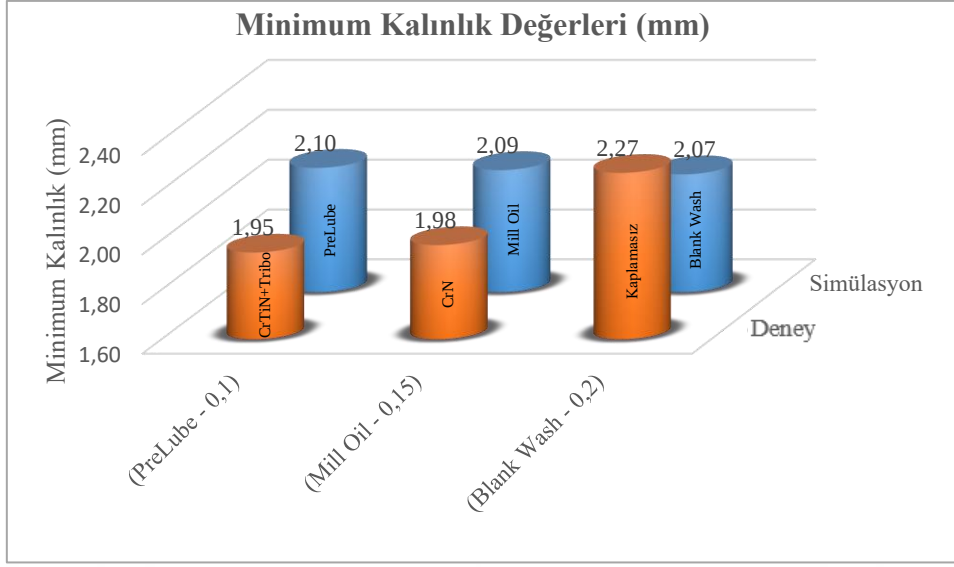
Şekil 6.28. Kalınlık ölçüm karşılaştırması

Kalınlık ölçümlerinde maksimum kalınlaşma flanş bölgesinde kaplamasız kalıpta üretilen parçada, maksimum incelme ise radius bölgesinde CrTiN+Tribo kaplama yapılmış kalıpla üretilen parçada elde edildiği görülmüştür. Parçanın kalınlaşması kalıp içerisine daha çok sıkışmasına ve şekillendirme kuvvetinin artmasına sebep olmaktadır.



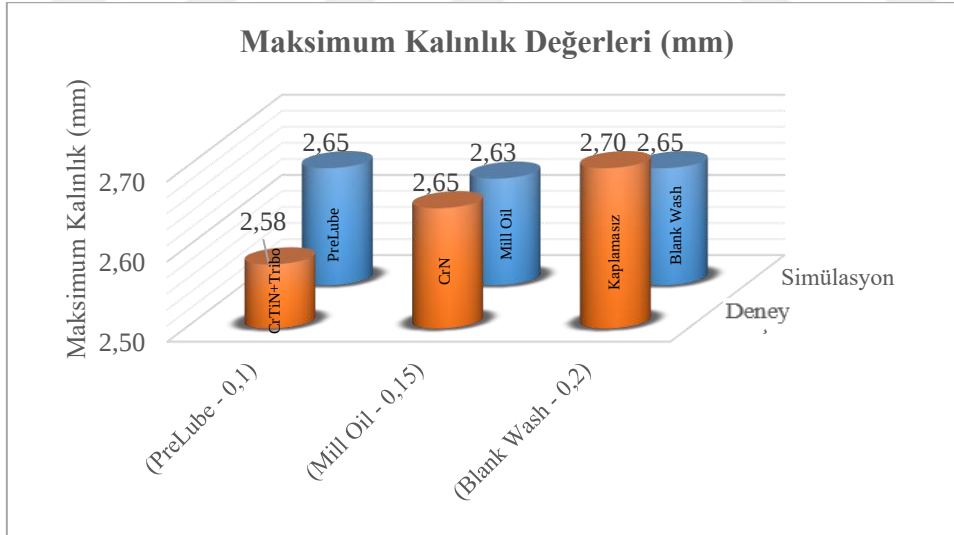
Derin çekme deney testi sonucu üretilen parçaların kesit alındıktan sonra elde edilen kalınlık ölçümleri ve simülasyondan 1 mm/s 2,5 mm kalınlıktaki sacın “Blank Wash” parametresi kullanılarak elde kalınlık ölçüm sonucu örneği şekil 6.29’da verilmiştir. Düşük (CrTiN+Tribo, Prelube), orta (CrN, Mill Oil) ve yüksek sürtünme katsayısı değerlerinde (Kaplamasız, Blank Wash) simülasyon ve deney sonucunda üretilen parçaların kalınlık ölçümlerinin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.30). “PreLube” ile kaplamasız durum, “Mill Oil” ile CrN kaplama ve son olarak “PreLube” için CrTiN+Tribo baz alınmıştır (Simülasyon ve deneydeki sürtünme katsayı değerleri birebir aynı değildir. Sadece üç farklı sürtünme katsayısı durumu içi deney ve simülasyonda elde edilen veriler sonucundaki etkiler karşılaştırılması amaçlanmıştır).

Şekil 6.30’a bakıldığında simülasyondan elde edilmiş minimum kalınlık ölçümlerinde üç farklı sürtünme durumu için minimum sürtünme katsayısı değerinde minimum parça kalınlığının olduğu radius bölgesindeki ölçümde %1,24 fark vardır. Deney sonuçlarına bakıldığında bu değer %14,10 olduğu görülmüştür.



Şekil 6.30. Minimum kalınlık değerleri

Şekil 6.31'e bakıldığında maksimum kalınlığın olduğu bölgedeki ölçümlerde simülasyonda maksimum ve minimum sürtünme katsayısı değerinde üretilen parçada fark görülmemiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında bu değer %4,44 olduğu görülmüştür. Deney sonucu elde edilen ölçülerde fark daha çok çıkmıştır.

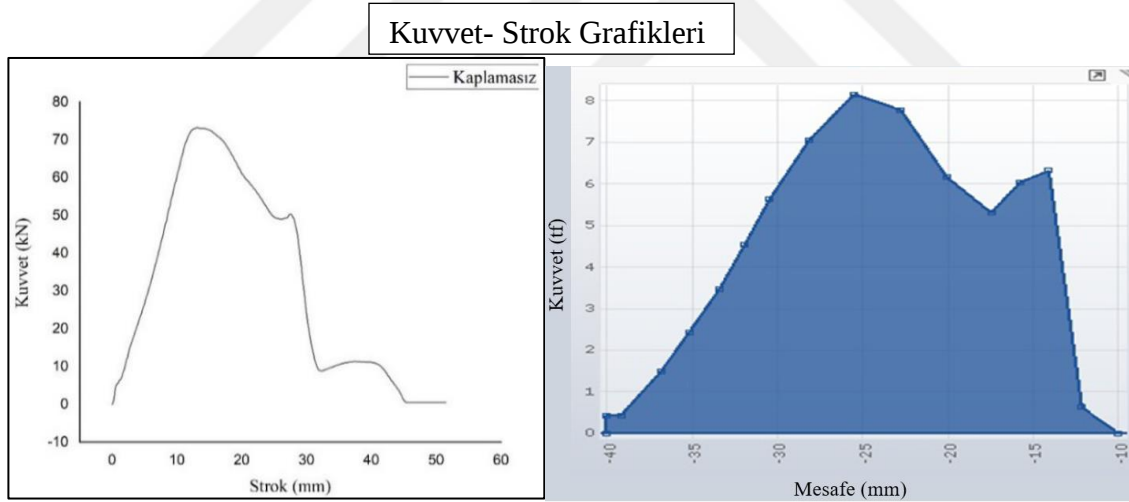


Şekil 6.31. Maksimum kalınlık değerleri

Bunun sebebine baktığımızda derin çekme deneyinde sac malzeme kalıp üst seti alt ölü noktaya gelmesiyle zımba ve dişi kalıp arasında şekillenmektedir. Nihai şeklini alan parça bu esnada zımbaya sıkışmaktadır. Literatürde zımba ve dişi kalıp arası boşluğun sac

kalınlığının minimum 1.1 katı olması istenmektedir. Fakat çalışmada kaplama ve sürtünmenin etkisinin daha net görülmesi için kalıp boşluğu sac kalınlığıyla birebir olarak tasarlanmıştır ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Bundan dolayı parçada kalınlaşma sonrası kalıp içerisinde ezilme gerçekleşmekte ve son aşamada zımbaya sıkışmaktadır. Kalıp üst seti üst ölü noktaya çıkarken sıkışan parça pot çemberine takılarak zımbadan kurtulmaktadır. Bu işlem esnasında parça üst kısmında kalınlaşma meydana gelmektedir. Bu işlemin parça kalınlığına etki ettiği düşünülmektedir.

Deneyler ve simülasyonlar sonucunda elde edilen verilerden oluşturulan kuvvet-zaman grafikleri aşağıda gösterilmektedir. Kaplamasız, CrN kaplama ve CrTiN+Tribo katmanlı kalıplar kullanılarak gerçekleştirilen derin çekme deneyi ve üç farklı durum için yapılan simülasyonların sonucu kuvvet-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Tüm deneyler 1mm/s hızda yağ kullanılmadan kuru sürtünme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında soğuk şekillendirme koşullarında yapılmıştır.

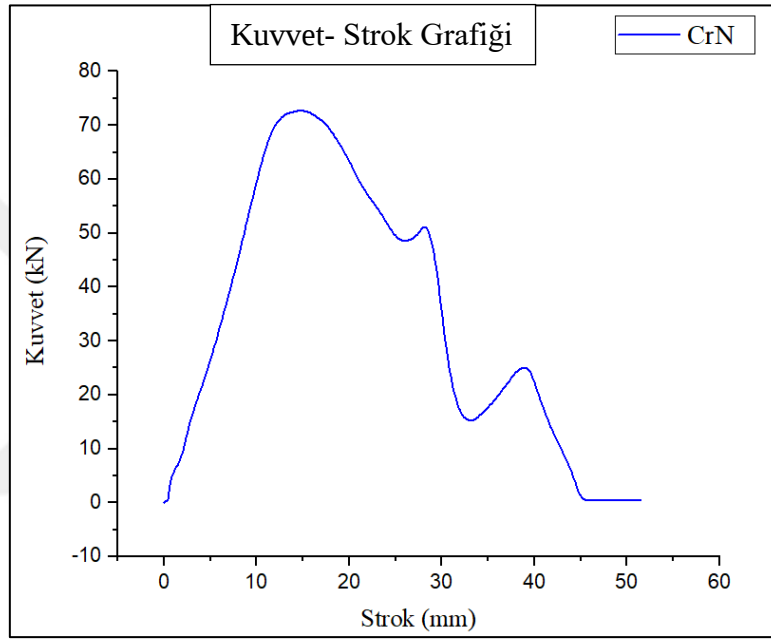


Şekil 6.32. Kaplamasız kalıp kuvvet-strok grafiği a)deney sonucu elde edilen grafik b) simülasyon sonucu elde edilen grafik

Kaplamasız kalıpta 2,5 mm DD13 sac malzemenin 1 mm/s hızda gerçekleştirilen derin çekme şekillendirme işlemi sonucunda maksimum 73,1517 kN kuvvet değerine çıkıldığı görülmüşür (Şekil 6.32a). Simülasyon sonucu elde edilen kuvvet zaman grafiğine bakıldığında kuvvet değişiminin benzer olduğu görülmektedir (Şekil 6.32b). Kuvvet zaman grafiği incelendiğinde ilk zımba ile parça temasından itibaren şekillendirmenin

belirli bir aşamasına kadar kuvvet lineer olarak artmıştır. Kuvvet maksimum değerini gördükten sonra azalmaya başlamıştır.

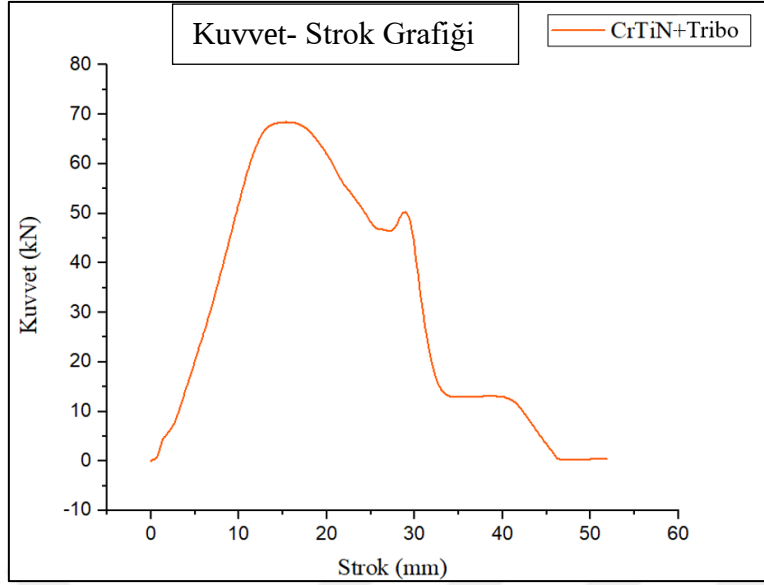
Belirli bir bölgede kuvvet tekrar artmıştır. Bu bölgede parçanın etek kısmında kalınlaşma gerçekleştiği için kalıp boşluğunda sıkışan sacın şekillendirmesi için daha fazla kuvvet ihtiyacı sonucunda olduğu düşünülmektedir. Tekrar bir kuvvet düşüşünden sonra grafikte son bir kez artış olmuştur. Bu kısımda parçanın etek kısmının tamamen kalıp boşluğu içerisine girerek son şekillendirme sağlanmıştır.



Şekil 6.33. CrN kaplamalı kalıp kuvvet-strok grafiği

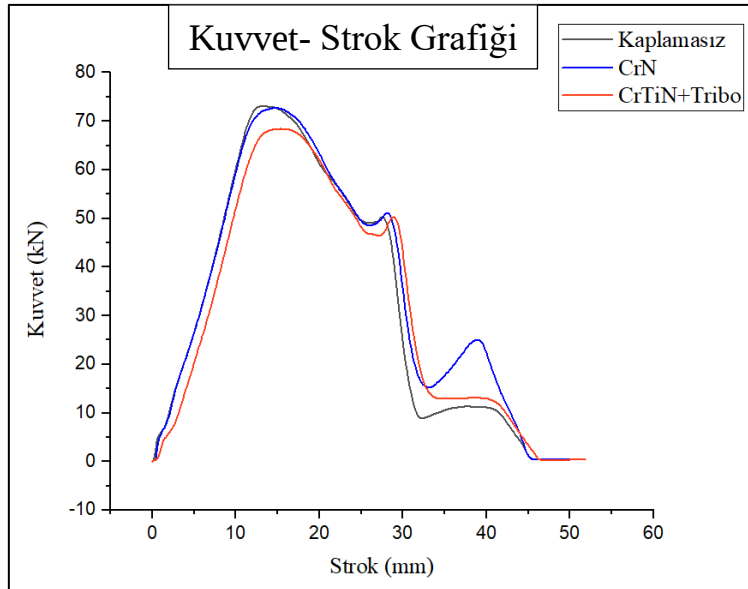
CrN kapama yapılmış kalıpta 2,5 mm DD13 malzemenin 1 mm/s çekme hızında gerçekleştirilen derin çekme işlemi kuvvet zaman grafiği (Şekil 6.33) görülmektedir. CrN kaplama ile gerçekleştirilen şekillendirme işleminde toplam 1759,01 J enerji harcanmıştır. Kuvvet maksimum 72,7398 kN değerine çıkmıştır.

Kaplamasız kalıpla gerçekleştirilen çekme işlemindeki kuvvet zaman grafiğinde benzer aşamalar görülmektedir. CrN kaplamalı kalıpla kaplamasız kalıpta yapılan şekillendirme işlemi kıyaslandığında maksimum kuvvette düşme gerçekleşmiş fakat toplam harcanan kuvvet artmıştır. Bunun sebebi son aşamada gerçekleşen kuvvet artışının kaplamasız kalıptaki kuvvet artışına göre daha fazla olmasından dolayı gerçekleşmesidir.



Şekil 6.34. CrTiN+Tribo kaplamalı kalıp kuvvet-strok grafiği

CrTiN+ Tribo katmanlı kaplama yapılmış kalıpta 2,5 mm DD13 malzemenin 1 mm/s çekme hızında gerçekleştirilen derin çekme işlemi kuvvet zaman grafiği (Şekil 6.34) görülmektedir. CrTiN+Tribo kaplama ile gerçekleştirilen şekillendirme işleminde toplam 1601,34 J enerji harcanmıştır. Kuvvet maksimum 68,4596 kN değerine çıkmıştır. Bu değerler incelendiğinde en az kuvvet ve enerjinin harcandığı şekillendirme işlemi çok katmanlı CrTiN+Tribo kaplanmış kalıpla yapılan derin çekme işleminde gerçekleştiği görülmüştür.

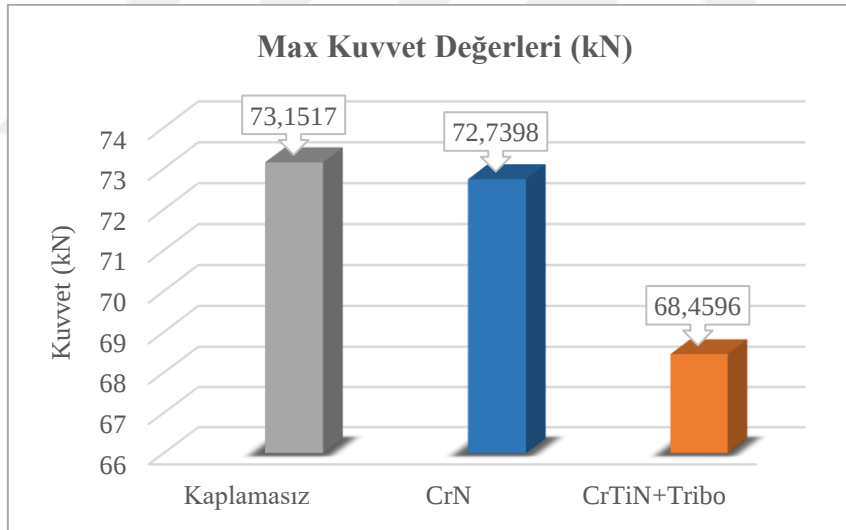


Şekil 6.35. Kuvvet- strok grafiği karşılaştırması

Tüm elde edilen kuvvet-strok grafikleri (Şekil 6.35) incelendiğinde en fazla kuvvet artışı ve harcanan enerjinin kaplamasız kalıpla gerçekleştirilen derin çekme işleminde gerçekleştiği görülmektedir.

Deney çalışmasında elde edilen diğer bir veriye bakıldığında en düşük maksimum kuvvetin ve toplam enerjinin harcandığı kalıp derin çekme prosesi için yeni geliştirilen CrTiN+Tribo kaplama olduğu görülmüştür. Bu kaplamada en üst tabakadaki tribo katmanının katı yağlayıcı özelliğinden dolayı başlangıçtaki sürtünme kuvvet değerlerinin kaplama testlerinde de daha düşük olduğu görülmüştür.

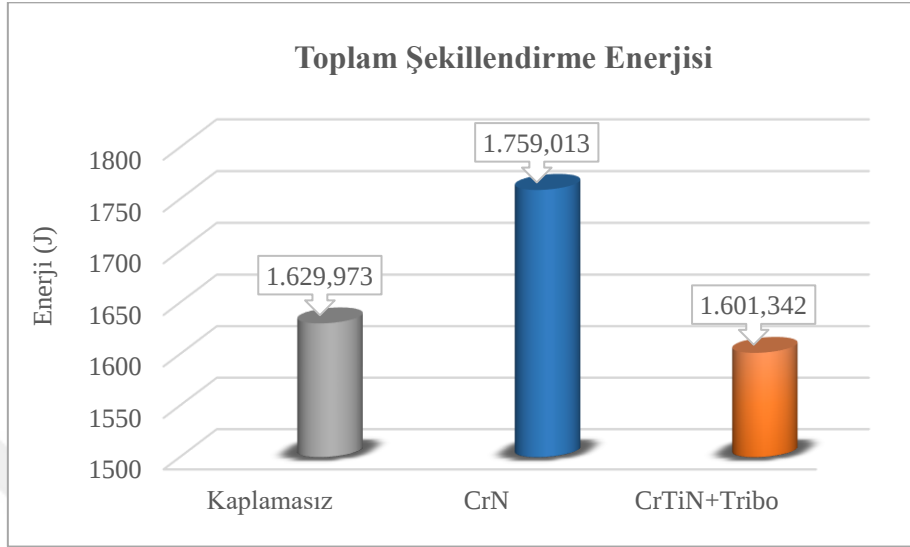
Elde edilen kuvvet-strok grafikleri sonucunda proses esnasında oluşan maksimum şekillendirme kuvvetleri ve toplam şekillendirme enerjisi değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 6.36'da kaplamasız kalıp, CrN kaplamalı kalıp ve CrTiN+Tribo kaplamalı kalıp kullanılarak yapılan deney sonucunda elde edilmiş maksimum kuvvet değerlerinin grafiği görülmektedir.



Şekil 6.36. Maksimum çekme kuvveti karşılaştırma

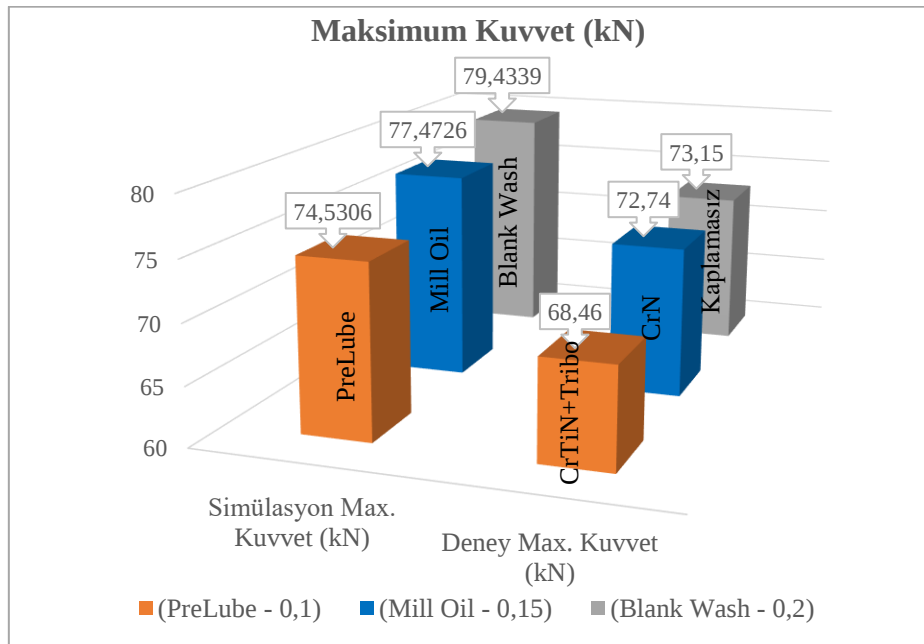
Kaplamasız kalıpta gerçekleşen maksimum kuvvet değeri referans alındığında CrN kaplamalı kalıpta gerçekleştirilen işlemin kaplamasız kalıba göre %0,56 değerinde maksimum kuvvette azalma olduğu, CrTiN+Tribo kaplamalı kalıpta %6,41'lik bir azalma gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 6.36). Maksimum kuvvet değerlerine bakıldığında en düşük kuvvet CrTiN+Tribo kaplamalı kalıpla yapılan derin çekme işleminde gerçekleştiği görülmektedir.

Daha sonrasında elde edilen diğer sonuçlara bakıldığında üç farklı durum için elde edilen toplam şekillendirme enerjileri kıyaslanmıştır (Şekil 6.37).



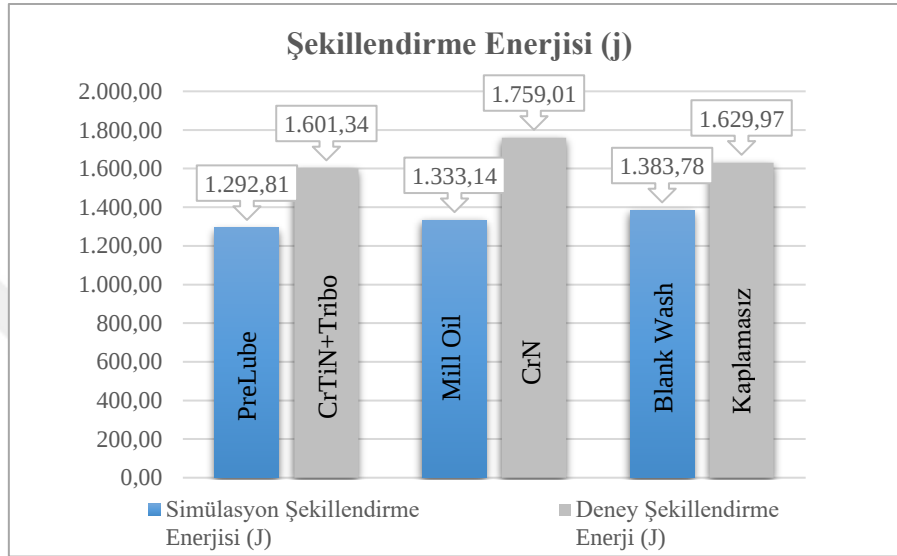
Şekil 6.37. Harcanan toplam enerji karşılaştırma

Harcanan toplam enerjide kaplamasız kalıpta yapılan işlem referans alındığında CrN kaplamada kaplamasız kalıba göre %7,9 artış, CrTiN+Tribo kaplamada ise %1,75'lik bir düşüş olduğu görülmektedir (Şekil 6.37). Harcanan en az enerji maksimum kuvvette olduğu gibi CrTiN+ Tribo kaplamalı kalıpta elde edilmiştir.



Şekil 6.38. Maksimum kuvvet deney ve simülasyon sonuçları

Tüm bu sonuçlar doğrultusunda derin çekme deneyleri ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Deney ve simülasyonda elde edilen maksimum kuvvette (Şekil 6.38) en düşük, orta ve yüksek sürtünme katsayısındaki değerlerdeki derin çekme deneyi sonuçlarıyla (Kaplamasız, CrN, CrTiN+Tribo) simülasyon programındaki sonuçların (Blank Wash, Mill Oil, PreLube) davranışı benzerlik göstermiştir.



Şekil 6.39. Şekillendirme enerjisi sonuçları

Deneyde ve simülasyonda iki durum için de en düşük sürtünme katsayısı değerlerinde (CrTiN+Tribo kaplama, PreLube) en düşük maksimum kuvvet ile parça şekillendirilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı değerlerinde (Kaplamasız, Blank Wash) en yüksek maksimum kuvvet elde edilerek parça şekillendirilmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri ile şekillendirme sırasında elde edilen maksimum kuvvet değerleri doğru orantılıdır. Şekil 6.39’da görüldüğü gibi üç farklı sürtünme katsayısı durumu için deneyde ve simülasyonda parça şekillendirmesinde elde edilen kuvvet zaman grafikleri baz alınarak oluşturulan toplam şekillendirme enerjileri karşılaştırılmıştır.

Simülasyon sonucunda elde edilen kuvvet zaman grafiğinden elde edilen verilere göre “PreLube” parametresinde 1.292,81 J, “Mill Oil” parametresinde 1.333,14 J ve “Blank Wash” parametresine 1.383,78 J enerji harcandığı görülmüştür. Simülasyon sonucunda toplam şekillendirme enerjileri sürtünme katsayılarıyla orantılı olarak yükselmiştir.

Düşük sürtünme katsayısı değerlerinde daha az, yüksek sürtünme katsayısı değerlerinde daha çok enerji harcanmıştır. Deney sonucunda simülasyondan farklı olarak CrN kaplamada elde edilen enerji daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olan kaplamasız kalıpla yapılan denemeden daha yüksek enerji elde edilmiştir. Fakat kaplamasız ve CrTiN+Tribo kaplama kıyaslandığında düşük sürtünme katsayısına sahip olan CrTiN+Tribo kaplamalı kalıpla yapılan denemede daha düşük şekillendirme enerjisi harcanmıştır.



7. SONUÇLAR

Bu çalışmada 1.2379 soğuk iş takım çeliğine ısıtıl işlem uygulandıktan sonra geleneksel CrN kaplama ve derin çekme için geliştirilmiş nanoteknolojik çok katmanlı CrTiN+Tribo kaplama yapılmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız numunelerin oda sıcaklığında tribometre test cihazı ile aşınma testleri gerçekleştirilmiş ve aşınma testleri sonucu oluşan yüzeyler optik profilometre ile incelenmiştir. Daha sonra bu kaplamalar derin çekme kalıplarına uygulanarak derin çekme performansları değerlendirilmiştir.

Kaplamasız, CrN ve CrTiN+Tribo kaplamalı numunelerin incelenmesinde kaplamaların adhezyon değerlerine bakıldığında HF1-HF2 standardında olduğu görülmüştür. Bu da kaplamanın altlık malzemesine iyi adhezyon (yapışma) sağladığını göstermektedir.

Derin çekme işleminde yüksek yüklerden dolayı iyi adhesif ve abrazif aşınma dayanımı istenmektedir. Geleneksel CrN kaplamanın aşınma sonuçlarına bakıldığında adhesif aşınma dayanımının yüksek olduğu, abrazif dayanımının düşük olduğu görülmüştür (Şekil 6.11, Şekil 6.12). CrN kaplamada 30N yükteki aşınma hacmi değeri CrTiN+Tribo kaplamaya göre 28 kat daha fazla olmuştur. CrN kaplamalı kalıp malzemesinde gerçekleşen yüksek aşınmanın yüksek yükte CrN kaplama ve alt tabaka arasındaki adhezyon etkisinin yenilmesiyle kaplamanın delamine olması ve yüzeyden kalkması sonucu alt tabakanın daha fazla aşınması, ikinci olarak delamine olan sert CrN kaplama partiküllerinin aşındırıcı partikül olarak 3 cisimli abrazif aşınmaya sebep olması olarak sıralayabiliriz.

Derin çekme için yeni geliştirilmiş nanoteknolojik kaplamada adhesif aşınma davranışı CrN kaplamayla benzer olmakla birlikte abrazif aşınma davranışı CrN kaplamaya kıyasla daha iyi olmaktadır. Bunun sebebine baktığımızda yeni nesil kaplamanın hem sertlik hem de tokluk değerinin CrN kaplamadan daha iyi olduğu görülmüştür (Tablo 6.1). Literatür incelendiğinde kaplama performansının artırılması için istenen yüksek tokluk ve sertlik değerlerinin etkisinin CrN ve CrTiN+Tribo kaplamayla yapılan aşınma test sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür (Cora ve Koç, 2013).

Kaplama değerlendirmelerinden sonra derin çekme işlemi simülasyon ve deneysel çalışma ile değerlendirilmiştir. Kaplamsız, CrN ve CrTiN+Tribo kaplamada en düşük sürtünme katsayısı CrTiN+Tribo kaplamada en yüksek sürtünme katsayısı değeri

kaplamasız kalıpta bulunmaktadır (Şekil 6.5, Şekil 6.13). Simülasyon parametreleri belirlenirken üç farklı sürtünme katsayısı değerinde şekillendirme yapılmıştır. Derin çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar simülasyonla karşılaştırıldığında en düşük sürtünme katsayısı değerinde en düşük şekillendirme kuvvetinin, en yüksek sürtünme katsayısı değerinde ise en yüksek şekillendirme kuvvetinin elde edildiği görülmüştür (Şekil 6.38).

Toplam şekillendirme enerjileri incelendiğinde simülasyon sonucu elde edilen değerler sürtünme katsayısıyla orantılı olarak yüksek sürtünme katsayısında yüksek şekillendirme enerjisi, düşük sürtünme katsayısı değerinde düşük şekillendirme enerjisi elde edildiğini göstermiştir (Şekil 6.39). Derin çekme deney koşulları incelendiğinde düşük sürtünme katsayısı değerinde düşük şekillendirme enerjisi elde edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında kalıp malzemeleri üzerine yapılan kaplamaların aşınma ve sürtünme davranışlarıyla tribolojik performansları değerlendirilmiştir. Derin çekme deneyi ve simülasyon çalışmalarıyla kuvvet-zaman grafikleri oluşturularak şekillendirmede meydana gelen maksimum kuvvet ve toplanan harcanan enerjiler belirlenmiştir. Farklı sürtünme değerlerinin şekillendirme performansına etkileri incelenmiştir.

KAYNAKLAR

- Aktaş, G. (2014). Alüminyum Ekstrüzyonunda Kalıp Malzemesi Olarak Kullanılan Sıcak İş Takım Çeliklerinin Yüzey İşlemleri ve Tribolojik Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 372697.
- ASTM (2005). Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear (G133). West Conshohocken.
- Aytaç, A., İlivan, M. (2018). Investigation of 2550 Cold Work Tool Steel Coated with TiN and CrN by PVD Method by Scratch Method. *International Journal of Engineering Science Invention (IJESI)*, 7(12), 7-20.
- Aytaç, A., Malayoğlu, U. (2018). Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemlerinden PVD ve JVD/DVD İnce Film Kaplamaların Karşılaştırılması ve DVD Kaplama Teknolojisinin Endüstriyel Uygulamaları Üzerine Kavramsal, Akademik ve Teorik Bir Analiz. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 17(1), 131-164. DOI:10.17134/khosbd.427054.
- Bakdemir, S. A., Özkan, D., Türküz, M. C., Uzun, E., Salman, S. (2020). Effect of the Nitriding Process in The Wear Behaviour of DIN 1.2344 Hot Work Steel, *Naval Sciences And Engineering*, 16(1), 45-70.
- Bal, M. (2007). Açılı Derin Çekme Kalıplarında Matris Ve Zımba Radyüsünün Çekme Oranına Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 200171
- Boljanović, V. (2004). *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*, (2nd ed.) (69-82). Industrial Press, New York.
- Button, S. T. (2012). Tribology in Metal Forming Processes, Davim J. P. (Ed.), *Tribology in Manufacturing Technology* (1st.) (103-120). Berlin: Springer.
- Bülbül, A. E. (2013). Kaplamasız, PVD Tekniği İle TiN Ve AlTiN Kaplanmış DIN 1.2379 Soğuk İş Takım Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 342879.
- Carlsson, P. (2005) Surface Engineering in Sheet Metal Forming. Ph.D Thesis, Uppsala University, Department of Engineering Sciences, Sweden.
- Chaudhari, S. S., Patil, N. K (2015). Effect of Process Parameters on Spring Back in Deep Drawing: A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(4), 2321-9939.
- Chang, C. L., Chen, W. C., Tsai, P.C., Ho, W.Y, Wang, A. Y. (2007). Characteristics and Performance of TiSiN/TiAlN Multilayers Coating Synthesized by Cathodic Arc

- Plasma Evaporation. *Surface and Coatings Technology*, 202(4), 987-992. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.06.024.
- Cora, N. (2009). Development of Rapid Die Wear Test Method For Assessment of Die Life And Performance in Stamping of Advanced/Ultra High Strength Steel (A/Uhss) Sheet Materials. Ph.D Theses, Virginia Commonwealth University, Virginia.
- Cora, Ö. N., Koç, M. (2009). Experimental Investigations on Wear Resistance Characteristics of Alternative die Materials for Stamping of Advanced High-Strength Steels (AHSS). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49(12-13), 897-905. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2009.07.003.
- Cora, Ö. N., Koç, M. (2013). Investigations on the Effect of Coating Material and Method on Die Wear in Stamping of Advanced High Strenght Steels. *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2A. DOI:10.1115/IMECE2013-62043
- Claus, G., Weber, M., Demmler, M. (2017) Increase of Lifetime for Fine Blanking Tools. *Procedia Engineering*, 183(12-13), 45-52. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.009.
- Dwivedi, R., Agnihotri, G. (2017). Study of Deep Drawing Process Parameters. *Materialstoday: Proceedings*, 4(2), 820-826.
- Fernandes, L., Silva, F.J.G, Andrade, M.F., Alexandre, R., Baptista, A.P.M., Rodrigues, C. (2017). Improving the Punch and Die Wear Behavior in TiN Coated Steel Stamping Process. *Surface & Coatings Technology*, 332,174-189. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.06.086
- Filzek, J., Groche, P. (2001). Assessment of the Tribological Function of Lubricants for Sheet Metal Forming. *Bench Testing of Industrial Fluid Lubrication and Wear Properties Used in Machinery Applications*, 97-108. DOI: 10.1520/STP10502S
- Gowtham, K., Srikanth, K. V. N. S., Murty, K. L. N. (2012). Simulation of the Effect of Die Radius on Deep Drawing Process. *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering (IJARME)*, 2(1), 12-17.
- Groover, M. P. (2010). Sheet Metal Working. McDonald M., (Ed.), *Fundamentals of Modern Manufacturing* (4th ed.) (443-476). United States of America: John Wiley & Sons.
- Günay, H., Yalçın, E., Güven, E. A., Sınmazçelik, T. (2020). 1.2379 Soğuk İş Takım Çeliği Delme Zımbalarında AlTiN, TiSiN ve TiN, PVD Kaplamaların Takım Ömrüne Etkisi. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 154-159.
- Gürün, H. (2008) Derin Çekme Kalıplarındaki Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Bulanık Mantık ile Tahmini. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 234059.

- Holmberg, K., Matthews A. (2009). *Coatings Tribology, Properties, Mechanisms, Techniques and Applications In Surface Engineering*. (2nd ed.). Oxford: Elsevier.
- Joshi, A. R., Kothari, K. D., Jhala, Dr. R. L. (2013). Effects of Different Parameters on Deep Drawing Process: Review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(3), 2278-0181.
- Karabaşoğlu, M. (2008), Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 214052.
- Krauss, G. (2015). *Steels: Processing, Structure, and Performance* (2nd ed.). Colorado: Asm International.
- Lestan, Z., Brezocnik, M., Milfelner, M., Balic, J. (2012). Laser Cladding In The Tooling Industry. *Daaam International Scientific Book*, 4(4), 045-052. DOI:10.2507/daaam.scibook.2012.04
- Liliana, F., Francisco, J. G. Silva, Ricardo, A. (2019). Study of TiAlN PVD Coating on Stamping Dies Used in Tinplate Food Package Production. *Micromachines*, 10(3),182. DOI: 10.3390/mi10030182.
- Masen, M. (2004). Abrasive Tool Wear in Metal Forming Processes. Ph.D Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- Nilsson, M. (2012). Tribology in Metal Working. Thesis, Uppsala University, Department of Engineering Sciences, Sweden.
- İlivan M. (2012). Kaplamasız, PVD Tekniği ile TiN ve CrN Kaplanmış DIN 1.2550 Soğuk İş Takım Çeliğinin Aşınma Davranışlarının Deneysel İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 323021.
- Özdilli, Ö., Erdin, M. E. (2018). Comparison of Common Deep Drawing Steel Sheets in terms of Blank Holder Force and Friction Conditions. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 2(3), 36-41.
- Özkeklik, E. (2013). TiN/TiAlN kaplanmış SVERKER 21 ile Nitasyon Yapılmış ve TiAlN Kaplanmış Toolox 44 Malzemelerin Aşınma Performanslarının Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 337088.
- Podgornik, B., Leskovšek, V. (2015). Wear Mechanisms and Surface Engineering of Forming Tools. *Materials and Technologies*, 49(3),313-324. DOI:10.17222/mit.2015.005.
- Polok-Rubinić, M., Dobrzański, L. A., Adamiak, M. (2007). Comparison of the adhesion and wear resistance of the PVD coatings. *Journal of Achievements in Materials*, 20(1-2) 279-282.

- Seshacharyulu, K., Bandhavi, C., Naik, B. B., Rao, S. S., Singh, S. K. (2018). Understanding Friction in Sheet Metal Forming-A Review. *Materialstoday: Proceedings*, 5 (9), 18238-18244.
- Shah, K. T., Chaudhary, S., Bhatt, D. K. (2014). Analysis of the Effect of Process Parameters in Deep Drawing. *International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD)*, 1(5), 2348-4470.
- Sigvant, M., Pilthammar, J., Hol, J., Wiebenga, J. H., Chezan, T., Carleer, B. Boogaard, A. H. (2018). Friction in Sheet Metal Forming: Forming Simulations of Dies in Try-Out. *Journal of Physics Conference Series*, 1063(1), 012134. DOI: 10.1088/1742-6596/1063/1/012134.
- Sortino, M., Belfio, S., Totis, G., Kuljanic, E., Fadelli, G. (2015). Innovative Tool Coatings for Increasing Tool Life in Milling Nickel-coated Nickel-silver Alloy. *Procedia Engineering*, 100, 946-952. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.453.
- Sousa, V. F.C., Silva, F.J.G., Alexandre, R., Fecheira, J.S., Silva F.P.N. (2021). Study of the Wear Behaviour of TiAlSiN and TiAlN PVD Coated Tools on Milling Operations of Pre-Hardened Tool Steel. *Wear*, 476. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203695.
- Straffelini, G., Bizzotto, G., Zanon, V. (2010). Improving the Wear Resistance of Tools for Stamping. *Wear*, 269(9-10), 693-697. DOI: 10.1016/j.wear.2010.07.004
- Topçu, Ş. (2010). Farklı Şartlarda Plazma Nitrülenmiş Çeliklerin Aşınma Davranışının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 259679.
- Toptop, O. G. (2011). Yüksek Hız Takım Çeliklerinde Uygulanan Isıl İşlemler ve Elde Edilen Özellikler Arasındaki İlişkilerin Fiziksel Metalurjik Yönden İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 299483.
- Tracton, A. A. (2006). *Coatings Technology Handbook* (3rd ed.). Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Türküz, C. (2006). Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi İle Yapılan Zirkonyum Nitrür İnce Film Kaplamanın Kaplama Parametrelerinin İncelenmesi ve Optimizasyonu. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 222274.
- Türküz, M. C., Kayalı, E. S. (2006). FBB ZrN Kaplamaların Mekanik Özelliklerine Bias Voltaj Modlarının Etkisi. *İtü Dergisi*, 5(4), 57-68.
- Vera, E.E., Vite, M., Lewis, R., Gallardo, E.A., Laguna-Camacho, J.R. (2010). A Study of The Wear Performance of TiN, CrN and WC/C Coatings On Different Steel Substrates. *Wear*, 271(9-10), 2116-2124. DOI: 10.1016/j.wear.2010.12.061

- Vidakis, N., Antoniadis, A., Bilalis, N. (2003) The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds, *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144, 481-485. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00300-5.
- Vierzigmann H. U., Merklein M., Engel U. (2011). Friction Conditions in Sheet-Bulk Metal Forming. *Procedia Engineering*, 19(1), 377-382. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.128.
- Vorholt, J. Shimizu, T., Kobayash, H. , Heinrich, L., Flosky, H., Vollertsen, F., Yang, M. (2017). In-Situ Observation Of Lubricant Flow on Laser Textured Die Surface In Sheet Metal Forming. *Procedia Engineering*, 207, 2209-2214. DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.983
- Watcharasresomroeng, B., Premanond, V., Kaewtatip, P., Khantachawana, A. (2011). Performance of CrN Radical Nitrided Tools on Deep Drawing of Advanced High Strength Steel. *Surface and Coatings Technology*, 205(17), 4198-4204. DOI:10.1016/j.surfcoat.2011.03.010
- Yalçın, C. (2021) Derin Çekmede İş Malzemesi Ve Proses Parametrelerinin Deneysel Ve Nümerik Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 698725.
- Yalçın, S., Kaftanoğlu B. (2011). Derin Çekme İşlemlerinde Plastik Buruşma Analizi ve Modellemesi. *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 12(1), 17.
- Yeh, S. H., Chiu, L. H., Chang, H. (2011). Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel. *Engineering*, 3,942-948.
- Yıldız, B. (2017). Derin Çekme İşleminde Kalıp Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 477595.
- Yılmaz, İ. Ö. (2013). Otomotiv Sac Şekillendirme Kalıplarında Kullanılan Malzemelerin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makine*, 54(647),47-52.
- Zaid, A. I. O. (2016). Deep Draawing Mechanism, Parameters, Defects and Recent Results: state of the art. *14th International Symposium on Advanced Materials*, 146(5), 2348-4470. DOI: 10.1088/1757-899X/146/1/012009
- Zdravecká, E., Marton, M., Gmitterko, A., Tkáčová, J. (2014). Triboanalysis in Industry for PVD-Coated Stamping Dies. *Tribology in Industry*, 36(1),3-8
- Zein, H., El-Sherbiny M., Abd-Rabon, M., Shazly, M. E. (2013). Effect of Die Design Parameters on Thinning of Sheet Metal in the Deep Drawing Process. *American Journal of Mechanical Engineering*, 1(2), 20-29. DOI: 1 0.12691/ajme-1-2-1

- URL-1: Hedrick, A. (2016). Die Science: How Many Hits Does it Take to Get to the End of a Tool's Life?. Stamping Journal, <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/how-many-hits-does-it-take-to-get-to-the-end-of-a-tool-s-life->, (Ziyaret Tarihi: 22 Nisan 2020).
- URL-2: Madorsky, Y., Thompson A. (2005). Coating For Stamping and Forming Tools. Stamping Journal, <https://ahssinsights.org/forming/tooling/tooling-and-die-wear/>, (Ziyaret Tarihi: 22 Nisan 2021).
- URL-3: arascelik.com.tr/urunler/soguk-is-takim-celikleri/12379/11, (Ziyaret Tarihi: 15 Nisan 2021).
- URL-4: https://www.erdemir.com.tr/Sites/1/upload/files/Yassi_Urun_Katalogu_2020_TR-4649.pdf, (Ziyaret Tarihi: 15 Nisan 2021)
- URL-5: <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/coating-for-tamping-and-forming-tools>, (Ziyaret Tarihi: 22 Nisan 2021).
- URL-6: <https://www.titanit.com.tr/pvd-kaplama/>, (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2021.)

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- Edis, R.**, Sınmazçelik, T., Doğan, Y., Gökkuş, Y., Yalçın, C., Uçakkuş, Ö. E. (2021). Sac Şekillendirme Proseslerinden Derin Çekme İşleminin Proses Parametrelerinin İncelenmesi. *6. Uluslararası Mühendislik Ve Teknoloji Yönetimi Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 20-21 Kasım 2021.
- Edis, R.**, Yalçın, C., Özzaim, P., Yılmaz, Y., Yurdakul, Y., Sınmazçelik, T. (2020). Sac Şekillendirme İşletmesinde Fire Yönetimi Çalışmasına Bir Örnek, *Icontech Uluslararası Pozitif Bilimlerde Yenilikçi Araştırmalar Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 1 Mayıs 2020.
- Yalçın, C., Gökkuş, Y., **Edis, R.**, Uçakkuş, Ö. E., Yurdakul, Y. (2021). Derin Çekme İşleminde Zimba Hızı ve Yağlayıcı Etkisinin DD13 ve 304 Paslanmaz Çelik Üzerine Etkilerinin Nümerik ve DeneySEL Olarak İncelenmesi. *Uluslararası Bilimsel Gelişmeler Kongresi ICONSAD'21*, İstanbul, Türkiye, 22-25 Aralık 2021.
- Evecen, E. H., Subaşı, S., Uçakkuş, Ö. E., Yalçın, C., **Edis, R.** (2021). Sac Parça Görsel Kontrol Alanında REBA ve RULA Ergonomi Çalışması. *Uluslararası Bilimsel Gelişmeler Kongresi ICONSAD'21*, İstanbul, Türkiye, 22-25 Aralık 2021.
- Ertem, Y., Aral, S. F., Alkan, O., Bulut, B., Uçakkuş, Ö. E., **Edis, R.**, Yalçın C. (2021). Ulus Metal Firması'nda Dijitalleşme Çalışması Örneği. *Uluslararası Bilimsel Gelişmeler Kongresi ICONSAD'21*, İstanbul, Türkiye, 22-25 Aralık 2021.
- Gökkuş, Y., Doğan, Y., Yalçın, C., **Edis, R.**, Uçakkuş, Ö. E. (2021). Sac Şekillendirme Prosesinde Autoorm Simülasyon Programı ile Ürün Toleransının Sağlanması. *6. Uluslararası Mühendislik Ve Teknoloji Yönetimi Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 20-21 Kasım 2021.
- Yalçın, C., **Edis, R.**, Uçakkuş, Ö. E., Sınmazçelik, T. (2021). Derin Çekme İşleminde Zimba Hızı Değişiminin ve Yağlayıcı Kullanımının Etkilerinin Nümerik ve DeneySEL Olarak İncelenmesi. *Ankara IV. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, Ankara, Türkiye, 10 Nisan 2021.
- Yalçın, C., **Edis, R.**, Özzaim, P., Durali, H., Yurdakul, Y., Sınmazçelik, T. (2020). Sac Şekillendirme İşletmesinde SMED Çalışmasına Bir Örnek. *Icontech Uluslararası Pozitif Bilimlerde Yenilikçi Araştırmalar Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 1 Mayıs 2020.

ÖZGEÇMİŞ

Rabia Edis ilk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2015 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bir yıl öğrenim gördükten sonra kurum içi başarıya dayalı yatay geçişle birlikte Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümüne geçiş yaptı. Üç senelik Makine Mühendisliği Lisans eğitiminin ardından 2019 yılında bölümünü 3,29 ortalama ile bölüm 2.si olarak tamamladı. 2020 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 01.10.2019 tarihinden itibaren Ulus Metal San. ve Tic. A.Ş.'de Ar-Ge Mühendisi olarak çalışmaktadır.

