MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KALIPÇILIKTA KULLANILAN SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS İNCELEMESİ

ASLAN ÜNAL

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği (Türkçe) Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Oğuz GİRİT

EŞ-DANIŞMAN
Prof. Dr. Kelami ŞEŞEN

İSTANBUL, 2024

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KALIPÇILIKTA KULLANILAN SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS İNCELEMESİ

ASLAN ÜNAL
723217821

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği (Türkçe) Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Oğuz GİRİT

EŞ-DANIŞMAN
Prof. Dr. Kelami ŞEŞEN

İSTANBUL, 2024

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında yakın ilgi ve desteğini esirgemeyen ve beni teşvik eden, öğrencisi olmaktan onur duyduğum hocaların hocası eşdanışmanım Sn. Prof. Dr. Kelami Şeşen hocama, birlikte çalışmanın nadide örneklerinden birini gördüğüm danışman hocam Sn. Doç. Dr. Oğuz Girit'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sn. Prof. Dr. Bora Derin, Sn. Prof. Dr. Hüseyin Çimenoğlu, Sn. Prof. Dr. Lütfi Öveçoğlu, Prof. Dr. Onuralp Yücel, ve Dr. Masum Tünçay hocalarıma yıllardan süzülmüş rafine bilgilerini bana aktardıkları için teşekkürler ederim.

Çalışmalarım sırasında destek olan Matil Kalite ve Ar-Ge Müdürü Sn. Sinan Aras nezdinde tüm arkadaşlarıma çalışmalarımın bir parçası oldukları için müteşekkirim.

Test çalışmalarımda yardımcı olan Mebsan Kalıp, duayen kalıpçı Sn. Hasan Öztürker ve evlatları ile Sertel Vida, Sn. Serhat Dövenci ve Sn. Dr. Suat Aydın'a teşekkür ediyorum

Eğitim hayatımda hep yanımda olan Ağabeyim Zafer Ünal'ı manevi şahsında temsilen varlığıyla gurur duyduğum kızım Doç. Dr. Hande Baltacıoğlu'na teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının asıl ve asil mimarı eşim Nilgün, kızım Cansu ve Oğlum Cansel Ünal'a yürekten teşekkürler ederim.

Mart 2024 **Aslan ÜNAL**

İÇİNDEKİLER

SAYFA

TEŞEKKÜR ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **ii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vi**
TABLO LİSTESİ ..... **ix**
1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**
1.1. Tasarımda Malzeme Seçimi 6
1.2. Demir-Çelik Üretimi 12
1.2.1. AKÇT Avrupa Kömür-Çelik Topluluğu, (ECSC The European Coal and Steel Community) ve Avrupa Birliği 12
1.2.2. Roma Antlaşması ve Avrupa Ekonomik Topluluğu (AET) 13
1.2.3. Yüksek Fırın Çelik Üretimi 14
1.2.4. Alaşımlama Elementlerinin Çeliğe Etkisi 21
1.3. Takım Çelikleri 28
1.3.1. Takım Çelikleri Üretim Yöntemleri 34
1.3.2. Segregasyon (Toplanma) 35
1.3.3. Takım Çeliklerinin İşlenebilirliği 38
1.3.4. Soğuk İş Takım Çelikleri 39
1.4. Refrakter Metaller 41
1.5. Kalıp ve kalıpçılık ve Şekillendirme 52
1.5.1. Kalıp Türleri 54
1.5.2. İşleme/Şekillendirme 57
1.5.3. Metal Şekillendirmede Soğuk İşlemler 59
1.6. Tel Erozyon 63
1.7. Elektrik Çelikleri 67
1.8. Karbürler ve Segregasyon 71
1.8.1. Karbürlerin Genel Özellikleri 75

1.9. Bağlantı Elemanları ve Ovalama 81
1.9.1. Kalıp Ömrünü Etkileyen Faktörler 86
1.9.2. Çelikte Tufal Oluşumu 86
1.10. Triboloji ve Hasar Analizi 87
1.10.1. Aşınma Olgusu 87
1.10.2. Sünek Kırılma 88
1.10.3. Gevrek Kırılma 88
1.10.4. Aşınmanın Ana Bileşenleri 89
1.10.5. Sac Levha Şekillendirmede Triboloji 91
1.10.6. Kesici Takım Aşınması 93
1.10.7. İmalat ve Performans Sorunları 99
2. MATERYAL ve YÖNTEM 102
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 122
3.1. Elektrik Sacı Laminasyon İmalatı 122
3.2. Görüntüleme Çalışmaları 126
3.3. Vida İmalatı 129
3.4. FactSage 8.2 138
4. SONUÇLAR VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ 145
KAYNAKLAR 150
ÖZGEÇMİŞ 167

ÖZET

KALIPÇILIKTA KULLANILAN SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS İNCELEMESİ

Tasarımda malzeme seçimi, makine mühendisliğinin, sorunlara sürdürülebilir çözümler üretmeye yönelik eğitiminin önemli bir parçasıdır. Kalıp imalatı, ana girdisi çelik olan yeniliğe açık bir alandır. Kalıp yapımında kullanılan çeliklerin tamamının ithalat yoluyla sağlandığı düşünüldüğünde malzeme daha da önemli olmaktadır. İsrafı azaltacak çalışmalar ile önemli kazanımlar elde edilebilir. Çelik, metaller içerisinde en yaygın olarak kullanılanlardan biridir. Birçok farklı türü olan çeliklerden soğuk iş takım çelikleri (SİTÇ) özellikle kalıp sanayisinde sıklıkla tercih edilmektedir. Son zamanlarda geleneksel SİTÇ'e ek olarak yeni nesil SİTÇ de kullanıma sunulmuştur. Bu çalışma, geleneksel ve iki adet yeni nesil SİTÇ'in zımba malzemesi olarak elektrik motorunda kullanılan rotor laminasyon silisli saclarının şekillendirilmesinde ve vida yapımında ovalama kalıplarında kullanımı incelenmiştir. Yeni nesil SİTÇ'in geleneksele göre daha uzun ömürlü bir kullanım imkanı sunduğu tespit edilmiştir. İlgili çeliklerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) yardımıyla incelenmiştir ve oluşturabilecekleri karbür yapıları da FactSage® 8.2 termodinamik yazılım programı ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yeni nesil SİTÇ'de hem ince ve homojen dağılımlı hem de çoklu karbür yapılarının oluştuğu görülmüştür. Niobyum ve Molibden açısından da zengin karbür yapıları ile birlikte homojen yapılı ince karbür yapılarının yeni nesil SİTÇ'in sahip olduğu uzun kullanım ömrünün nedeni olduğu düşünülmektedir. Genel olarak refrakter metallerin takım çeliklerinde kullanımı ile özel olarak molibden ve niyobyumun katkısı ile hasar analizi ve tribolojik incelemeler yapılmış, aşınan kalıplar incelenmiştir. Aşınma kayıplarının oluşma nedenleri araştırılmıştır.

Mart 2024 **Aslan ÜNAL**

ABSTRACT

COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF COLD WORK TOOL STEELS USED IN DIE INDUSTRY

Material selection in design is an important part of mechanical engineering's education to produce sustainable solutions to problems. Die manufacturing is open to innovation as of the main input steel. Considering that all of the steel used in die making is imported, the material becomes even more important. Significant gains can be achieved with efforts to reduce impropriety. Steel is one of the most widely used metals. Cold work tool steels (CWTS) are frequently preferred in die industry. Recently, in addition to traditional CWTS, new generation CWTS have been put into use. This study examines the use of traditional and two new generation CWTS as lamination in pressing of rotors used in electric motors and thread rolling dies for screw manufacure. It has been observed that the new generation CWTS offer longer lifespan compared to traditional ones. The microstructures were investigated using scanning electron microscope (SEM) and x-ray spectroscopy (EDS), and the carbide structures they could form were evaluated using FactSage thermodynamic software. It has been observed that both fine and evenly distributed and multiple carbide structures are formed in the new generation CWTS. The carbides in new generation CWTS were also rich in Niobium and Molybdenum. These were considered as the reasons for long service life of CWTS. With the use of refractory metals in tool steels, damage analysis and tribological examinations were carried out with the contribution of molybdenum and niobium in particular, and wearing molds were examined, the causes of wear losses were investigated.

March 2024 **Aslan ÜNAL**

ŞEKİL LİSTESİ

SAYFA

Şekil 1.1. Wellington'un kitabından ilgili bölüm 6
Şekil 1.2. Tasarım-malzeme-üretim bileşenlerinin ilişkileri 12
Şekil 1.3. Demir-karbon faz diyagramı 14
Şekil 1.4. Yüksek fırın şematik gösterimi 16
Şekil 1.5. Kalıp ömrünü etkileyen faktörler 33
Şekil 1.6. (a) NATO yayını kitap (b) AeroSpace corporation yayını kitap 41
Şekil 1.7. Jack Paul Tosdale master tezi 42
Şekil 1.8. Calister'e göre refrakter metaller 44
Şekil 1.9. Habashi'ye göre refrakter metaller 45
Şekil 1.10. Refrakter metaller tümü 46
Şekil 1.11. Otto Thallner, takım çeliği-özlü bir elkitabı, 1898 47
Şekil 1.12. Lockheed tarafından yayınlanan (1963) açıklamalı biyografi 50
Şekil 1.13. Dayanım-yoğunluk ahsby diyagramında mo alaşımı 51
Şekil 1.14. Elastisite modülü-yoğunluk ahsby diyagramında mo alaşımı 51
Şekil 1.15. Kalıp maliyeti 55
Şekil 1.16. Kalıp tasarımında temel kurallar 56
Şekil 1.17. Zımba yüzü geometrileri a) düz, b) içbükey, c) içbükey, and d) dışbükey. (Taylan Altan-Editör, 1998, Schuler Metal Forming Handbook, s. 275, Springer, Berlin Heidelberg, Almanya) 60
Şekil 1.18. Saç kesme presi ana parçalar 61
Şekil 1.19. Tel erozyon mekanik işlemler şematik gösterimi 66
Şekil 1.20. Karbür-yapı-özellik ilişkisi 71
Şekil 1.21. Periyodik tabloda kuvvetli karbür oluşturan elementlerin konumları 72
Şekil 1.22. Karbürlerin karşılaştırmalı sertlikleri-Yeni (2017), ve eski (1980) 75
Şekil 1.23. Ellingham Diyagramında elementlerin karbür oluşumları 77
Şekil 1.24. Karbür atomlarının şematik gösterimi 78
Şekil 1.25. Çok bileşenli karbürlerin mekanik özellikleri ile elektron ve bağ yapıları sistematik olarak incelenmesi 80

Şekil 1.26. Magnuson-mattesini, max fazı elementleri 81
Şekil 1.27. Bağlantı elemanları ve ovalama 82
Şekil 1.28. a. standart civata b. standart vida c. saplama 83
Şekil 1.29. (a) Tam dolu, (b) tam dolu olmayan hatvede tipik dişüstü çizikler 85
Şekil 1.30. Delme esnasında üründe oluşabilecek hasarlar 92
Şekil 1.31. Kesme düzlemi teorisi ve etal kesmede sıcaklık dağılımının gösterimi 93
Şekil 1.32. a) İkili aşınma, b) üçlü aşınma, c) abrasif aşınma mekanizması 95
Şekil 1.33. Yapışma ve transfer 96
Şekil 1.34. Kalça eklem protezinde darbe aşınmasının şematik gösterimi 97
Şekil 1.35. Hasar oluşumunda süreçler 101
Şekil 2.1. Madalyon baskı kalıbı (erkek), madalyon ve dişi kalıp 106
Şekil 2.2. Ürünler ve zımba seti 108
Şekil 2.3. Pres makinesinin genel görünümü ve zımba dizilimi 109
Şekil 2.4. Delme presinin şematik gösterimi 110
Şekil 2.5. Üretimi yapılan rotor laminasyon 112
Şekil 2.6. Ham ve taşlanmış D2, C2 ve K2 çelikleri 113
Şekil 2.7. Ovalama kalıbının işlenmesi 114
Şekil 2.8. Isıl işlem uygulaması protokolü grafiği 118
Şekil 2.9. Tel erozyon ile zımba çıkartılan ısıl işlemli ø300x100 mm takoz 119
Şekil 2.10. Sertlik ölçümleri (a) Takoz değeri (b) Zımba ölçümü (c) Zımba değeri 120
Şekil 2.11. Ø4,0 mm DIN 1.3343 HSS Havşa Başlı Patlama Zımbası ve Tel Erozyon ile işleme sonrası 1,2 mm Kesici Zımba 121
Şekil 2.12. Kuyumculukta yapılan mücevherat kalıbı 121
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan (a) Sac metal kesme kalıbı, (b) Kullanılan zımba ve (c) Basılan örnek parça 123
Şekil 3.2. Kullanım ömrü dolan zımba ile basılan hasarlı ürünlerde çapak stereo mikroskop görüntüsüleri 125
Şekil 3.3. (i) Aşınmanın kaynakları olan bölgeler, (ii) aşınmış zımba kenarı 126
Şekil 3.4. 500 büyütme görüntüler 126
Şekil 3.5. 1000 büyütme görüntüler 126

Şekil 3.6. 2500 büyütme görüntüler 127
Şekil 3.7. SİTÇ'e ait SEM mikro yapılarından alınan 1,2,3 numaralı alanların EDS analiz sonuçları (a) D2, (b) C2, (c) K2 128
Şekil 3.8. İmalatı yapılan D2, C2 ve K2 ovalama kalıp takımları 130
Şekil 3.9. İmalatı yapılan Ø4x50 mm sunta vidası 130
Şekil 3.10. Diş açma makinası 131
Şekil 3.11. Tezgahta kalıp takımı, sabit (1) ve hareketli (2) kalıp 131
Şekil 3.12. Kullanılmış kalıpta dişlerde farklı aşınmalar, h=942, L=820 ve h=747, L= 690 µ 132
Şekil 3.13. Dişüstü 50x büyütme 133
Şekil 3.14. Kullanılmış kalıpta az aşınmış bölgede dişlerde ve dişdibinde form değişiklikliği, h=993 ve h=339 µ 133
Şekil 3.15. Dişüstü 49x büyütme 134
Şekil 3.16. Dişüstü 104x ve 202 büyütme 134
Şekil 3.17. Dişüstünde oluşan kırık görüntüsü 503x büyütme 135
Şekil 3.18. Dişüstünde oluşan yorulma çatlağı yüksek büyütme (2090x) çatlak görüntüsü 136
Şekil 3.19. Ovalama kalıpları 136
Şekil 3.20. Makro sertlik ölçümü alınan bakalitli numune genel görüntüleri 137
Şekil 3.21. D2 çeliğine ait faz diyagramı 139
Şekil 3.22. D2 çeliğine ait M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ tip fazların oranı 139
Şekil 3.23. C2 çeliğine ait faz diyagramı 140
Şekil 3.24. C2 çeliğine ait M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ tip fazların oranı 140
Şekil 3.25. K2 çeliğine ait faz diyagramı 141
Şekil 3.26. K2 çeliğine ait M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ tip fazların oranı 141
Şekil 3.27. Menevişleme sırasında karbür oranlarının (a) zamana, (b) sıcaklığa göre değişimi 144

TABLO LİSTESİ

SAYFA

Tablo 1.1. AISI – SAE sistemindeki ana gruplar 19
Tablo 1.2. Metaller için birleşik numaralandırma sistemi 20
Tablo 1.3. Temel alaşımlama elementlerinin özellikleri 26
Tablo 1.4. 1960-1970 yılları arasında Refrakter Metaller kongreleri 43
Tablo 1.5. Refrakter metaller erime sıcaklıkları ve yoğunlukları 44
Tablo 1.6. Temel metal şekillendirme işlemleri sınıflaması 59
Tablo 1.7. Tel erozyon kesme işlemini etkileyen faktörler 66
Tablo 1.8. Elektrik çeliklerinin tipik kimyasal bileşimleri 70
Tablo 1.9. Karbürlerin genel özellikleri 76
Tablo 2.1. GTİP'lere göre ithal edilen takım çeliklerinin dağılımı 103
Tablo 2.2. Son 10 yıl takım çelikleri ithalat bilgileri 104
Tablo 2.3. Geleneksel soğuk iş takım çelikleri 105
Tablo 2.4. Yeni nesil soğuk iş takım çelikleri 105
Tablo 2.5. Çalışmada kullanılan soğuk iş takım çeliklerine ait alaşım elementleri kimyasal analizleri 111
Tablo 2.6. Deneme amaçlı özel imal edilen ovalama kalıp setleri 113
Tablo 3.1. Zımba malzemesine göre basılabilen ürün sayısı 124
Tablo 3.2. Zımba malzemesine göre ölçülen sertlik değerleri 124
Tablo 3.3. Kalıp malzemesine göre üretilebilen vida sayısı 132
Tablo 3.4. Aşınma bölgelerine göre sertlik ölçümleri 138
Tablo 3.5. D2, 2 ve K2 çeliğinde ağırlıklı karbür oranları 142
Tablo 4.1. D2 ve S1 takım çeliklerinin kimyasal bileşimi 146

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Geleceğin ürünlerinin malzeme seçiminde belirleyici bir rolü olduğu kalıpçılık sektörü için çelik konusu inovasyon potansiyeli oldukça yüksek bir ilgi alanıdır. Bugün bilgiyi ön planda tutan yeni üretim ve işleme teknolojileri ile malzemelerin kalitesi önemli ölçüde gelişmiş durumda ve bu gelişmeler artan bir ivmeyle devam etmektedir. Makine mühendisliğinin geldiği noktada yeni nesil malzemelerle, modern ısıl işlemler ve ileri kaplama teknolojileri yardımıyla her işin kendi doğasına uygun özgün özel ürünlerin tasarımı yapılabilmektedir. Bu tez, soğuk şekillendirme kalıpları özelinde modern takım çeliklerinin yenilik anlayışını betimlemektedir, Geleneksel ve Yeni Nesil Soğuk iş Takım Çelikleri (SİTÇ) kimyasal kompozisyon ve alaşımlama elemanları olarak refrakter metaller kullanılması ekseninde karşılaştırılarak performansları değerlendirilecek ve yorumlanacaktır.

Almanya'da otomobil devlerinden olan bir firmanın şekillendirme yöneticisi olan H. D. Schacher bir seminerde sektördeki ilerlemeleri anlatan durumu "Eskiden 10 yılda 3 yeni model piyasaya çıkarıyorduk bugün her 3 yılda 10 yeni model sunuyoruz" şeklinde özetlemiştir [1].

Otomotiv endüstrisindeki son trend, araçların ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırmak için gelişmiş yüksek dayanımlı çelik (AHSS) kullanımını geliştirmektir. Bu çelikleri işlemek, örneğin presle şekillendirme, delme, kesme gibi işlem süreçleri için temel olarak 'işleyen' takım çeliklerinin 'işlenen' çeliklerden daha dayanıklı olmaları eşzamanlı olarak gereklidir. Takım çelikleri esas olarak demir ile birlikte yüksek karbon, yüksek krom, molibden, vanadyum ile tungsten ve diğer karbür oluşturucu elementlerden oluşur. Uygun ısıl işlemler yardımıyla da çeliklerin mekanik özellikleri daha da geliştirilebilir [2].

Avrupa'da taşıt yan sanayi çelik endüstrisi malzemeden optimum faydalanmak için 1. Yeni ürünler geliştirilmesi, 2. Üretim proseslerinde yapılacak iyileştirmeler ve 3. Tasarım ile ilgili hedefler ilan etmişlerdir [3].

WSA, (World Steel Association-Dünya Çelik Birliği), ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body-Ultra Hafif Çelik Oto Kaportası) Programı ile bunun öncüsü olmuştur [4].

Sanayi Devriminden günümüze dek, Batı öncü olmak üzere tüm dünyada betonarme dahil, medeniyet göstergeleri olan her tür bina ve köprü vb. ile makine yapımında kullanılmakta olan tüm metaller arasında gerek ağırlık, gerek parasal değer olarak Demir-Çelik içeren hammaddeler, endüstriyel ara-ürünler ve nihai ürünler, diğer tüm metallerin toplamından fazla alanlar oluşturmaktadır.

Malzeme ve Malzeme Seçimi, mühendislikte tasarım sürecinde önemli bir rol oynar. Belirli bir ürün için uygun malzeme seçimi, tasarımcılar için en önemli görevlerden biridir. Nihai ürünün hedeflenen işlevlerini ve gereksinimlerini karşılamak için tasarımcıların çeşitli malzemelerin performansını analiz etmesi ve kesin işlevlerle uygun malzemeleri belirlemesi gerekmektedir. Farklı özelliklere sahip çok sayıda malzemenin bulunması nedeniyle, malzeme seçim süreci karmaşık ve zaman alıcı olduğu kadar yorucu bir iştir. Bir ürün imalatında en iyi alternatif malzemeyi seçmek için malzeme seçimine yönelik sistematik ve verimli bir yaklaşım gerekliliği vardır.

Takım çelikleri, "belli amaca yönelik bir kullanıma uyarlanmış bir parça veya bileşen halinde bir malzemeyi kesmek, biçimlendirmek veya başka bir şekilde şekillendirmek için alet ve/veya araçlar yapmak için kullanılan herhangi bir çelik" olarak tanımlanır. Bu tanıma rağmen, farklı uygulamalar için de büyük miktarlarda takım çeliği kullanılmaktadır, örn. mükemmel mekanik özellikler sundukları için yaylar, motor parçaları, yataklar gibi makine elemanları. Eski uygulamalarda her ne kadar yalın karbon (Plain Carbon) çelikleri bu maksatlar için kullanılmış olsa da üretim süreçleri ve teknolojilerinin gelişmesine paralel olarak daha iyi özelliklere sahip daha yüksek alaşımlı çelikler geliştirmek mümkün olmuştur [5].

Bir Takım Çeliğinin çalışma sırasındaki başarı performansı, tasarımın doğruluğuna, yapım hassasiyetine bağlı kalınmasına, doğru çelik seçimine ve bu çeliğe uygun ısıl işlemlerin uygulanmasına bağlıdır [6].

Refrakter Metaller denildiğinde ilk akla gelen “süperalaşımlar” olmaktadır. İleride bahsedileceği üzere alaşımlı çeliklerin gelişmeye başlaması 1800’lü yılların sonu iken askeri malzemeler-uzay-havacılık başta olmak üzere refrakter metallerin yaygın kullanımı 1900’lü yılların II. Yarısından itibaren dünyada hızla artmıştır. İlerleyen yıllarda enerji sektöründe türbin kanatları gibi, otomotiv, elektronik, nükleer ve makine imalatı için ileri mühendislik malzemeleri geliştirilmesi yönünde araştırmacıların ilgi

odağında olmuş, takım çeliklerinde refrakter metallerle alaşımlama da bu gelişmelere paralel olarak gelişmiştir. Yanısıra, takım çelikleri konuları, refrakter metallerin bilimsel kullanımı yoluyla "münhasır", yani "kendine özgü" bir disiplin haline gelmiştir. Takım çelikleri ile süperalaşımların çok sayıda ortak özelliği vardır.

Katı, örneğin kömür; biyomalzemeler, pirina (zeytin biyokütlesi), sıvı; örneğin fuel-oil, dizel, veya gaz; örneğin doğal gaz türevleri, fosil yakıtlar kullanılarak kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye, mekanik enerjiyi ise elektrik enerjisine dönüştürme işlemleri (termik) enerji santrallerinde yapılmaktadır. Birkaç (MW) MegaWatt'dan yüzler, hatta binlerle ifade edilen MW kapasitelere sahip enerji üreten bu tesisler temel olarak iki ana grup üniteden oluşmaktadır: Kazan ve Turbo-Jeneratör. Kazan; ısıtıcı, süper ısıtıcı, kızdırıcı, ekonomizer, kondenser gibi farklı isimlerle adlandırılan, ancak ana çalışma prensipleri birbirine benzer olan çok sayıda ısı değiştiricilerin (eşanjör, heat-exchanger) kümelenmesinin tasarlandığı, bu kümeyi oluşturan tek tek birimlerin senkron çalıştığı, birinin çıktısının (output) bir sonrakine girdi (input) olduğu bir sistemler bütünüdür. Turbo-Jeneratör ise; ya yakıtı doğrudan yakarak veya kazandan gelen buharın tahrikiyle çok yüksek devirle dönen Türbin (Gaz Türbini veya Buhar Türbini) ile ona akuple ve türbinden aldığı tahrikle aynı yüksek devirde dönerek manyetik alan oluşturarak elektrik üreten rotor/stator grubu (Alternatör) Jeneratör'den oluşmaktadır. Bu tür enerji santrallerinde verim, çıkan enerjinin giren enerjiye oranı ile hesaplanmaktadır. Verimi oluşturan en önemli iki parametre sistemde bulunan tüm ekipmanların çalışma basınç ve sıcaklıklarıdır. Bu bileşenlerin yüksekliği oranında verim artmaktadır. Son yıllarda verim, tüm ekipmanlarda kullanılmakta olan mühendislik malzemelerinin refrakter metaller kullanılarak geliştirilen alaşımlarının daha yüksek basınç ve sıcaklık değerlerine ulaşabilmesi sayesinde artmıştır. Artık yeni nesil alaşımlı daha ince/hafif borular kullanılarak daha yüksek basınç ya da türbin kanatlarında gelişmiş kimyasal kompozisyonlara sahip kimyasal elementlerle daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabilmek mümkün olmaktadır.

Takım çelikleri, çeşitli ASTM spesifikasyonları da dahil olmak üzere çeşitli standartlarda üretilir. Çelik konusunda çalışmakta olan sivil toplum kuruluşları tarafından yayınlanan takım çeliklerini kapsayan çalışmalar takım çeliği üreticilerinin normal üretim uygulamalarını temel olarak temsil eden çok sayıda yararlı bilgi içerir. Ancak belirli ticari hedeflere ulaşmak için bireysel üreticiler veya takım çeliği kullanıcıları tarafından daha

ileri bazı kimyasal ve/veya metalürjik standartlar uygulanır. Genel olarak takım çelikleri için ASTM A600, A681 ve A686 standartları alım-satım şartnamelerinde teknik satınalmacılar için bir temel olarak kullanılabilir:

- ASTM A600, tungsten ve molibden yüksek hız çelikleri için standart,
- A681, sıcak iş, soğuk iş, darbeye dayanıklı, özel amaçlı ve kalıp çelikleri standartı,
- A686, suda sertleşen takım çelikleri için standart.

Bununla birlikte, birçok durumda piyasada takım çelikleri üreticisinin adlandırdığı ticari isimlerle işlem görür. Herhangi bir üreticinin belirli bir takım çeliği, kendine özgü bir uygulamada, başka bir kaynaktan satın alınan aynı AISI tipi sınıflandırması bir diğer alternatif takım çeliğine göre daha iyi performans gösterir [7].

Takım çeliği denince akla ilk "karbür" gelmektedir. Bu nedenle teorik ve literatur araştırmalarıyla kimyasal ve görüntü analizlerinde karbüre özel bir önem verilmiştir. Soğuk iş takım çeliklerinde alaşım elementlerinin ana önceliği, matris içinde aşınmaya dayanıklı bir karbür yapı oluşturmaktır. Genellikle alaşım elementlerinin atomik yarıçapları, demirin atomik yarıçapına yakın olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, alaşım elementleri, ev sahibi ana matris (Fe) içinde çözünerek (solubility) misafir olarak yerlerini bulmada sorun yaşamazlar.Yakın da olsa yarıçaplar arasındaki farklar nedeniyle ana matrisin kafes yapısında yerel gerilmelerin oluşmaması için alaşımlama elementleri demirin ana matrisi içinde karbürler oluştururlar. Diğer çelik türlerine gore takım çeliğine üstün olarak farklı özellik sağlayan aktor karbürlerdir. İleride detaylı olarak inceleneceği üzere karbürler mukavemet ajanları olarak çalışırlar, ancak aynı zamanda çatlak başlatma yerleri olarak da işlev görebilirler. Kullanım sırasında çeliklerde bazı bölgesel sıcaklık farklılıkları olabilir. Karbürlerin ısıl (termal) genleşme katsayıları ve Young modülleri matrisinkinden farklıdır. Bu nedenle, matris/karbür ara yüzleri, özellikle matrisle yarı uyumlu veya yarı tutarlı iseler, çatlak başlatma bölgeleri olma potansiyelleri vardır [8].

Yorulma ve kırılma kavramları sıklıkla karıştırılmaktadır. Aslında alanlar birbiriyle çok ilişkilidir, çoğu durumda bunlara ait analizler birbirini tamamlayıcı niteliktedir. Yorulma ve kırılma mekaniği analizleri arasındaki farklar şu temel felsefeleri ile açıklanabilir: Yorulma, çatlamamış (sağlam) bir parçanın kırılmaya kadar olan ömrünü tahmin ederken, kırılma mekaniği ise bir çatlağın mevcut çalışma koşullarında somut bir çatlağın kırılmaya yol açıp açmayacağını, ilerleyip ilerlemeyeceğini hesaplar. Yorulma, tekrar

eden ve/veya değişen birikimli (kümülatif) yük etkisi altında oluşan bir mikroçatlağın kademeli olarak boyutsal büyümesi sonucu hasar oluşumudur [9].

Triboloji, görece hareket hâlindeki etkileşimli yüzeylerin sürtünme, aşınma ve yağlama ilkelerini inceleyen bilim ve mühendislik alanıdır. Makinelerde birbirine temas eden hareketli yüzeylerde oluşan sürtünme, küresel enerji kaynaklarının etkili bir şekilde kullanılmasının önünde büyük bir engel oluşturuyor. Öyle ki küresel enerji kaynaklarının yaklaşık üçte biri yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetinin üstesinden gelmek için harcanıyor. Yine bu yüzeylerde meydana gelen aşınmalar da malzeme israfı ve mekanik performans kaybının başlıca nedeni olarak gösteriliyor. Bu yüzden triboloji alanındaki gelişmeler ve teknolojik uygulamalar enerji ve malzeme tasarrufu ile birlikte sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşıyor. Günümüzde yüksek hızlarda çalışan makinelerin bileşenleri aşırı sürtünmelere, yüksek oranda aşınmalara ve zorlanmalara maruz kalıyor. Sonuçta enerji sarfiyatı artıyor, bu bileşenlerin kullanım ömürleri kısalıyor, üretim standartlarının korunması ve üretim güvenilirliği azalıyor. Bu nedenle yüksek teknolojilerin kullanıldığı alanlarda sürtünme ve aşınmanın olumsuz etkilerini en aza indirmek gerekiyor [10].

Abrazif tip aşınma , aşınmanın en yaygın görülen şeklidir. İstatistiklere göre, üretimdeki aşınma hasarlarından kaynaklanan toplam kaybın yaklaşık yarısı abrazif aşınmadan kaynaklanmaktadır, bu nedenle abrazif aşınmanın incelenmesi çok önemlidir. En yalın anlatımla genel olarak abrasif aşınma mekanizması, aşındırıcı parçacığın çizme hareketidir, bu nedenle bir mikro kesme işlemi olduğu ifade edilebilir. Abrasiv aşınmada önemli rol oynayan başlıca etkili parametreler ise; temas eden malzemelerin sertlik farklılıkları, uygulanan yük ve kayma hızı olarak sayılabilir [11].

Çalışmalar sırasında Türkçe ve İngilizce çok sayıda kitap, ansiklopedi, elkitabı, makale vb. türü dökümanlarla literatür taraması yapılmış ve güncel olanlar ve yakın tarihli olanlardan ve eski tarihli, ancak güncelliğini sürdüren başyapıtlardan yararlanılmıştır.

1.1. Tasarımda Malzeme Seçimi

Amerikan Arthur Mellen Wellington'un (1847-1895), "Mühendislik Ekonomisi (Engineering Economy) alanının ilk öncüsü olduğu kabul edilir. Sanayi mühendisliğinin bu dalı, 1870'lerden itibaren mühendislik uygulama ve eğitiminin gelişmesine katkılarda bulunmuş, analiz metodolojileri geliştirilmesini sağlamış ve bilgiyi yayarak mühendislik uygulama ve eğitiminin önemli bir bileşeni olmuştur [12].

Arthur Mellen Wellington "The Economic Theory of the Location of the Railways" kitabını yazan Amerikalı bir demiryolu inşaat mühendisiydi. Wellington, kitabının ilk sayfasında yazdığı; (Şekil 1.1) *"Mühendislik genellikle ifade edilen biçimiyle salt 'inşa etme' sanatı olduğu" kabulü yerine; "mühendislik, herhangi bir beceriksizin iki dolara yarım-yamalak yapacağı bir işi, bir dolara ve daha iyi yapabilme sanatı"* olduğunun düşünülmesinin daha uygun olacağı ifadesi bir asırdan fazla zamandan beri kullanılmaktadır [13].

> It would be well if engineering were less generally thought of, and even defined, as the art of constructing. In a certain important sense it is rather the art of not constructing; or, to define it rudely but not inaptly, it is the art of doing that well with one dollar, which any bungler can do with two after a fashion.

Şekil 1.1. Wellington'un kitabından ilgili bölüm [13]

Mühendislik ve Teknoloji için Akreditasyon Kurulu ABET (The Accreditation Board for Engineering and Technology), mühendisliğin tanımını; "Çalışma, deneyim ve kılgılarla kazanılan matematiksel ve doğa bilimleri değerlerinin, malzemeler ve doğanın güçlerini, ekonomik, insanlık yararına yollar geliştirmek için yorumlanarak uygulandığı meslek" olarak yapmaktadır [14].

"Malzeme Seçimi" tek başına bir süreç değil, "mühendislik tasarımı" olarak adlandırılabilecek 'sorunlara yeni çözümler üretme ve yeni ürünleri piyasaya sürmeye yönelik daha geniş sürecin bir parçasıdır. Yukarıda anlatılan ABET mühendislik tanımı düşünülerek, tüm süreç için uygun terminoloji bunu "ürün gerçekleştirme süreci" (PRP - Product Realization Process) olarak adlandırmaktır. Malzemelerin doğru ve verimli mühendisliğin temelidir, çünkü mühendislik, ihtiyaçları karşılamak için malzeme/ler

kullanarak yeni şeyler yaratma işinin ta kendisidir; ABET'e göre, her adımın iyi tanımlanmasıyla sıkı bir şekilde yapılandırılmak üzere mühendislik tasarımı:

1- İstenen ihtiyaçları karşılamak için bir sistem, bileşen veya süreç geliştirme işlemidir,

2- Temel bilimler, matematik ve mühendislik bilimleri uygulanarak belirtilen bir hedefi karşılamaya yönelik kaynakları, sürdürülebilir ve en uygun şekilde dönüştürmek için bir karar verme sürecidir [15].

Alman Mühendisler Birliği (VDI - Verein Deutscher Ingenieure) tarafından yayınlanan ve endüstriden kıdemli tasarımcılardan oluşan bir Çalışma Grubu tarafından geliştirilen (1973) VDI Yönergesi #2222, teknik ürünlerin kavramsal tasarımı için bir yaklaşım ve bireysel yöntemler tanımlar ve bu nedenle özellikle yeni ürünlerin geliştirilmesi için uygundur. Daha yeni (1993) VDI Kılavuzu #2221 (Teknik sistemler ve ürünler geliştirmek ve inşa etmek için metodoloji) ise, mekanik, hassasiyet, kontrol, yazılım ve süreç mühendisliği alanlarındaki yaklaşımın genel uygulanabilirliğini vurgulayarak, teknik sistemlerin ve ürünlerin tasarımına genel bir yaklaşım önermektedir. Bu yaklaşım, teknik sistemlerin temellerine ve şirket stratejisine uygun temel çalışma adımlarını içerir. VDI 2222 sayılı "Teknik Ürünlerin Tasarımı" başlıklı Alman yönergelerine göre temel çalışma adımları aşağıdaki sıralamaya göre yapılabilir:

1- Bir ihtiyacı belirleme,

2- Sorunu tanımlama,

3- Spesifikasyonların oluşturulması,

4- Bilgi toplamak,

5- Kavramsal çözümler üretmek,

6- Analiz ve optimizasyon, fonksiyonların belirlenmesi,

7- Tasarımın ön düzeni, modüller oluşturma,

8- Detay tasarımı, anahtar çözüm modülleri geliştirme,

9- Üretim-çalışma talimatları hazırlama, değerlendirme,

10- Sonuçların sunulması,

11- Üretim için onay ve gerçekleşme [16].

İmalat, genellikle basit veya şekilsiz olarak tedarik edilen işlenmemiş malzemelerin, belirli şekil, yapı ve tanımlanmış işlevsel ihtiyaçları karşılamaya yönelik bileşenleri bütüyle bulunduran nihai ürünlere dönüştürülmesini içerir. Final hedef ürünlere bu dönüşüm, malzemelerin konfigürasyon özelliklerinde kontrollü değişiklikler üretmek için enerjinin farklı formlarını uygulayan çok çeşitli işlemler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu farklı enerji türleri mekanik enerji, ısı enerjisi, kimyasal enerji ya da elektrik olabilir. Sonuçta elde edilen ürün, tasarım aşamasında amaca yönelik olarak tanımlanan fonksiyonel gereksinimleri karşılamak içindir. Eski üretim anlayışında, tasarlamak ve imal etmek iki ayrı disiplin, iki ayrı uzmanlıklar gerektiren müstakil mühendislik sahaları olarak düşünülürken bugün modern üretim yönetimi maliyet ve süreç unsurlarını ön planda tutmaktadır. Taguchi'ye göre; üretim ekosisteminde yer alan tüm aktörlerin verimli bir şekilde üretilebilen, güvenilir bir şekilde çalıştırılabilen ve kullanımı ve bakımı kolay, geri dönüştürülebilir işlevsel bir ürün sağlamak için eşzamanlı olarak birlikte çalışmasını gerektirir [17].

Kalıp tasarımında çelik malzeme kullanımında o kalıbın yapımından sonra maliyete karşın sağlanabilecek faydalara etki edebilecek ve tasarımcıyı karar vermede zorlayabilecek cevapları gerekli birden çok soru vardır: Faydanın maksimum olması için beklentiler nelerdir? Hangi çelik seçilecektir? O çelik için nasıl bir ısıl işlem uygulanmalıdır? Olası deformasyon bozulmalarında sorun giderme ile ilgili çalışmalar toplam maliyete ne kadar bir ek yük getirecektir?

Tasarım, diğer işler yalın bir mesleki teknik bir faaliyet olmayıp bir sanat biçimidir. Kesselring ise (Almanya, 1942) teknik ve ekonomik kriterlere göre değerlendirerek teorisinde beş ilke anlatılmaktadır:

- minimum üretim maliyetleri ilkesi
- minimum alan gereksinimi ilkesi
- minimum ağırlık ilkesi
- minimum kayıp ilkesi
- optimum kullanım ilkesi.

Teknik eserlerin tasarımı ve optimizasyonu, matematiksel yöntemler yardımıyla en iyi çözüm bulunabileceği, teknik ve ekonomik kuralların eşzamanlı uygulanması ile

karakterize edilir. Bu ise yapılacak işe uygun malzeme seçimine, üretim yöntemlerine doğrudan bağlıdır [18].

Bir malzeme seçiminde belki de tasarımcıyı en çok zorlayıcı nokta, o malzemenin zamanında bulunup bulun(a)mayacağıdır. Yapmakta olduğumuz işin durağan olmadığını düşünürsek ürün ve işimiz geliştikçe seçilen malzeme ve üretim süreçleri de senkron olarak gelişmelidir. Yaptığımız iş ve veya ürün olgunlaştıkça, düzeni, detayları, malzemeleri ve üretim teknikleri rafine edilip, daha az soyut hale gelmelidir [19].

Belirli bir amaç için en uygun malzemenin seçimi, ürün geliştirme ve tasarım fonksiyonu açısından çok önemlidir. Malzemeler, ürün fonksiyonunu, onu imal etmek için kullanılacak zamanı, üretim sistemlerini, kullanıcının memnuniyetini, sahiplenilmesini, kullanılabilirliğini, çalışma ortamını ve maliyetini karmaşık bir yolla etkiler.

Malzeme Seçimi; maliyeti veya ağırlığı düşürmek için mevcut ürüne alternatif tasarım çeşitlilikleri için yapılabileceği gibi, yeni bir yasal düzenlemenin gerekliliklerini karşılamak, arıza oluşumunun üstesinden gelmek, farklı pazar taleplerini karşılamak veya yeni bir ürün tasarlamak için de kullanılabilir. Her ne kadar başlangıç noktası ve bilgi ihtiyaçları farklı olsa da mevcut ve yeni ürünler için malzeme seçim süreçleri birbirlerine benzerler. Çoğu durumda tasarımcı mühendis için sadece detaylı, ulaşılabilir ve güncel bilgi değil ayrıca ek olarak disiplinler arası "Karar Verme" bilgisi de gereklidir.

Malzemelerin kullanımı ve geliştirilmesindeki tarihsel evrim, medeniyetin başlangıcından günümüze dek bilimin disipinler arası ilerlemesini yansıtır. Taş devrinde taş ve ahşap gibi mevcut malzemelerin kullanılmasının ardından önce bakır ve bronz (Bronz Çağı) ve demir (Demir Çağı) malzeme kulanım strajelerinin başlangıcı olmuştur.

Bu ise mühendislik potansiyelleri açısından mevcut optimize edilmiş farklı türlerden malzemeleri karşılaştırmak ve seçmek için yöntemler geliştirilmesi stratejisinin kademeli olarak belirli malzeme türlerinin optimizasyonuna odaklanmasına öncülük etti. Bugün ekonomik yönlerin ve çevresel etkilerin dikkate alınmasına vurgu yapılmaktadır. Bu, modellemenin artan önemi ile tasarım stratejilerini kullanan malzemeler ve bu malzemelerin çok işlevliliğine yönelik gelişme eğilimi yarattı. Ancak yine de pratikteki uygulamalara dikkat edilmeksizin yürütülen birçok temel malzeme araştırmaları bulunmaktadır. Bu da bize malzeme seçim yöntemlerinin daha fazla kullanılması lüzumunun yanı sıra çok amaçlı tasarım sürecini daha iyi anlamak ve yönetmek amacı ile

“Karar Verme” nin önemini güçlendirmektedir [20].

Tasarım, hangi ürünün üretilebileceği ile ilgili yeni bir fikrin veya ihtiyacın ayrıntılı olarak bilgilere dönüştürülmesi sürecidir. Bu sürecin her bir aşaması “malzeme” lerle ilgili ne üretileceği ve nasıl üretileceği ile ilgili kararları gerektirir. Normal şartlarda malzemenin seçimi doğrudan tasarım tarafından belirlenir. Ancak bazen tam tersi olur: Yeni bir ürün ya da mevcut var olan bir ürünün modifikasyon gerektiren yeni hali yeni bir malzeme tarafından belirlenmesini mümkün kılar. Mühendisler için tasarıma yönelik malzeme sayısı çok geniştir ve hangi malzemeyi seçeceğine o karar verir. Her ne kadar malzemelerin standart hale getirilme çalışmaları sayıları azaltıyor gibi görülse de daha üstün özellikleri olan yeni malzemelerin gelişiyor olması altarnatifleri arttırabilmektedir.

Öyle ise mühendis bu geniş malzeme menüsünden kendi amaçlarına tam uyacak malzemeyi nasıl seçecektir? Tecrübelerine mi güvenecektir? Ya da akılcı bir seçim yapmak için sistematik bir algoritma mı oluşturacaktır? Oluşturulabilecek algoritma başlangıçtaki seçim zenginliğini göz önüne almalı, giderek bunu daha küçük bir kümeye daraltmalı ve kesinliği ve detayları sağlayan nihai tasarım hesaplarına dayanmalıdır.

Malzemenin seçimi proses seçimi ile doğrudan ilgilidir. Maliyet unsuru hem hangi malzemenin seçileceğini hem de bu malzemenin nasıl işleneceğini sorgular.

Tasarım problemleri çoğunlukla açık uçludur. Her ne kadar bazı çözümler açıkça diğerlerinden daha iyiyse de sorunların tek ve tam doğru çözümleri yoktur. Öyle ise tasarımcı bütün olasılıkları göz önüne alma isteği olan açık fikirli biri olmalıdır. Kötüleri eleyerek iyiler arasından mükemmeli seçebilmelidir [21].

Mühendislik malzemelerinin seçimi; malzeme özellikleri, imalat ve fabrikasyon karakteristikleri ile tasarım kavramı faktörleri arasındaki etkileşimin anlaşılmasını gerektiren bütünleşik bir süreçtir. Belirli bir malzemenin seçiminde sıklıkla iki neden karşımıza çıkar: (a) malzeme o uygulamada her zaman kullanılmıştır ve (b) malzeme o iş için doğru özelliklere sahiptir.

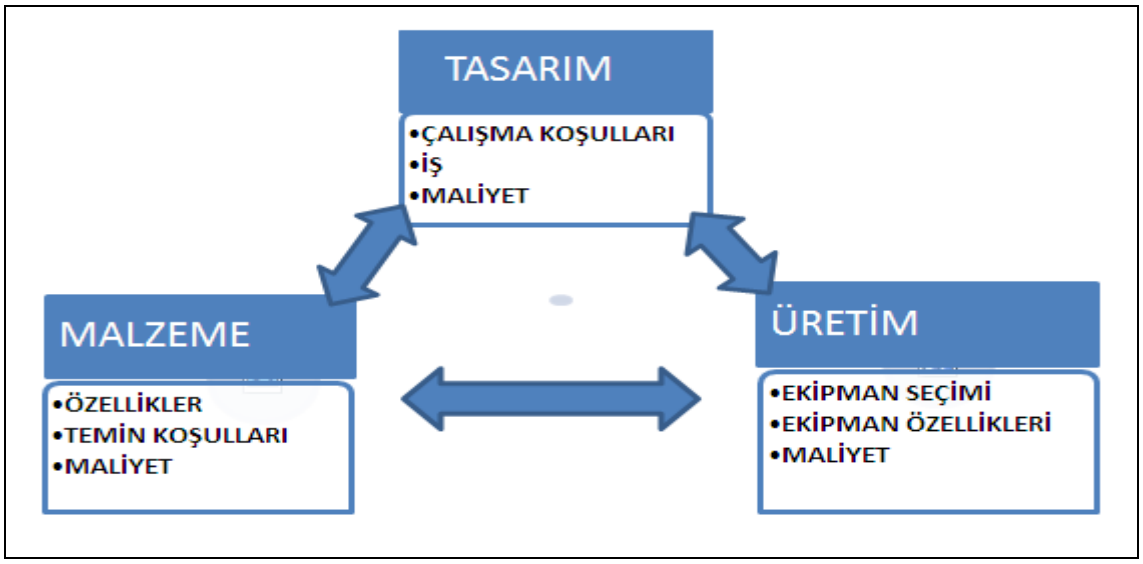
Malzeme Seçiminin Temel Faktörleri şunlardır:

- İşlevsel gereksinimler ve kısıtlar,
- Malzeme özellikleri,
- Üretim süreci,

- Üretilebilirlik,
- Tasarım yapılandırması,
- Mevcut ve altarnatif malzemeler,
- Kullanım sırasında oluşabilecek korozyon ve fiziksel bozulmalar,
- Termal kararlılık,
- Beklenen temel yarar,
- Fiziksel özellikler (yoğunluk, sertlik, ağırlık, aşınma direnci, termal genleşme)
- Maliyet

Prensip olarak yukarıdaki değişkenlerin birer değerlendirme kriteri olarak ele alındığı matamatiksel yollar ile oluşturulmuş ideal mühendislik tasarım çözümleri elde edilebilir. Ancak prensip hep aynı kalmalıdır. Bazı durumlarda hazır ve standartlara uygun bir parça standart dışı bir tasarımdan daha az maliyetli ve daha yararlı olabilir [22].

Mühendislik malzemelerinin seçiminde, imalat, malzeme ve tasarım arasındaki ilişki için mekanik, fiziksel, elektriksel özellikler gibi çok sayıda malzeme özelliği dikkate alınır. Bunun yanı sıra görünüm, algı ve duygu gibi kullanıcı etkileşim yönleri de malzeme seçiminde dikkate alınır. Ticari olarak temin edilebilecek çok geniş bir spektrumda binlerce malzeme tek tek analiz edilerek başarılı bir tasarım için, işlev, malzeme özellikleri, imalat süreci vb. konuları dikkate alınmalıdır. Malzeme özellikleri ile tasarım ve imalat işlemleri arasındaki karşılıklı ilişki Şekil 1.2'de gösterilmektedir. Belirli bir ürün veya bileşenin tasarımı, işlev, malzeme özellikleri ve üretim süreci dikkate alındığında başarılıdır [23].



Şekil 1.2. Tasarım-malzeme-üretim bileşenlerinin ilişkileri [23]

1.2. Demir-Çelik Üretimi

1.2.1. AKÇT Avrupa Kömür-Çelik Topluluğu, (ECSC The European Coal and Steel Community) ve Avrupa Birliği

Avrupa yüzyıllarca, sık sık yaşanan kanlı savaşlara sahne oldu. 1870-1945 yılları arasında Fransa ve Almanya üç kez savaştılar. Bu savaşlarda birçok insan yaşamını kaybetti. Bu felaketler üzerine bazı Avrupalı lider ve düşünürleri, barışın sürdürülebilmesinin tek yolunun, ülkelerinin ekonomik ve siyasi yönlerden birleşmesi olduğu fikrine vardılar. Avrupa'da ulusal uzlaşmazlıkları aşabilecek bir örgütlenmenin kuruluşu İkinci Dünya Savaşı sırasında totaliter yönetimlere karşı savaşan direniş hareketlerinden kaynaklandı. İkinci Dünya Savaşı sonrasında, Avrupalı devlet adamlarının Avrupa'da kalıcı bir barış oluşturma çabaları hız kazandı. Robert Schuman (Fransa Dışişleri Bakanı), Eski Milletler Cemiyeti [bugün BM-Birleşmiş Milletler/AÜ] Genel Sekreteri Jean Monnet'in tasarısına dayanarak, 9 Mayıs 1950 tarihinde, Avrupa Devletlerini, kömür ve çelik üretiminde alınan kararları bağımsız ve uluslarüstü bir kuruma devretmeye davet etti. Schuman Planına göre, Avrupa'da bir barışın kurulabilmesi için Fransa ve Almanya arasında yüzyıllardır süregelen çekişmenin son bulması gerekiyordu. Bunun yolu ise, söz konusu kurumun gözetiminde, ortak kömür ve çelik üretimini sağlamak ve bu örgütlenmeyi tüm Avrupa devletlerinin katılımına açık tutmaktı. Schuman Deklarasyonunun bir sonucu olarak, 1951 yılında, Belçika, Federal Almanya, Lüksemburg, Fransa, İtalya ve Hollanda'dan oluşan 6 üye ile Avrupa Kömür ve Çelik Topluluğu (AKÇT) kuruldu. Söz

konusu Topluluğun Yüksek Otoritesi'nin ilk başkanı ise, Schuman Deklarasyonu'na ilham veren bu fikrin sahibi Jean Monnet oldu. Böylece, savaşın ham maddeleri olan kömür ve çelik, barışın araçları oluyor; dünya tarihinde ilk defa devletler kendi iradeleri ile egemenliklerinin bir kısmını ulusüstü bir kuruma devrediyordu.

1.2.2. Roma Antlaşması ve Avrupa Ekonomik Topluluğu (AET)

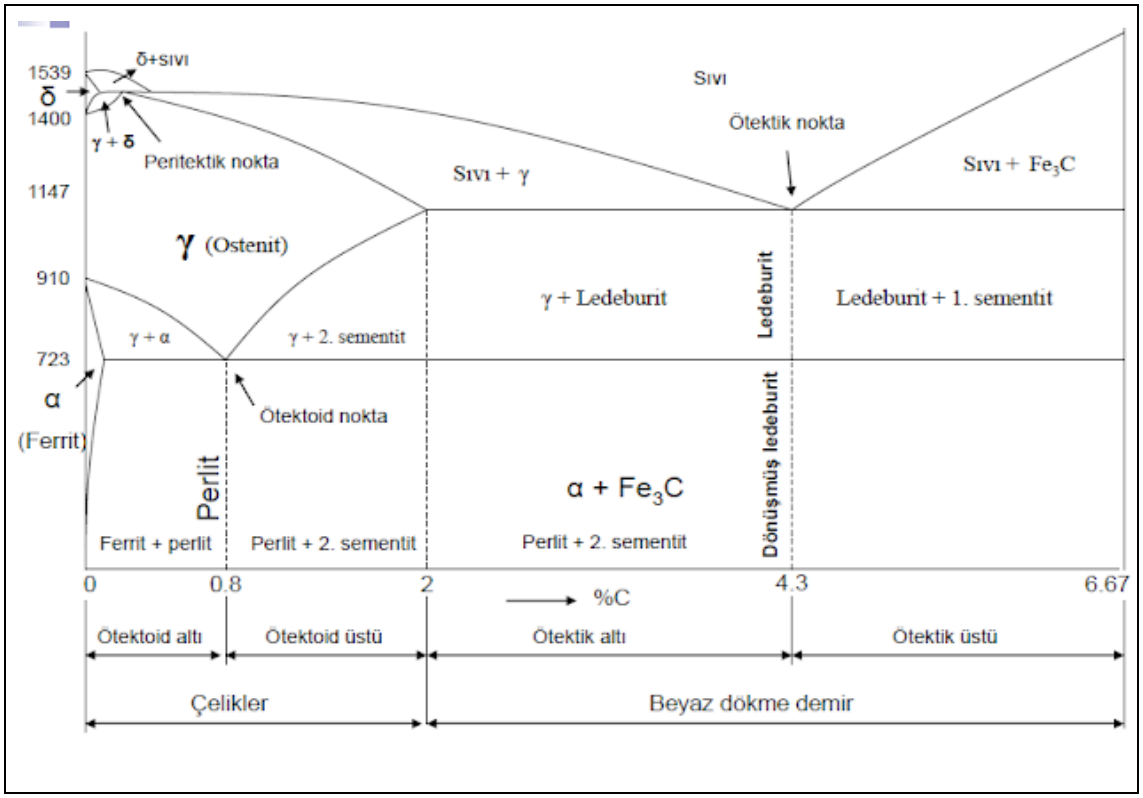
Altı üye devlet, 1957'de, işgücü ile mal ve hizmetlerin serbest dolaşımına dayanan bir ekonomik topluluk kurmaya karar verdiler. Böylece, kömür ve çeliğin yanı sıra diğer sektörlerde de ekonomik birlik kurmak amacıyla, 1957'de Roma Antlaşması imzalanarak Avrupa Ekonomik Topluluğu (AET) kuruldu. AET'nin amacı, malların, işgücünün, hizmetlerin ve sermayenin serbest dolaştığı bir ortak pazarın kurulması ve en nihayetinde siyasi bütünlüğe gidilmesiydi [24].

Özetle; 1951 yılında Orta Avrupa'nın 6 ülkesinin bir çekirdek olarak oluşturduğu AKÇT ile 1957 yılında AET kurularak daha sonra Avrupa'nın 27 ülkeyle yer alacağı bugünkü Avrupa Birliği'nin temeli atılmıştır. Gerek önemli bir enerji kaynağı olarak, gerek primer Demir üretiminde redükleyici ana hammadde olması nedeniyle tarih boyunca Kömür, Çelik ile devamlı olarak birlikte anılmışlar, her ikisi de stratejik bir "mühendislik malzemesi" olarak değerlendirilmiştir.

Metalik bir element olan Demir, periyodik tablonun VIII geçiş grubunda, Latince ferrum kelimesinden gelen Fe sembolü ile yer alır. Atom numarası 26, atom ağırlığı 55.847 ve erime sıcaklığı 1538 °C. Farklı elementlerle birleşerek oluşturduğu alaşım kombinasyonları ile özellikleri iyileştirilebildiği gibi daha da zayıf bir hale getirilebilir. Yerkabuğunun %5'ini oluşturan Demir, bulunabilirlik açısından metallerde Aluminyum'dan sonra ikinci, tüm elementler gözönüne alınırsa Oksijen ve Silisyumdan sonra dördüncü sırada yer alır. Doğada metalik formda bulunmayan Demir, çoklukla Oksijen ile birlikte oluşturduğu farklı oksit formlarında 'cevher' olarak bulunur. Cevherler ayrıca az miktarda manganez veya fosfor gibi diğer elementleri ve fiziksel olarak karışık durumda kum, kaya ve kil gibi topraklı malzemeleri de Demir yapımı, cevherden istenmeyen elementlerin ve yabancı maddelerin ortamdan uzaklaştırılmasına, bununla beraber bulunması özellikle arzu edilen elementlerin ise miktarlarının kontrol edilmesine bağlıdır [25].

Birçok metalde bulunmayan özelliğiyle Demir, aktif olarak hem diğer birçok elementle birleşerek çeşitli alaşımlar oluşturduğu gibi, farklı oranlarda Karbon ile de birleşerek çok sayıda alaşım oluşturabilir. (Şekil 1.3) Demirin karbon ile birleşerek oluşturduğu alaşımda Karbon oranı %2'den az ise "çelik", fazlaysa "dökme demir olarak adlandırılır. Demir içinde Karbon'un en çok çözülebildiği en çok oran %6.67'dir [26].

Aşağıda Fe-Fe_3C Faz diyagramı yer almaktadır:



Şekil 1.3. Demir-karbon faz diyagramı [26]

1.2.3. Yüksek Fırın Çelik Üretimi

Doğada bulunan demir içeren maden kaynaklarının Metalik Demir'e dönüştürülmesinin ilk aşamaları Yüksen Fırın'daki redükleme işlemleri ile başlar. Sanayi Devriminin anavatanı İngiltere'de, dolayısıyla İngilizcede sürecin çok miktarda oksijen gereksinimi için tonlarla ifade edilen miktarlarda hava üflenmesi nedeniyle "Blast" (üfleme) Fırını terimi kullanılmaktadır. Buna rağmen Türkiye'de ve Türkçede, Almanca "hoch", Fransızca "haute", İtalyanca "alto" benzerleri gibi "Yüksek" terimi kabul edilmiş ve "Yüksek Fırın" olarak kullanılmaktadır. Yüksek fırınlar Dik-Şaft (Vertical-Shaft) fırınlardır.

Yüksek fırının ana hammaddesi demir cevherleri doğada Hematit (Fe_2O_3) ve Magnetit (Fe_3O_4) olarak bulunur. Bu cevherler yüksek oranda Karbon (C) ihtiva eden metalürjik kok kömürünün redüklemesi ile aşağıdaki gibi aşamalı olarak Metalik Demir (Fe) elde edilir.

$$Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe \quad (1)$$

Gang Mineraller olarak adlandırılan saflığı azaltabilecek toprak, toz, gibi ekonomik değeri olmayan, gereksiz hiçbir kalıntı olmaması halinde bile demir cevherlerinde bulunabilecek teorik maksimum Demir (Fe) oranları; (Atom ağırlıkları: Fe: 56, O: 16)

Hematit için yaklaşık olarak:

$$\frac{2x56}{(2x56+3x16)} = \%70 \quad (2)$$

Magnetit için yaklaşık olarak:

$$\frac{3x56}{(3x56+4x16)} = \%72 \quad (3)$$

Endüstriyel pratikte ise bu oran yaklaşık olarak %50 civarındadır.

Karbonun demir cevherini redüklemesi (demire indirgemesi) hem Doğrudan Redükleme yoluyla Karbon (C) tarafından endotermik reaksiyonla, hem de Dolaylı Redükleme yoluyla Karbon Monoksit (CO) tarafından ekzotermik reaksiyonla olur:

$$C + O \rightarrow CO_2 \quad (4)$$

$$CO_2 + O \rightarrow 2CO \quad (5)$$

$$CO_2 + C \rightarrow 2CO \quad (6)$$

$$3Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2 \quad (7)$$

$$2Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3FeO + CO_2 \quad (8)$$

$$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2 \quad (9)$$

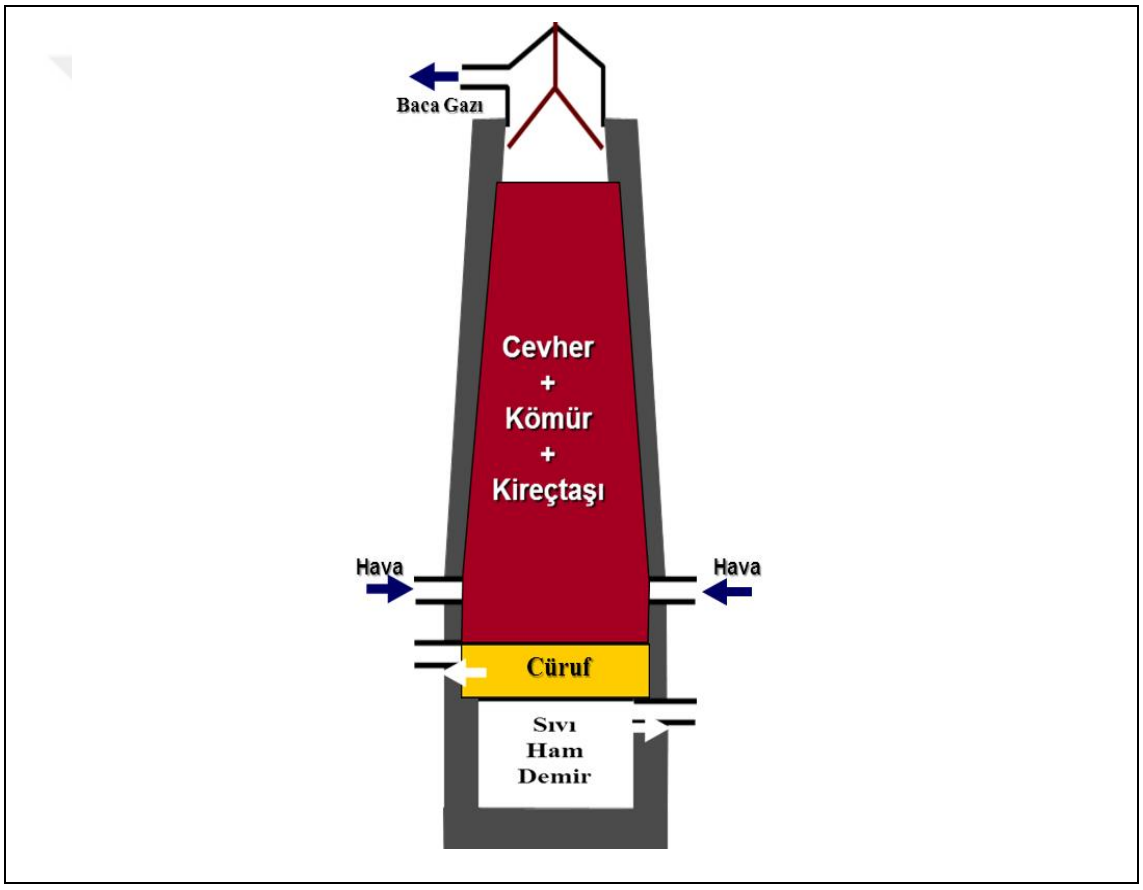
Demir Cevheri, Kok ve Hava ile birlikte yüksek fırına Flaks (Flux) olarak şarj edilen bir diğer (yardımcı) hammadde ise yüksek miktarda Kalsiyum Karbonat ($CaCO_3$) ihtiva eden Kireçtaşı'dır. Demir Oksitin redüklenmesine doğrudan katkısı olmasa da cevherde doğal olarak bulunan Silisyum Oksit esaslı istenmeyan Gang Mineralleri'nin sistemden "Cüruf" olarak uzaklaştırılmasına yardımcı olur.

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \quad (10)$$

$$CaO + SiO_2 \rightarrow CaSiO_3\,(\text{Cüruf}) \quad (11)$$

Kullanılan cevherin içerdiği Demir oranına (Tenör'e) ve tesislere göre farklılıklar olsa da hava (gaz) hesaba katılmadan sadece katı hammaddeler gözönüne alınarak Yüksek Fırın'a şarj edilen her bir 8 birim Cevher için ağırlık olarak bunun yarısı, 4 birim Kok ve bunun da yarısı 2 birim Kireçtaşı kullanılmakta ve yaklaşık %50 verimle 7 birim Sıvı Ham Demir (Pik Demir) elde edilebilmektedir:

$$\frac{7}{8+4+2} = 50\ \% \quad (12)$$



Şekil 1.4. Yüksek fırın şematik gösterimi

Demir, tüm metallerin en önemlisidir. Çağımızın en popüler mühendislik malzemeleri olan çok çeşitli çeliklerin üretimi için kullanılan temel metaldir. Demirin allotropik özelliği, çeşitli formlarda farklı mikro yapıların elde edilmesine olanak sağlar. Demir ayrıca birçok metal için mükemmel bir çözücüdür. Allotropik dönüşümünün özü, kristalli bir katının atomlarının bir kristal formdan diğerine dönüştürülmesidir, yani; yeni bir

kristal kafes oluştururlar. Demir, düşük sıcaklıklarda stabildir ve bu durum Yunan harfi alfa (α) olarak adlandırılır. Aynı demirin daha yüksek bir sıcaklıkta kararlı ikinci bir formu gama (γ) demir olarak bilinir. Daha da yüksek sıcaklıklarda ise delta (γ) fazı hakimdir [27].

Demir önemli olsa da günlük hayatta demirden daha çok onun muhtelif farklı kompozisyonlarda alaşımları yani çelik şeklinde kullanılır. Teknik olmayan bir kişi için, demir ve çelik kelimeleri aynı anlamı taşısa da demir ve çelik iki farklı şeydir. Demir, periyodik tabloda kimyasal sembolü Fe olan ve saf demir anlamına gelen elementel metale verilen isimdir. Saf demir nispeten yumuşak ve çeliğe oranla daha az güçlüdür. Erime noktası yaklaşık 1540°C'dir. Çelik ise bir demir ve karbon alaşımıdır; karbon yüzdesi teorik olarak % 0 ile % 2 arasında değişir. Karbon, çok sert, kırılgan ve güçlü olan Sementit (Fe_3C) adı verilen bir bileşik oluşturur. Çelikte sementit bulunması, çeliği saf demirden çok daha güçlü ve sert yapar [28].

Karbonun yanısıra çeliklerin tamamına yakınında bulunan iki çift element daha vardır: Bunlar, Manganez (ya da Mangan diye de adlandırılır, Mn) ve Silisyum (Si) ile Fosfor (P) ve Kükürt (S) elementleridir. İlk ikisi, Manganez ve Silisyum bazı özel maksatlı çelikler hariç çoğunlukla toplam %1-2 olmak üzere çelikte olması özellikle arzu edilen, çeliğin "olmazsa olmaz" temel elemanlarıdır. Böylelikle çeliği; bir Demir-Karbon-Mangan-Silisyum alaşımıdır diye de adlandırabiliriz.

Diğer yandan, Fosfor ve Kükürt de çelikte kaçınılmaz olarak bulunan, ancak farklı amaçlı bazı özel istisna çelik türleri dışında varlıkları arzu edilmeyen ve her biri sıfıra yakın mümkün olan en düşük değerlerde olmaları arzu edilen elementlerdir. Cevherden ya da hurdadan, hangi üretim metoduyla üretildiğinden bağımsız olarak hammaddenin doğasında bulunan bu iki elementin toplamının %0,1'den az olması arzu edilir, yüksek olmaları halinde standartlarda yer alan değerlere dek düşmeleri için özel çaba sarfedilir.

Günümüzde, dünyanın neredeyse ilk sorunu olan "enerji", otomotiv sektörünü taşıtların ağırlığını azaltmaya zorlamış, bu ise yassı çelik üreticilerini daha ince/hafif ama "daha sağlam" çelikler üretmeye zorlamıştır. Demire göre hafiflik üstünlükleri olan Alüminyum ve/veya Mağnezyum elementleri ile oluşturulan alaşımlar konusunda ciddi ilerlemeler kaydedilmişse de global ekonomideki rolü ile pek çok değişkenlikte özellikleri ile Çelik, "Yeni Nesil" kavramını artan bir ivme ile her dönem hem araştırmacılar, hem de sermaye

için önemli bir "malzeme" olmuştur. Sonuç olarak, malzemelerin tümü uzun bir takım ömrünü garanti etmek için gerekli olan yüksek aşınma direncine, yüksek tokluğa, optimum sertliğe, iyi korozyon direncine ve yüksek basma ve çekme dayanımlarına sahip olmalıdır. Otomotivdeki ilerleme, paralel olarak, bu yeni nesil daha dayanıklı çeliği işleyen kişi ve kurumları, daha dayanıklı çelikleri şekillendirmede kullanılan "takımların" da kendilerinin doğrudan daha üstün vasıflar taşıyan Yeni Nesil Takım Çelikleri kullanılmasına evrilmiştir.

Çelikler aşağıdaki gibi çok farklı sınıflandırılabilirler:

- Kimyasal Kompozisyonuna göre (Karbon Çeliği, Düşük Alaşımlı Çelik, Paslanmaz Çelik gibi)
- Üretim Yöntemlerine Göre (EAF, Elektric Arc Furnace-Elektrik ark Ocağı, BOF, (Basic Oxygen Furnace-Bazik Oksijen Fırını gibi)
- Şekillendirme Yöntemlerine göre (Sıcak haddeleme veya soğuk haddeleme gibi)
- Ürünün fiziksel/yapısal formuna göre (Çubuk, levha, şerit, boru gibi)
- Deoksidasyon (oksit giderme) uygulamasına göre (Killed-Öldürülmüş, Semi-Killed-Yarı öldürülmüş gibi)
- Mikroyapına göre (Ferritik, perlitik, martensitik gibi
- ASTM standartlarında belirtildiği gibi gerekli dayanım seviyesine göre
- Tavlama, su verme ve menevişleme gibi ısıl işlem ve termomekanik işleme göre [29].

Çelikleri; temelde kimyasal bileşimlerine göre, ayrıca; bazı fiziksel özelliklerine göre (paslanmaz, manyetik, yüksek sıcaklığa dayanıklı çelikler gibi), ısıl işlemlere göre (ıslah, sementasyon, nitrasyon çelikleri gibi), kullanım alanlarına göre (genel imalat, makine imalat, takım, yay, rulman çelikleri gibi) ve imalat şekline göre sınıflandırmak da mümkündür. Diğer çelik gurupları gibi takım çeliklerinde kimyasal bileşime göre sınıflandırma mümkün değildir, zira hem kimyasal bileşim çok geniş aralıklarda değişebilmekte ve hem de diğer çelik gurupları ile kesişmeler olabilmektedir.

Bu nedenle aynı kimyasal bileşimdeki çelikler üretim yöntemlerindeki değişikliklerle farklı özelliklere sahip olabilmektedir, böylece farklı kullanım alanlarında aynı kimyasal bileşime sahip malzeme farklı isimler ile adlandırılabilmektedir. Örneğin;

- 29 CrMoV 9 (1.2307): Plastik enjeksiyon kalıp çeliği
- 30 CrMoV 9 (1.7701): Islah çeliği
- 31 CrMoV 9 (1.8519): Nitrasyon çeliği [30].

Amerika'da çeşitli ticaret odaları, profesyoneller, mühendislik toplulukları, standart kuruluşları, askeri spesifikasyonlar için ABD Savunma Bakanlığı ve özel sektör tarafından da kendi kullanımları için farklı çelik numaralandırma sistemi geliştirilmiştir. Bu kuruluşlar şunlardır:

- American Iron and Steel Institute (AISI),
- Society of Automotive Engineers (SAE),
- American Society for Testing and Materials (ASTM),
- Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (ANSI),
- Amerikan Makine Mühendisleri Derneği (ASME),
- American Welding Society (AWS),

Birleşik Numaralandırma Sistemi (UNS, The Unified Numbering System) ise bu kurum ve kuruluşların aynı malzemeyi belirtmek için birden fazla farklı numaralandırma sistemleri kullanılmasından kaynaklanan karışıklığı önler [31].

Tablo 1.1. AISI – SAE sistemindeki ana gruplar

Sınıf	**AISI Kod ve Ana Bileşenler**
Karbon çelikleri	10xx Karbon çeliği
	11xx Yeniden Kükürtlenmiş karbon çeliği
Alaşımlı çelikler	
Manganez	13xx Manganez %1,75
	15xx Manganez %1,00
Nikel	23xx Nikel %3,50
	25xx Nikel %5.00
Nikel-Krom	31xx Nikel %1,25, krom %0,65 veya %0,80

Sınıf	AISI Kod ve Ana Bileşenler
	33xx Nikel %3,50, krom %1,55 Molibden
	40xx Molibden %0,25
	41xx Krom %0,95, molibden %0,20
	43xx Nikel %1,80, krom %0,50 veya %0,80, molibden %0,25
	46xx Nikel %1,80, molibden %0,25
	48xx Nikel %3,50, molibden %0,25 Krom
	50xx Krom 0,30 veya %0,60
	51xx Krom 0,80, 0,95 veya %1,05
	5xxxx Karbon %1,00, krom 0,50, 1,00 veya %1,45
Krom-Vanadyum	61xx Krom %0,80 veya %95, vanadyum %0,10 veya %0,15 min
Çoklu Alaşım	86xx Nikel %0,55, krom %0,50, molibden %0,20
	87xx Nikel %0,55, krom %0,50, molibden %0,25
	92xx Manganez %0,85, silikon %2,00
	93xx Nikel %3,25, krom %1,20, molibden %0,12
	94xx Mn %1,00, Ni %0,45, Cr %0,40, Mo %0,12
	97xx Nikel %0,55, krom %0,17, molibden %0,20
	98xx Nikel %1,00, krom %0,80, molibden %0,25

Tablo 1.2. Metaller için birleşik numaralandırma sistemi [32]

UNS Kod	Alaşım Sistemi
Axxxx	Alüminyum ve alüminyum alaşımları
Cxxxx	Bakır ve bakır alaşımları
Exxxxx	Nadir toprak ve nadir element benzeri metaller ve alaşımlar
Fxxxxxx	Dökme demirler
Gxxxxx	AISI ve SAE karbon ve alaşımlı çelikler
Hxxxxx	AISI ve SAE H çelikleri
Jxxxxx	Dökme çelikler (takım çelikleri hariç)
Kxxxxx	Çeşitli çelikler ve demirli alaşımlar
Lxxxx	Düşük erime noktalı metaller ve alaşımlar
Mxxxx	Çeşitli demir dışı metaller ve alaşımlar
Nxxxxxx	Nikel ve nikel alaşımları
Pxxxxxx	Değerli metaller ve alaşımlar

UNS Kod	Alaşım Sistemi
Rxxxxxx	Reaktif ve refrakter metaller ve alaşımlar
Sxxxxx	Isıya ve korozyona dayanıklı (paslanmaz çelikler)
Txxxx	Takım çelikleri, işlenmiş ve dökülmüş
Zxxxxx	Çinko ve çinko alaşımları

1.2.4. Alaşımlama Elementlerinin Çeliğe Etkisi

En az bir tanesi metal olan iki veya daha fazla elementin meydana getirdiği, ayrılamayan bileşiktir. Örneğin demir bir elementtir. Karbon ile bir araya geldiğinde çeliği oluşturur. Çelik bir alaşımdır [33].

Gerek Yalın Karbon Çelikleri'nde, gerekse Alaşımlı Çelikler'de özellikler, kimyasal kompozisyon ve çeliğin imalatı sırasında yapılan bütün işlemlerle elde edilen mikroyapı arasındaki ilişkilere doğrudan bağlıdır. Karbon çeliklerine alaşımlama elementleri, termomekanik işlemler (örneğin haddeleme, dövme) veya ısıl işlemler sırasında özelliklerini değiştirmek amacıyla eklenir; Bu ise mekanik ve fiziksel özelliklerde iyileştirme ile neticelenir. Alaşımlama elementlerinin eklenmesi aşağıdakilerden en az biri veya birkaçı için yapılır:

1- Sünekliği mümkün olduğu kadar koruyarak çekme dayanımını arttırmak,

2- Toklukta iyileştirme sağlamak,

3- Yalın karbon çelikleri ile elde edilebilecek olandan daha iyi oranda ve kontrollü soğuma hızları ile başarılı su verme gibi ani ve hızlı soğutmalarda yapısal bozulmalarla çatlamalara tehlikesini azaltarak sertleşebilirliği arttırmak,

4- Yüksek sıcaklıklarda dayanımı muhafaza etmek,

5- Aşınmaya karşı dayanıklılığı arttırmak,

6- Daha iyi korozyon dayanımı temin etmek,

7- Daha ince/küçük tane mikroyapılarına ulaşmak.

Kalıntı elementler ile alaşımlama elementleri arasında kavramsal bir fark vardır: Kalıntı elementler amaçlı olarak çeliğe eklenmeyen, hammaddeden veya çelik üretimi sırasındaki işlemlerden kaynaklı olarak bulunabilirler. Herhangi bir element, "kalıntı" ya da "alaşımlama elemanı" gibi değerlendirilebilir. Örneğin Krom (Cr) ya da Nikel (Ni),

kullanılan hurda nedeniyle çelikte bulunabilir, dolayısıyla “kalıntı element” olarak kabul edilir. Eğer bu elementler, bulunması arzu edilen ve hedeflenen kimyasal kompozisyon aralığında çeliğe ekleniyorsa bu durumda “alaşımlama elementi” oldukları kabul edilebilir. Her ikisi de, yani; hem kalıntı, hem de alaşımlama elementleri çelik üretimini, nihai ürün kalitesini ve bu üründen beklenen işlevleri önemli oranda etkiler. Çelikte bulunan bir element, bulunan başka bir elementlerin varlığı ile etkilenebilir; karşılıklı bu etkileşimler karmaşıktır. Ek olarak, bir çelik için “yararlı” olarak değerlendirilen bir element, bir başka çelik için “zararlı” olabilir.

1.2.4.1. Karbon (C)

Tek başına çeliğin en önemli alaşımlama elemanıdır. Sementit ve diğer karbürler, perlit, küresel karbürler, beynit ve martensit oluşması için gereklidir. Bu bileşenlerden bir veya daha çoğu hem mekanik özelliklerde hem de fabrikasyon karakteristiklerinde geniş mekanik özellik avantajları sağlar. Bu elemanların göreceli olarak miktar ve dağılımları mikro yapı, dolayısı ile çeliğin özelliklerinin ısıl işlem yolu ile değiştirilmesine ve daha da geliştirilmesine imkan yaratır. Karbon içeriği arttıkça sertlik ve direnç yükselir, tokluk ve süneklik azalır. Ayrıca işlenebilirlik, kaynaklanabilirlik ve şekillendirme imkanları da yüksek karbon içeriklerimden negatif yönde etkilenir.

1.2.4.2. Manganez (Mn)

Normal olarak tüm ticari çelik türlerinde var olması gereken mangan ergitme sırasında çeliğin deokside edilmesi için önemlidir. Manganez ayrıca kükürt (S) ile birleşerek çeliğin işlenebilirliğini artıran mangan sülfit (MnS) bileşiği oluşturur. Karbon kadar olmasada sertlik ve mukavemete katkı sağlar. Çeliğin sertleşebilirliği üzerinde çok güçlü etkisi vardır.

1.2.4.3. Silikon (Si)

Temel deoksidasyon elemanıdır. Miktarları çeliğin üretimi sırasında uygulanan deoksidasyon işlemlerine doğrudan bağlıdır. Öldürülmüş çelikler % 0.05 ile 0.30 silikon içerir, eğer başka deoksidanlarda kullanılmış ise bu oran daha da düşer. Silikon ferrit fazının direncini az arttırır, bu ise süneklikte azalmaya neden olur.

1.2.4.4. Bakır (Cu)

Yüksek miktarlarda bulunması orta ve yüksek sıcaklıklarda çalışmalar sırasında zararlıdır. Kaynak işlemlerini olumsuz etkiler. Yüzey kalitesine olumsuz etkisi vardır. Bununla birlikte atmosferik korozyon direnci için faydalıdır.

1.2.4.5. Krom (Cr)

Genel olarak çeliğe oksidasyonu ve korozyon direncini artırmak için katılır. Bu, yüksek karbon bileşikleri oluşturması sayesinde yüksek sıcaklıklarda direnç ve aşınma direnci için gereklidir. Krom kuvvetli bir karbür oluşturucusudur. Krom, nikel ile beraber kullanılarak üstün mekanik özellikli çelik için sertleştirme elementidir. Çok yüksek sıcaklıklar için molibden (Mo) da eklenir.

1.2.4.6. Nikel (Ni)

Yapı çeliklerinde alaşım elemanı olarak kullanıldığında ferrit fazı güçlenir. Çelik içerisinde herhangi bir karbür oluşumuna sebep olmadıkları, ferrit içinde aynı kaldıkları için ferrit fazını güçlendirir ve sertleştirir. Nikel çelikleri, daha kolay ısıl işleme tabi tutulur. Nikelin krom ile bir arada bulunması halinde daha yüksek darbe sertliği, sertleşebilirlik ve yorulma dayanımı sağlanır. Nikel içeren çelikler ayrıca düşük sıcaklıklar da direnç ve tokluk için üstün özelliklere sahiptir.

1.2.4.7. Molibden (Mo)

Molibden, çeliğin sertleşebilirliğini arttırır ve özellikle de çeliğin belirtilen limitler dahilinde sertleşebilirlik özelliğini korumada ve denetlemede faydalıdır. Özellikle %0,15 ile %0,30 arasında kullanıldığında ısıl işlemlerden kaynaklanan gevrekliği, dolayısı ile kırılganlığı en aza indirir. Molibden içeren çelikler daha yüksek sıcaklıklarda temperlenmelidir. Molibden yüksek sıcaklık çekme direnci ile çeliğin sürünme direncini aynı anda artırabilen yegane elementtir.

1.2.4.8. Vanadyum (V)

Vanadyum, güçlü karbür oluşturan elementlerden birisidir. Ferrit fazı içerisinde çözülerek mukavemet ve tokluk sağlar. Vanadyum çelikleri vanadyum içermeyen benzeri

kompozisyondaki çeliklerle karşılaştırıldığında daha ince tane yapısı görülür. Vanadyum ayrıca, östenit içinde çözelti halinde bulunduğu için su vermede (hızlı soğuma) ikincil bir sertleşebilirlik sağlar.

1.2.4.9. Niobyum (Nb)

Az miktarda niobyum ilavesi akma mukavemeti ile çekme mukavemetini artırır. %0,20 niobyum ilavesi ile orta karbonlu bir çeliğin akma mukavemeti 70-100 MPa artabilir. Önemli ölçüde tane küçültme etkisi vardır, bu özellik termomekanik işlemler sırasında haddelemede avantaj sağlar.

1.2.4.10. Bor (B)

Sertleşebilirliği artırmak için tamamen öldürülmüş çeliğe %0,003' e kadar boron katılabilir. Bor düşük karbonlu çeliklerde en etkilidir.

1.2.4.11. Titanyum (Ti)

Öncelikle de oksidasyon amacı ile kullanılır, tamamen öldürülmüş çeliklerde tane büyümesini sınırlamaya yardımcı olur. Titanyum, bor içeren çeliklerde oksijen ve azot ile kolayca birleşerek çeliğin sertleşebilirliğini artırmada borun etkinliğine faydalı olur.

1.2.4.12. Tungsten (W)

Sertliği arttırır, tane yapısını küçültür, yüksek ısıya dayanıklılık için mükemmel bir elementtir. Tavlama sırasında yüksek sıcaklıklarda çok sert ve kararlı olan tungsten karbür oluşturur. Bu ise menevişleme sırasında çeliğin sertlik özelliği kaybetmesine engel olur. Tungsten, yüksek hız takım çeliklerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.2.4.13. Zirkonyum (Zr)

Tane büyümesini engeller ve öldürülmüş çeliklerde deoksidan olarak kullanılır. Ana kullanım amacı; sıcak hadde ürünü, yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı (High Strength-Low Alloy, HSLA) çeliklerindeki özellikleri iyileştirmekte kullanılır. Çözeltideki zirkonyum ayrıca sertleşebilirliği biraz artırır.

1.2.4.14. Kalsiyum (Ca)

Zaman zaman çelikleri deokside etmek için kullanılır. yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı (HSLA) çeliklerde metalik olmayan inklüzyonların şeklini kontrol etmeye yardımcı olur, böylece tokluğu geliştirir. Genellikle Kalsiyum ile deoksidize edilmiş çelikler, Silikon (Si) veya Alüminyum (Al) ile deokside edilemiş çeliklerden daha iyi mekanik işlenebilirliğe sahiptir.

1.2.4.15. Kurşun (Pb)

Yalın karbon çeliklerine ve alaşımlı çeliklere bazen döküm öncesi çeliklerin işleme özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kurşun ilave edilir. Bu eklemeler genel olarak %0,15 ile %0,35 aralığındadır. Kurşun, döküm sırasında çelikte çözünmez, ancak mikroskobik kürecikler şeklinde tutulur. Kurşunun erime sıcaklık noktası (327 ^{o}C) civarında, kırılganlığa neden olabilir.

1.2.4.16. Azot (N),

Çeliğin mukavemetini, sertliğini ve işlenebilirliğini artırır, ancak sünekliği ve tokluğu azaltır. Alüminyum ile öldürülmüş çeliklerde Azot, çeliğin tane büyüklüğünü kontrol eden "Alüminyum Nitrür" parçacıkları oluşturur, böylece hem tokluğu hem de dayanım özelliklerini arttırır. Azot, Bor'un çeliklerin sertleşebilirliği üzerindeki katkısını azaltabilir [34].

Çok bileşenli sistemler olan ticari alaşımlı çeliklerde, alaşımlama elemanları aşağıdaki formlarda bulunabilir:

1- Serbest olarak,

2- Demir ile ya da veya birbirleriyle İntermetalik Bileşik olarak,

3- Oksitler, sülfürler ve diğer metal olmayan kalıntı (inclusion) bileşikleri olarak,

4- Karbür formunda,

5- Demir içerisinde çözelti olarak [35].

Tablo 1.3. Temel alaşımlama elementlerinin özellikleri

	Fe	**C**	**Si**	**Mn**	**Cr**	**Mo**	**V**	**W**
Yoğunluk gr/cm3	7,87	3,51	2,33	7,43	7,19	10,28	6,00	19,3
Erime ^{o}C	1540	Sübl.	1430	1245	1890	2625	1910	3482
Kaynama $^{o}C^{o}$	2740	3700	2300	2150	2500	4640	3410	5555

Alüminyum yaygın olarak bir deoksidan olarak ve tane boyutunun kontrolü için kullanılır. Çeliğe belirli oranlarda eklendiğinde, ısıl işlem sırasında çeliklerde östenit tane büyümesini kontrol eder. Su verme öncesi tane büyümesinin denetimi bakımından tüm alaşım elementleri arasında en etkili olanı alüminyumdur. Her ne kadar titanyum, zirkonyum ve vanadyumun da tane büyümesini sınırlayıcı etkileri olsa da, ancak, ısıl işlem görmüş (su verilmiş ve temperlenmiş) yapı çelikleri için bu üç element, çeliğin sertleşebilirlik üzerinde olumsuz etkileri vardır, çünkü karbürleri oldukça kararlıdır ve hızlı soğutmadan önce östenit içinde çözülmeleri zordur [36].

Toulouse Üniversitesi, Fransa'da yapılan bir çalışmada; gerek hafifletme amaçlarına hitap etmesi, gerekse doku içerisinde Krom, Molibden ve Demir karbürlerin özellikle menevişleme aşamasındaki davranışları ile ilgili olumlu katkısı dolayısıyla çeliğe %1'e varan oranlarda Aluminyum katıldığı ifade edilmiştir [37].

Niobyum'un iki temel rolü vardır; birincisi, sıcak deformasyon sırasında tane büyümesini önleyen sınır sabitleyici çökeltiler oluşturmaktır, bu da nihai olarak daha ince bir östenit tane boyutu ve dolayısıyla daha iyi mekanik özellikler sağlar. Sertleşebilirlik, östenit tane boyutundan bağımsız olmadığından, çözünmüş niyobyum ayrıca termomekanik işlemler sırasında çeliğin sertleşebilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [38].

Kolombit mineralinden elde edildiği için başta Kolombium adı verilen Niyobyum elementi, aynı mineral içerisinde Tantal (Ta) metalinin de bulunduğunun kısa süre sonra anlaşılmasıyla ikisinin kimyasal özellikleri birbirine çok benzediği için ayrışması zor olduğundan Metalik Tantalın üretilebilmesi için bir asır daha geçmesi gerekecektir. Daha sonra bu elementlere Yunan mitolojisinde geçen Tantalus ve kızı Niobe'den esinlenerek Tantal/Tantalyum (Ta) ve Niyobyum (Nb) (İng: Tantalum ve Molybdenum) adları verilmiştir [39].

Niyobyum, İngiliz mineralojist Charles Hatchett (1765-1847) tarafından 1801 yılında bulunmuştur [40].

Basit olarak, alaşımlama elementleri ikiye ayrılır: Karbür oluşturmayanlar ve karbür oluşturanlar. Aluminyum (Al), Kobalt (Co), Bakır (Cu), Azot (N), Nikel (Ni) ve Silisyum (Si) tek başlarına karbür oluşturmazlar. Periyodik tabloda Demirin (Fe) solunda kalan elementler olan Manganez (Mn), Krom (Cr), Tungten (W), Molibden (Mo), Vanadyum (V), Zirkonyum (Zr), Niobyum (Nb), Tantal (Ta) ve Titanyum (Ti) ise Karbon ile çekim (affinity) düzeyleri ile doğrudan ilgili olarak Karbür oluşturan elementlerdir.

Genel olarak Takım Çelikleri %0,5 ila %2,0 aralığında Karbon içerir. %0,5 Karbon içeren bir çelik ısıl işlemle 60 HRC'ye kadar sertleştirilebilir. Bu oranın ötesindeki Karbon ise diğer elementlerle birleşerek karbür parçacıkları oluştururlar. Son derece küçük olan bu karbürler mikroyapı içerisinde %5-20 hacim oluşturur. Karbür parçacıklarının kendi sertlikleri münferit olarak kimyasal bileşimlerine bağlıdır; ancak genel olarak Krom Karbürler 65-70 HRC, Molibden ve Tungsten karbürler yaklaşık 75 HRC civarında ve Vanadyum Karbürler ise 80-85 HRC aralığında sertliğe sahiptir. Takım ve kalıp çeliklerinin sertlik ve aşınma dayanımları, çelikteki karbür miktarı ve türü ile doğrudan alakalıdır. Ancak karbürlerin bu özelliği denetimli termomekanik ve ısıl işlemler ile en iyi/uygun (optimum) duruma getirilmelidir. Malzemede bulunan çok yüksek karbür parçacıkları aşınmaya ve tokluk azalmasına neden olabilir [41].

Tungsten (Wolfram) ve Molibden çelik üreticileri tarafından birbirlerinin ikamesi, olarak kullanılabilmektedir. Her ikisi de meneviş kararlılığını arttırır. Tungsten özgül ağırlık olarak molibdenin iki katı değere sahip olduğundan hafifliğin önemli olduğu durumlarda molibden tercih edilir. Kinetik olarak Tungstenin çelik içindeki difüzyonu Molibdenle karşılaştırıldığında daha yavaştır ve bu sayede taneler daha yavaş büyürler [42].

Amerika Birleşik Devletleri'nde 2006 yılında bir önceki yıla göre Niobyum kullanımındaki artış %36 ile 10.000 ton iken Tantalyum kullanımındaki artış %52 ile 437 tondur. ABD'de niyobyum veya tantal cevheri rezervi olmadığı için Birinci Dünya Savaşı'ndan bu yana yurtiçi tedarik her ulusal askeri acil durum döneminde endişe kaynağı olmuştur. Sonuncusu Kore savaşı sırasında (1950-53) askeri talep arttığında niyobyum ve tantal cevher kıtlığıyla sonuçlandı Dünya kaynakları ve madencilik kapasitesi coğrafi olarak Batı Yarımküre'de Brezilya ve Kanada'da, Doğu Yarımküre'de

Avustralya'da yoğunlaşmıştır. Dünya niyobyum ve tantal cevher rezervleri beklenen dünya talebini karşılamak için yeterlidir. Niobyum en çok çelikte bir alaşım elementi olarak kullanılırken Tantalın önde gelen kullanım alanı elektronik kapasitörlerdir. Çelik üretiminde Niyobyum, kullanılan vanadyumun yaklaşık %43'ünün yerini alabilir. İki birim vanadyum yerine üç birim niyobyum kullanılabilir; ancak, yeni çelikte daha yüksek erime sıcaklıkları [Nb: 2468 °C, V: 1910 °C/AÜ] ve farklı haddeleme metodolojisi ile sonuçta ortaya çıkan çelik özellikleri değişir. Sonuç olarak, farklı niyobyumun vanadyum ile ikamesinde fiyat [Fayda-Maliyet, AÜ] gözönüne alınır [43].

Çok sayıda farklı çeliğin işlenmesini, mekanik özelliklerini, mikroyapısını ve performansını güçlendirmek amacıyla Niyobyumun katkısı iyi bilinmektedir. Son birkaç onyıldır çelik üretiminde Niobyum kullanımı daha üstün yeni çeliklerin geliştirilmesinin önünü açmıştır. 2001 yılında, Charles Hatchett tarafından keşfinin 200. Yılında, bu metalin sanayide bilim ve teknolojinin çehresini nasıl değiştirdiği yeniden hatırlandı. (Niobium, Science & Technology, International Symposium Niobium, 2-5 Aralık Orlando, Florida, ABD) Her ne kadar keşfi çok daha önceye dayansa da ticari olarak ferroniyobyumun üretimi 1965 yılında Brezilya'da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineraçao (CBMM) tarafından başarı ile yapılmaya başlanmış ve mikroalaşımlama element olarak kullanılmıştır. O zamana dek sadece Vanadyum ve Titanyum kullanılmaktaydı. Çeliklerde bir mikroalaşım elementi olarak Niobyumun önemi, üzerinde son yıllarda yapılan giderek artan çok sayıda çalışmadan açıkça anlaşılmaktadır. Pek çok çalışmada Niyobyumun karbonla birleşerek oluşturduğu niyobyum monokarbürler, Azotla birleşerek oluşturuğu mononitrürler ve ikisinin kombinasyonu olarak karbonitrürler ile ilgilidir. Bunlar arasındaki dikkate değer farklar çeliğin üretimi aşamasında kullanılan özgün tekniklerin kendine özgü varsayımları ve sınırlamaları olması ile ilgilidir [44].

1.3. Takım Çelikleri

Takım Çelikleri hem çelikler, hem de demir dışı metaller ile plastikleri şekillendirme ve/veya kesme ve dilme işlemlerinde kullanılan alaşımlardır. Bu çelikler sertleştirilebilen ve gerilim giderme tavlaması yapılabilen yalın karbon çelikleri olabildiği gibi alaşımlı çelikler ya da yüksek/hız çelikleri olabilir. İlk ergitme işlemi, takım çeliklerinin kendine özgü özellikleri göz önüne alınarak genellikle elektrikli ark ocaklarında yapılır. Bunlar,

belirli el aletlerinde kullanılabildiği gibi oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda çalışmak üzere tasarlanmış dilme ve/veya şekillendirmede kullanılabilecek muhtelif sabitleyiciler olabilir. Takım çelikleri ayrıca, optimum performans için; aşınmaya dayanıklı, sertlik, tokluk ve diğer özelliklerin seçildiği geniş bir yelpazede kullanılır [45].

Bilinen ilk alaşımlı çelik Krom (Cr) içermekteydi. 1865 yılında Amerikan metalurjst Julius Baur tarafından patenti alınmış ve (New York) Brooklyn'de Chrome-Steel Co. firması tarafından üretilmiştir. Bu ilk alaşım başarılı olamadı, ancak Fransız metalurjist Henri-Ami Brustlein'i Krom ile alaşımlı çelik üretilmesi konusuna yöneltti. Alaşımlama sırasında denetlenemez sonuçlardan kaçınmak ve amaca uygun kromlu çelik üretebilmek için krom cevheri kullanmak yerine çelik içinde kolaylıkla eriyebilecek, daha önceden işlem görmüş daha rafine krom kullandı. 15-20 yıl boyunca krom alaşımlı çelikler; takım/kalıp/aletlerde, top mermileri ve zırh çeliği gibi askeri amaçlarda kullanılmak için üretildi ve satıldı. Bu nedenle Henri-Ami Brustlein (Fransa) "Alaşımlı Çeliklerin Babası" olarak kabul edilir [46].

Takım çelikleri genel olarak şu özelliklere sahip olmalıdırlar:

- Yüksek dayanıklılık
- Sertlik
- Aşınmaya karşı dayanım
- Sertleşebilirlik
- Termo-Mekanik işlere uygunluk
- Süneklik
- Yüksek Tokluk
- (Sıcak iş ve Yüksek Hız Çelikleri için) Yüksek Sıcaklık Özellikleri
- Yüksek Isı iletkenliği
- Düşük Isıl Genleşme
- Kolay İşlenebilirlik
- Kaynaklanabilir olma
- Parlatılabilme (Polisaj)

Takım Çelikleri adlandırmaları için ülkemizde, Avrupa'da olduğu gibi, Alman DIN17350 (1980) standartı kullanılırken 2000'lerden itibaren yeni standartlar kullanılmaktadır. Dünyada yaygın olarak kullanılan Amerikan ASTM A681 ve Türkiye'nin de kullandığı TS EN ISO 4957 standartları mevcuttur. Her iki standart da takım çeliklerinin sınıflandırmasını aşağıdaki şekilde yapmıştır:

Sıcak iş takım çelikleri,

Soğuk iş takım çelikleri,

Yüksek hız çelikleri [47, 48].

Bir başka sınıflamada ise takım çeliklerine Plastik Kalıp Çelikleri de dahil edilmiştir

Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsüne (AISI) göre sınıflandırmasına takım çelikleri aşağıdaki gruplara ayrılır:

- Suda sertleşen takım çelikleri-W
- Darbeye dayanıklı takım çelikleri-S
- Yağda sertleşen soğuk iş takım çelikleri-O
- Hava ile sertleşen, orta alaşımlı soğuk iş takım çelikleri-A
- Yüksek karbonlu, yüksek kromlu soğuk iş takım çelikleri-D
- Kalıp çelikleri-P
- Krom, tungsten ve/veya molibden ile alaşımlı sıcak iş takım çelikleri-H

  H1-H19 Krom

  H21-H26 Tungsten

  H42-H43 Molibden

- Tungsten yüksek hız takım çelikleri-T
- Molibden yüksek hız takım çelikleri-M
- Özel Amaçlı takım çelikleri-L (Yüksek karbon, farklı oranlarda tungsten) [49].

Dünya toplam çelik üretiminin % 8'ine sahip olan takım çeliklerinin kullanımı her yıl artış göstermektedir. Çelik malzemelerin Takım Çeliği olarak sınıflandırılması sadece kullanım amacına yönelik bir sınıflandırmadır.

Çelikleri; temelde kimyasal bileşimlerine göre, ayrıca; bazı fiziksel özelliklerine göre (paslanmaz, manyetik, yüksek sıcaklığa dayanıklı çelikler gibi), ısıl işlemlere göre (ıslah, sementasyon, nitrasyon çelikleri gibi), kullanım alanlarına göre (genel imalat, makine imalat, takım, yay, rulman çelikleri gibi) ve imalat şekline göre sınıflandırmak mümkündür. Diğer çelik gurupları gibi takım çeliklerinde kimyasal bileşime göre sınıflandırma mümkün değildir, zira hem kimyasal bileşim çok geniş aralıklarda değişebilmekte ve hem de diğer çelik gurupları ile kesişmeler olabilmektedir.

Bu nedenle aynı kimyasal bileşimdeki çelikler üretim yöntemlerindeki değişikliklerle farklı özelliklere sahip olabilmektedir, böylece farklı kullanım alanlarında aynı kimyasal bileşime sahip malzeme farklı isimler ile adlandırılabilmektedir. Örneğin;

- 29 CrMoV 9 (1.2307): Plastik enjeksiyon kalıp çeliği
- 30 CrMoV 9 (1.7701): Islah çeliği
- 31 CrMoV 9 (1.8519): Nitrasyon çeliği [50].

Bilinen en eski takım çelikleri basit, yalın karbon çelikleri idi. 20.yüzyıl başlarından itibaren giderek artan bir şekilde, daha karmaşık yüksek alaşımlı takım çelikleri geliştirildi. Diğer elementlerin yanı sıra önemli miktarlarda Tungsten (W), Molibden (Mo), Vanadyum (V), Manganez (Mn) ve Krom (Cr) içeren bu takım çelikleri ile kullanıcıların daha kuvvetli hizmet taleplerini karşılamayı, daha hassas boyutsal kontrolu ve ısıl işlem sırasında kırılmayı engelleme özgürlüğü sağlamak mümkün oldu. Birçok alaşımlı takım çeliği sıcaklığa dayanıklı yaylar, yüksel dayanımlı bağlantı elemanları, özel amaçlı vanalar ve çeşitli tiplerde rulmanlar gibi özellikle önemli ihtiyaçların karşılanmasını gerektiren makine bileşenleri ve yapısal uygulamalarda da kullanılmaktadır.

Çalışmaları sırasında aletler hızlı bir şekilde uygulanan aşırı yüksek yüklere maruz kalır. Takımlar kırılmaksızın ve aşırı aşınma ve deformasyona uğramadan bu yüklere dayanmalıdır. Birçok uygulamada takım çeliklerinin bu özelliklerini yüksek çalışma sıcaklıkları üreten koşullar altında da sağlaması gerekebilir. Yüksek sıcaklıklarda yumuşamaya karşı direnci, maksimum aşınma direncini ve tokluğu bir arada sağlayabilen tek bir araç yoktur. Sonuç olarak, uygun takım çeliği malzemesinin seçiminde özelliklerin optimum kombinasyonu ile istenilen sonuca ulaşmak için bazı ödünler vermek gerekebilir.

Takım Çelikleri sadece malzemeleri şekillendirmede değil, ayrıca Makine Parçaları olarak da kullanılır. Çalışan makinede ise devamlı tekrar eden yükler sözkonusudur. Başarılı netice almak için dört nokta gözönüne alınmalıdır:

1- Uygulama gereksinimlerini karşılamak için takım çeliklerinin temin edilebilmesi mümkün olan çok sayıda çeşidi arasından en amaca yönelik en uygun çelik seçilmeli,

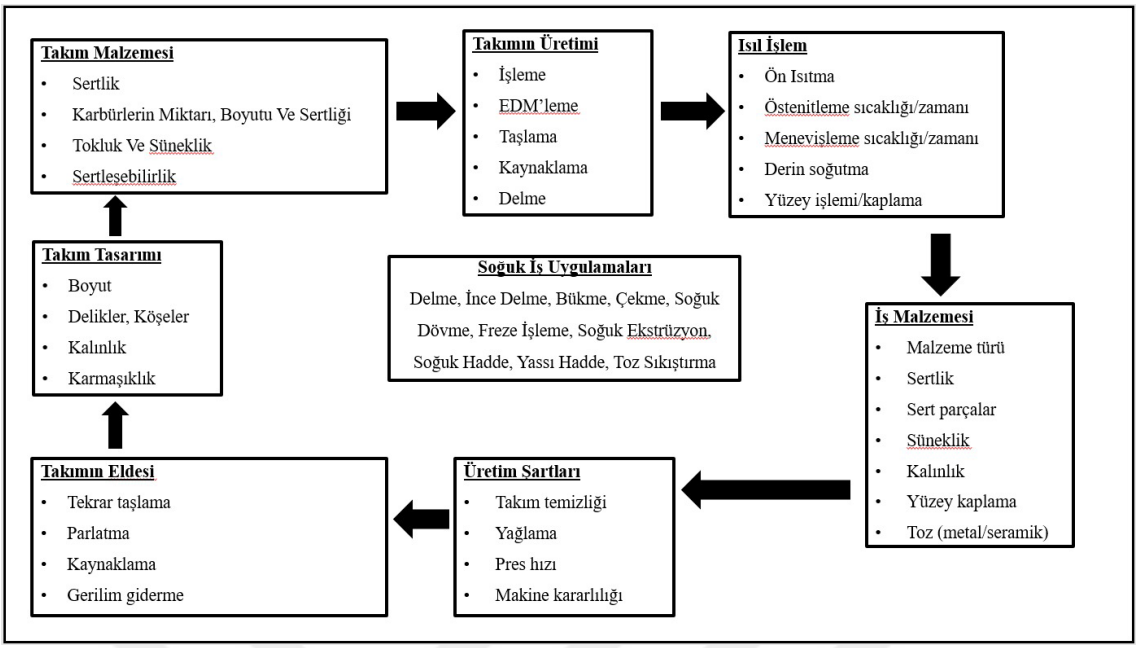
2- Çelik hassas bir biçimde işlenmeli ve ardından hizmette güvenilirlik sağlayacak şekilde kalite kontrolü yapılmalı,

3- Tasarım sırasında kritik ve uygun olmayan geometrilerle olası yorulma hasarları hesaba katılmalı,

İstenen çalışma özelliklerini elde etmek için gerekli olan uygun ısıl işlemler, çeliğin tipine ve belirtilen uygulamaya göre ayarlanmalı ve kurallara uygun bir şekilde yapılmalıdır [51].

Takım Çeliklerinin kullanıldığı kalıp sektöründe güçlü bir rekabet ve işi zamanında yetiştirme telaşı vardır. Ayrıca güvenirlilik ve çevresel faktörlerde sektöre ait kalıplarda kullanılacak malzemelerin seçiminde yeni taleplerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Geleneksel soğuk iş takım çeliklerinin özelliklerinin profili modern üretim metodları ile ve malzemeleri ile bu taleplerin her zaman karşılanabildiğini söyleyemeyiz. İşletme giderleri ve kalıbın kullanımı sırasında süreyi azaltmak, üretim giderlerini en aza indirebilmek için çok önem taşır. Optimum takım maliyeti, parça başına en düşük takım maliyetinin ancak bu işlem için seçilen çeliğin teknik koşullarının ve üretimi istenen parça sayısının optimum olması ile gerçekleşir. Eskiden beri kullanıla gelen kalitelerden farklı olarak kullanılacak yeni iş malzemesinin türü için en uygun takım çeliğini seçerken artık daha fazla dikkat edilmesi gerektiği açıktır.

Bazı özel uygulamalar için optimum takım çeliği kalitesi seçimindeki işlemler karşılaşılan hasar oluşumları ya da kalıptan üretilmesi beklenen parça sayısı esas alınarak yapılır. Malzemenin yanı sıra kalıbın ömrünü de etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörler Şekil 1.5'de gösterilmiştir [52]:



Şekil 1.5. Kalıp ömrünü etkileyen faktörler [52]

Yeni Nesil Çeliklerin kompleks malzeme üretimlerinde kullanılması ve ürün ağırlıklarının azaltılması ile daha kompleks parçalar üretilmeye başlanmıştır. 3. Nesil çelikler, 1. Nesil çeliklerden daha dayanıklı, 2. Nesil çeliklerden daha az maliyetlidir. 3. Nesil çelikler yardımıyla geometrik olarak kompleks ve hafif parçalar üretmek mümkündür [53].

Buhar türbinlerinin verimliliği, maksimum çalışma basıncı ve sıcaklığı arttırılarak iyileştirilebilir. Verimlilik, örneğin kömür yakılarak beslenen ve elektriğe dönüştürülen enerjinin oranını tanımlar. Daha yüksek bir verimlilik, belirli bir elektrik çıkışı için yakıt tasarrufuna sağlar ve sonuç olarak dünyaya verilen zararın oranında azalma olur. Daha yüksek verim sağlayan elektrik santrali için öngörülen daha yüksek sıcaklıklara ulaşabilecek yeni çeliklerin geliştirilmesi sürdürülebilirlik için gereklidir.

Tek şaftlı ağır hizmet tipi gaz türbinlerin önemli parçaları su verilmiş ve temperlenmiş yüksek tokluğa sahip Cr-Mo-V (%1 Cr - %1,25 Mo - %0,25 V) çeliğinden yapılmıştır [54].

1.3.1. Takım Çelikleri Üretim Yöntemleri

Takım Çelikleri ürünlerindeki tüm segmentlerde kaliteli, hassas ve üstün ürün özellikleri arzu edildiğinden bunlara ait çelik üretimleri geleneksel ve alışılmış (konvansiyonel) çelik üretimlerinden ayrılır. İleri Teknoloji gerektiren bir dizi üretim için hammaddeden başlayarak üretim sertifikası oluşturma ile nihai ürünün kullanıcısına ulaşmasını kapsayan bu süreçler aşağıdaki gibi özeklenebilir:

- Ergitme (Yüksek Fırın + BOF veya Elektrik Ark Ocağı)
- Arıtma (Pota Fırını ve Vakum Fırını)
- Katılaştırma (Sürekli Döküm veya İngot)
- Hassas Arıtma (ESR, VAR)
- Termo-Mekanik İşlemler (Haddeleme veya Dövme – Rolling, Forging)
- Isıl İşlemler
- Kalite ve Belgeleme

Takım çeliklerinin tamamına yakını yüksek fırın ve bazik oksijen fırınlarında, elektrik ark ocaklarında, az bir kısmı da yeni bir trend oluşturan indüksiyon ocaklarında üretilir. Buradaki işlem, en yalın ifade ile sadece bir "ergitme" işlemidir. Burada üretilen çeliğin bir sonraki safhada ne olacağının ve o yarı-ürün çelikle ne/neler yapılacağının fazlaca bir önemi yoktur. Çeliğe asıl fonksiyonel vasıflarını kazandıracak "arıtma" (refining) işlemleri pota ocağında yapılır. Kimyasal kompozisyonun arzu edilen standarta uygun nihai ve tam değerlerine ulaşması burada sağlanır. Ayrıca vakumla gaz giderme VD (Vacuum Degasser), vakum ark gaz giderme işlemi (VAD) ile gerçekleştirilir. Homojen mikro yapı ve daha iyi mekanik özellikler ile inklüzyonlardan olabildiğince arındırılmış temiz çelik elde etmek için elektro cüruf yeniden ergitme (ESR) ve vakum ark yeniden ergitme (VAR) kullanılmaktadır. Bu işlemde VAD'den elde edilen çelik külçe, vakum altında yeniden eritilir. ESR pahalı bir işlem olup, kükürt içeriğinin düşürülmesi ve inklüzyonların giderilmesi ile takım çeliğinin yüksek derecede temizliği isteniyorsa gerçekleştirilir. Vakum Oksijen Dekarbürizasyonu (VOD) ise, paslanmaz çelik için karbonu düşük değerlere ulaştırmak amacıyla kullanılan bir üretim sürecidir.

Kalitelerine göre ürünlerin sınıflandırılmasında üretim metodolojileri geçmişine dayanarak aşağıdaki temel ayrımları yapmak mümkündür:

1- + Birinci kaliteler: Toz metalürjisi, VAR (vakum ark yeniden ergitme) yollarıyla üretilmesi,

2- Birinci kaliteler: ESR (cüruf altında yeniden ergitme), püskürtme biriktirme, ikincil metalürji yollarıyla üretilmesi,

3- Geleneksel kaliteler: İleri dövme yöntemleri, kontrollü soğutma ile denetimli karbür oluşumu, alışılmış üretim metotlarıyla üretim [55].

Ana hatlarıyla ergitme, arıtma, katılaştırma ve haddeleme olarak 4 temel işlemler dizisi ile yüzeyinde mikron boyutlarında yapılacak işlemler hariç artık içerisine hiçbir maddenin kabulüne izin vermeyen katı çelik, ancak ısıl işlemler yoluyla sınırlı değişikliğe izin verir. Kısaca katılaşma olarak adlandırdığımız sıvı fazdan katı faza geçiş, temel üretim işlemleri sırasında denetlenebilecek son aşamadır. Burada kimyasal bir ilave ya da mekanik bir uygulama söz konusu olmayıp basit bir "soğuma" gibi görülen süreçte kritik tek bir faktör bulunmaktadır: Soğutma hızı. Soğutma hızı ısının uzaklaştırılma hızıdır. Burada yapılabilecek farklı işlemlerle elde edilecek mikroyapı ile, en sonunda takım çeliği kullanıcısına ulaşacak mikroyapı arasında olumlu veya olumsuz etki edecek bir ilişki vardır. Katılaşma, bir anda olup bitmeyeceğinden katılaşma evresinin tamamlanmasına kadar ısının uzaklaştığı dış bölgelerde katı faz oluşurken yüzeyden uzak bölgeler bir süre daha sıvı olarak kalmayı sürdürecek, tamamen katı ve tamamen sıvı bölgeler arasında süresi sınırlı bir geçiş bölgesi de oluşacaktır.

1.3.2. Segregasyon (Toplanma)

Segregasyon bir tür tam karışmama olgusudur ve malzeme mikroyapısında görülmesi mikroyapının homojen olmadığını gösterir. Segregasyona neden olan olgular değişiktir. Metal ve alaşımların katılaşmasında oluşabilen ve mikroyapının homojen olmamasına neden olan değişik tarz karışmama işlemine verilen addır. Segregasyon, seiger (dikine anlamına gelir) kelimesinden türetilmiştir ve değişik ağırlıktaki ergiyiklerin üstüste tabakalaşmasını tanımlar. Başta yoğunluk farkından gelen ağırlık segregasyonunun yanısıra blok/ingot segregasyonu ile kristal segregasyonları görülür. Takım çeliklerinde karbon ile beraber segrege eden karbür oluşturucu elementler dendritler arası yörelerde

beklenmeyen karbür oluşumuna neden olur. Tüm bunların ötesinde mikro düzeyde kristal içi segregasyon gerçekleşir. Kristal büyürken elementlerin miktarları merkezden kenara doğru değişir. Kristal segregasyonu difuzyon tavlaması ile giderilir.

Segregasyon etkilerini mikroyapı farklılıkları üzerinden yorumlamak gerekir. Segregasyon, çelikte bölgeler arası sertlik farklılıklarına yol açtığından ısıl işlem protokollerinde bunu gözönüne alan bir yol izlenmelidir. Aksi taktirde segregasyondan kaynaklanabilecek farklı mikroyapı oluşumları ve beklenmeyen kaba karbür oluşumları, çatlak başlangıcı olasılığını artırarak kırılma yönünde etkiler [56].

Segregasyon, sıvı metalin dökümünde katılaşma, sıvı fazdan katı faza geçiş sırasında oluşan doğal bir olaydır. Çeliğin mekanik özellikleri açısından bu olay hem kaliteyi hem yapılan işin ekonomisini etkiler. Katılaşma sırasında demir kristalleri genel olarak büyüyerek dentritik (dallanmış) bir şekilde yönelerek faz değiştirir. Sıvı içerisindeki her bir farklı elementin büyüyen bu kristale karşı kendine özgü çekim (affinity) özellikleri vardır; elementlerden bazıları katılaşma başlangıç aşamasındaki bu kristale doğru hızla hareket ederler, bazıları ise itilirler. Elemetlerin bu farklı çekim özelliklerinin nedeni kendi atom yapıları ile demirin kristal yapısına benzer olup olmaması ile ilgilidir. Atomik yarıçapı ve kristal yapısı demirin atomik yapıçapı ve kristal yapısına en yakın olanlar hızla çekilirler. Atomik yarıçapları demirin atomik yarıçapından daha küçük olan elementler genellikle itilirler. Ancak Manganez (Mn) ve Silisyum (Si) buna aykırı davranırlar: Manganez, periyotik tabloda demirin yanında yer almasına rağmen atom yapısı demire çok benzese de itilir. Çünkü kübik bir kristal yapı için atom yarıçapı demirin atom yarıçapından büyüktür. Silisyumun atom yarı çapı ise demirden küçüktür ancak oluşan kritallerin arasına kolaylıkla girebilir ve itilmezler.

Kristal gelişimi sırasında itilen elementler, kalan, o ana dek katılaşmamış sıvı faza doğru yayılarak hareket ederler. Bu elementlerin atomlarının sıvı faz içerisindeki miktar ve yoğunlukları arttıkça uzaklaşmaları zorlaşır, yayılma hızları azalır. İtilen elementlerin konsantrasyonu kristal içerisinde en az, kristal sınırlarında ise en çoktur. Bu oluşum "Mikro-Segregasyon" ya da çekirdeklenme (nucleation) olarak adlandırılır.

Malzemenin mekanik özelliklerine olumsuz etkiler yapma potansiyeli olan toparlanmış bu elementlerin etkileri ısıl işlemlerle en aza indirilir [57].

Segregasyon inşaatlarda beton döküldükten sonra karşılaşılan ve aynı terimle anılan, betonun özelliklerini bozduğu için de istenmeyen bir olaydır. Özellikle beton fazla sulu olduğunda içindeki farklı boyutlardaki agrega ve kumun bir kısmı beton donmadan kalıp içinde başka bölgelere yönelir, betonun homojenliğini bozar. Çelikteki segregasyon da buna benzer şekilde oluşmaktadır.

SİTÇ'de hızlı katılaşma mekanik özelliklerde, daha sonraki aşamalarda faydalı olabilme potansiyeline sahip bir mikroyapının kapısını açar. Yüksek krom içeren takım çeliklerinde, örneğin %12 Cr bulunduran D2, katılaşma sırasında hıza bağlı olarak alaşım elementlerinin önemli ölçüde ayrışmasına maruz kalınabilir. AISI D2 (DIN 1.2379), kromun yanıra molibden, vanadyum, nikel ve tabii ki manganez ile silisyum da içerir. Dökümden sonra soğuma başladığında ilk soğumaya başlayacak olan element demirdir. Bu durumda diğer alaşım elementleri ile birlikte karbon ve krom gibi karbür oluşturmaya meyilli metaller katılaşma bölgesi dışına doğru uzaklaşır ve lokal karbürler oluşturur. Matris içinde ince ve iyi dağılmış karbürlerin oluşumu, büyüklüğü, dağılımı takım çeliklerinin tüm kırılma tokluğu ve aşınma özellikleri ile sertlik gibi mekanik özellikleri elde edilmesinde baş aktördür [58].

Sıvı olarak elde edilen çelik, tüm ikincil işlemler tamamlandıktan ve en önemli iki ana parametre olan sıcaklık ve kimyasal kompozisyon tam olarak uygun şekilde ayarlandıktan sonra dökümü (katılaşması) tamamlanmış olduğunda mikroyapı artık bir sonraki ısıl işlemlere (su verme ve menevişleme) karşı çok dirençlidir. Segregasyon olduğu hallerde sorunlu bir izotropik olmama durumu [her yönde maddenin özelliğinin aynı olmaması, yönden bağımsız olması hali, bir anlamda homojen olmayan bir yapı, çelikte istenen bir oluşum değildir/AÜ] ile karşı karşıya kalırız. Bu ise malzemeyi kırılma davranışları göstermeye hazır hale getirir. Burada, artık nasıl bir morfoloji oluştuysa, artık matriste oluşmuş birincil karbürlerin bundan sonra yapılacak ısıl işlemlerle çözünmesi zordur. Bu eşik termomekanik haddeleme veya dövme ile aşılmaya çalışılsa da, bunların oluşumlarını hızlı soğutma ile baştan engellemek daha uygundur. Kaba karbürlerin oluşumunu engellemek, kırılganlığı azaltıp tokluğu arttırmak bu yolla mümkündür. Tatbik edilebilecek en ekonomik yollardan biri sıvı fazdan katı faza geçiş sırasında

katılaşmaya haricen sprey şeklinde atomize su püskürtülmesidir. Bu yolla daha rafine karbür elde edilir. Bu ise sonraki su verme öncesi tavlama (östenit) için daha az zaman ve enerji harcamak anlamı taşır [59].

1.3.3. Takım Çeliklerinin İşlenebilirliği

İdeal olanı takım çeliklerinin mekanik işlemesinin tel erozyon ile yapılmasıdır. Ancak, konvansiyonel yollarla işleme gerektiren sayısız durumla da karşılaşılabilmektedir. Yivler, dar kanallar, çapları küçük delikler, muhtelif diş açma gereksinimleri gibi karmaşık işlemler, taşlama başta olmak üzere hassas torna, tesviye freze benzeri makinelerin uygun kullanımlarını gerektirir. Kalıpçılık ve şekillendirme bölümünde bahsedildiği üzere mekanik işlemenin toplam maliyetteki payının yarıdan fazla olduğu düşünüldüğünde geri dönüşsüz bu işlemlerin doğru tanımlanması gereklidir.

Üretim kavramının omurgasını oluşturan (Man-Material-Machine, İnsan-Malzeme-Makine) 3M'in ikisi, hangi malzemenin hangi makinede işleneceği sorusu ile burada karşımıza çıkmaktadır.

İşlenebilirlik ölçütleri üstyapısı olarak adlandırılabilecek bu konunun bazı alt kırılımları şunlardır:

1- Takım ömrü, işleme sırasında alet tarafından çıkartılabilecek malzemenin fiziği,

2- Ulaşılacak makul maksimum işleme hızı,

3- İşleme için gerekli kuvvet ve enerji düzeyi,

4- Yüzey özellikleri

5- Talaş özellikleri ve bölgesel temizleme [60].

İşleme takım ve aletleri seçiminde ise kriterlerden bazıları aşağıdadır:

1- Yorulma dayanımı,

2- Mekanik özellikler, dayanım, sertlik ve mikro yapı,

3- Mekanik işleme,

4- Sıcaklık [61].

1.3.4. Soğuk İş Takım Çelikleri

Soğuk İş Takım Çeliklerinin geniş kullanım alanları vardır. Pek çok farklı ve çok boyutlu talepleri karşılamak için krom alaşımları, vanadyum alaşımları, krom-tungsten alaşımları, krom-vanadyum alaşımları gibi çeşitli farklı kompozisyonlar gereklidir.

Bu grup çelikler aşınma direncinin en önemli olduğu soğuk iş uygulamalarında kullanılan alaşımlı çelikler grubunu teşkil eder. Soğuk iş takım çelikleri yüzey sıcaklığının 200 ^{o}C'nin altında imalat uygulamalarının yapıldığı yerlerde kullanılır. Bunlar, bu sıcaklık aralığında sayısız mekanik işleme ve şekillendirme işlemlerinden kaynaklanan yüksek streslere dayanıklılığı garanti altına almalıdır. Daha yüksek sertliğe sahip olmalı, daha yüksek aşınma direncine sahip olmalı, daha yüksek tokluğa sahip olmalı, darbe ve basınçlara karşı daha dayanıklı olmalı, sertleştirme ve menevişleme sırasında daha yüksek boyutsal kararlılığa sahip olmalıdır.

Bu çelikler üç farklı gruba ayrılır:

- Düşük alaşımlı takım çelikleri
- Yüksek karbon/yüksek krom kalıp çelikleri
- Aşınmaya dayanıklı özel soğuk iş çelikleri [62].

Soğuk İş Takım Çelikleri, kullanıldığı ortam maximum sıcaklığı bakımından 200 °C'nin altında çalışmaya uygun alaşımlı takım çeliği grubudur. Bu malzemelerden beklenen öncelikli özellikler, yüksek sertliğe paralel aşınma dayanımının yanı sıra, bu sertlikte darbelere karşı direncinin yüksek olmasıdır. İster izabe yoluyla sıvı metalden alaşımlama yoluyla, ister Toz Metalurji yoluyla üretilmiş olsun, tüm takım çeliklerinin genellikle homojen malzemeler oldukları varsayılır. Ancak, mikroyapı detaylı düşünüldüğünde ana matris içerisinde martensitik çelik takviyeli çok çeşitli karbür oluşumları ile arzu edilmeseler de kaçınılmaz olarak bünyede bulunabilecek bazı metalik olmayan inklüzyonlardan oluştukları için mekanik davranışları bugözle de değerlendirilmelidir. Takım çelikleri, diğer birçok çelik örneğinde olduğu gibi, bir anlamda ana matrisi metal olan kompozit malzemeler olduklarını ifade etmek yanlış olmaz. Kuşkusuz, doğaları gereği kompozitin bir diğer bileşeni olan karbürler martensitik matristen daha sert ve dayanıklıdır, bu da bu yapının yüke maruz kalması durumunda bu parçacıklar ve matris arasında davranış farklılıkları nedeniyle uyumsuz kalıcı deformasyonlar ortaya çıkabilir.

Mikroyapı sadece mekanik davranışları değil, aynı zamanda yorulma, çatlak oluşumu, kullanım ömrü gibi pekçok performans olumsuzlularına da yol açabildiğinden, karbür oluşumlarının nicel (örneğin geometri, şekil, boyut, oran) ve nitel (örneğin kimyasal) yollarla denetlenmesi ve kuşkusuz uygun ısıl işlemlerle aşınma direncini yönlendirmek gereklidir.

Takım Çeliklerinden Beklenen Özellikler şunlardır: Her şeyden önce safsızlıklardan arıdırılmış temiz çelik olmalıdır. Takım çeliklerinin deformasyona karşı direçli olabilmeleri için sertlikle beraber sertleşebilirlik özelliklerini aynı anda taşıması önemlidir. Aşınma dayanımı için karbür mikroyapısını sağlayan Cr, Mo ve Mn gibi elementler katkı sağlar. T.Ç. için bir diğer önemli husus da boyutsal kararlılıktır. Çalışma sırasında yaşanabilecek sorunları en aza indirebilmek için yüksek tokluğa ve aynı zamanda yüksek akma mukavemetine sahip çelikler gereklidir [63].

Soğuk İş Takım Çelikleri için Tokluk ile birlikte ilk aranacak özelliklerden biri yüksek sertliktir. Bazı takım çelikleri için bu 65 HRC'ye, hatta, ötesi ulaşılması güç sayılara dek çıkabilir. Ancak bu özellik 200-250 °C'lerden itibaren belirgin bir şekilde düşer. Sıcak iş Takım Çelikleri için Menevişleme (Temperleme) öncesi daha düşük sertlikler sözkonusu ise de bu çelikler sahip oldukları sertlik değerlerini gerek 500-600 °C'lerde temper sırasında, gerek çalışma operasyonları esnasında muhafaza eder ve sertlik düşmez. Yüksek hız çeliklerinde ise menevişleme öncesinde de, menevişleme sırasında da, keza çalışma sırasında da sertlik korunur. Ayrıca, Sıcak İş ve Yüksek hız çeliklerinde Menevişleme (Temperleme) sonrasında özellikle Molibden (Mo), Tungsten (W) ve Vanadyum (V) gibi alaşım elementlerinin oluşturduğu farklı mikro karbür çökeltileri konfigürasyonlarının katkısı ile **"ikincil sertleşme"** olarak adlandırılan nisbi bir sertlik artışı görülür.

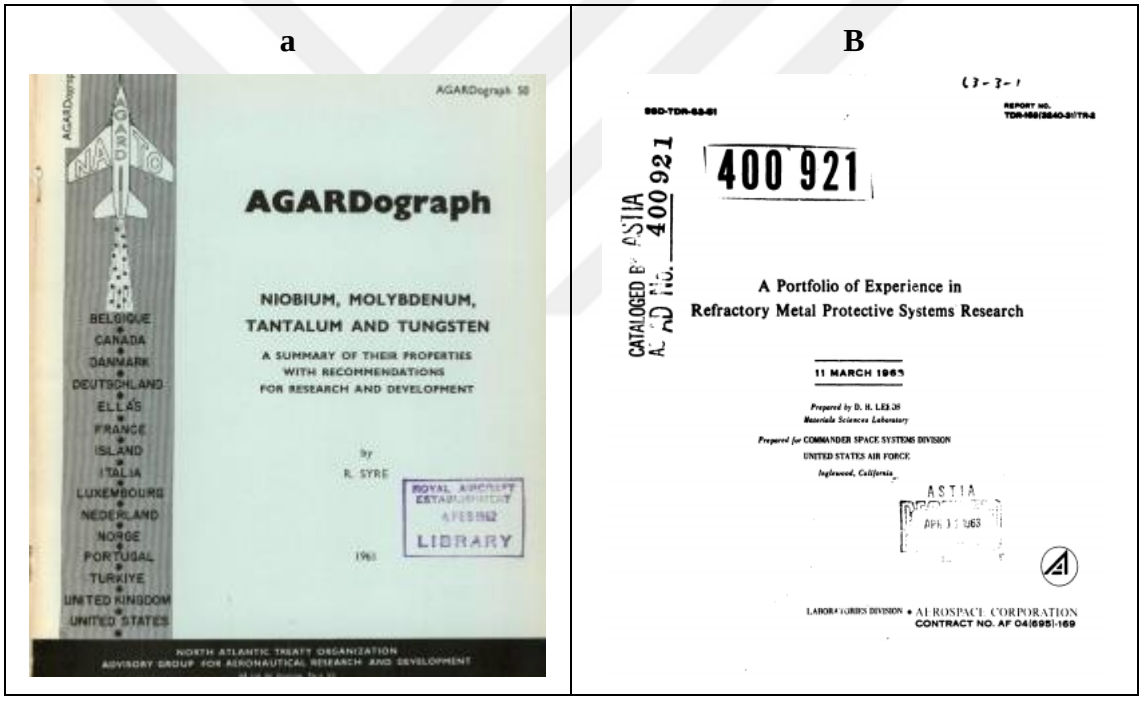
Molibden sıklıkla krom ve vanadyum ile birbirinin yerine kullanılabilirken, birçok durumda benzersiz özellikler kazandırır. Sonuç olarak, son birkaç on yılda arzı da aşan talebi ile Molibden (Mo) kullanımı önemli ölçüde genişledi [64].

Soğuk iş uygulamalarında kesici bıçaklar ve zımba tertibatı olarak yüksek karbür içeriğine sahip takım çelikleri kullanılır. Takımın hizmet ömrü, aşınma direnci ve yorulma mukavemeti ile sınırlıdır. Kalıp Endüstrisinde kesme, baskı ve zımbalamada kullanılan Soğuk İş Takım Çeliklerinde alaşımlama elementleri Karbon (C), Krom (Cr)

ve Molibden (Mo) ve diğer elementler tarafından matris içerisinde oluşturulan Karbür yapısının iki yönlü etkisi olduğu bilinmektedir: Kararlı yapılarıyla daha üstün sertlik ve aşınma direncin ön planda olduğu üstün dayanıklılık özellikleri sağlaması yanında, aynı zamanda, tekrar eden yüklerde takım ömürünü sınırlayan form bozuklukları ve kırılma ile de sonuçlanabilecek mikro-çatlak oluşumuna neden olma potansiyeli [65].

1.4. Refrakter Metaller

Refrakter kelimesi Latince "refractorius" kökeninden gelmekte ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı anlamı taşımaktadır. Bir asırdan fazla geçmişi olan Alaşımlı Çelik üretiminde eklenmesi ve/veya çıkarılması ile ürün karakterini değiştirme gizil gücü olan birçok element arasında "Refrakter Metallerin" (RM) önemli etkileri vardır.



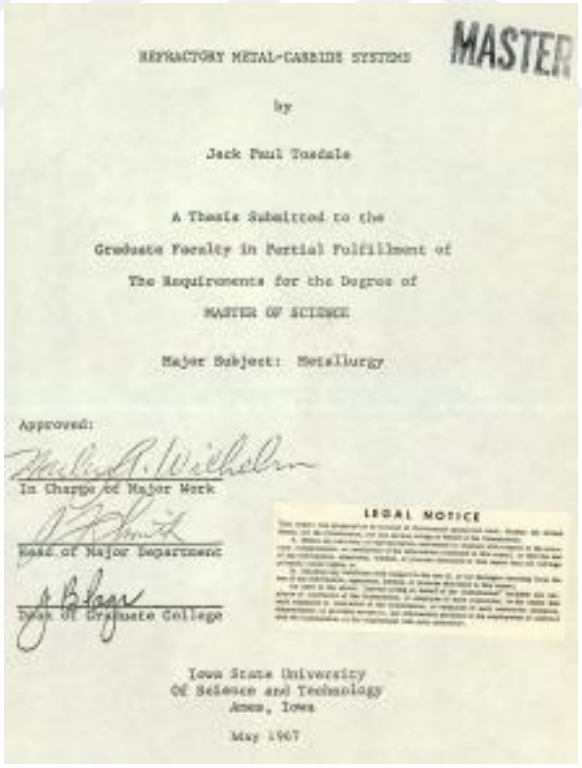
Şekil 1.6. (a) NATO yayını kitap (b) AeroSpace corporation yayını kitap [66] [67]

Özellikle 1900'lü yılların ilk çeyreğinden başlayarak bu konuda ciddi çalışmalar yapılmıştır. Çoğu uzay-havacılık-savunma üçgeni merkezli bu çalışmaların öncüsü gelişmiş ülkeler olmuşur. **Şekil 1.6.(a)** Türkiye'nin de T. C. Milli Savunma Bakanlığı ile aktif rol aldığı çalışmalarda NATO (North Atlantic Treaty Organization, Kuzey Atlantik Anlaşması Organizasyonu) üyesi ülkeler AGARD (Advisory Group for Aerospace Research and Development, Havacılık ve Uzay Araştırma ve Geliştirme Danışma Grubu) 1961 yılında Refrakter Metallerin 4 As'ı olan Niyobum, Molibden, Tantal ve Tungsteni

kitaplaştırarak üye ülkelerle bilgileri paylaşmışlardır [66].

Şekil 1.6. (b) NASA, Amerikan Ordusu gibi kurumlara destek sağlayan AeroSpace Corporation tarafından Hava Kuvvetleri Uzay Sistemleri komutanlığı için hazırlanan dökümanlarda (1962 ve 1963) Kolombiyum [O yıllarda Niyobum'a Kolombiyum da denirdi/AÜ], Molibden, Tantal ve Tungsten ile ilgili 1900'lü yıllarda yayınlanmış yaklaşık 4.000 eser listelenmiştir [67].

O yıllarda sadece askeri ve uzay alanlarında değil, sivil-akademik alanda da bilim dünyasında RM ile ilgili çok sayıda çalışmalar yapılmakta olup bazı örnekleri şunlardır: 1925'te, bu metallerin karbürlerinin erime sıcaklıklarnın üzerindeki sıcaklıklarda kararlılığı ile ilgili Friederich ve Sittig veya 1930-1970 arasında Toz Metalurji ve Sinterleme çalışmalarıyla Hoyt (1930), Chiotti (1952), Whitehead ve Brownle (1957), Schwartzkopf ve Kieffer (1960), Yamamoto (1964), Hanson (1966), ve nihayet Atom Enerjisi Komisyonu tarafından desteklenen tez çalışmasıyla Jack Paul Tosdale ve danışmanı Dr. H. A. Wilhelm (1967) [68].



REFRACTORY METAL-CARBIDE SYSTEMS

MASTER

by

Jack Paul Tosdale

A Thesis Submitted to the
Graduate Faculty in Partial Fulfillment of
The Requirements for the Degree of
MASTER OF SCIENCE

Major Subject: Metallurgy

Approved:

In Charge of Major Work

Head of Major Department

Dean of Graduate College

LEGAL NOTICE

Iowa State University
Of Science and Technology
Ames, Iowa

May 1967

Şekil 1.7. Jack Paul Tosdale master tezi 1967 [68]

Refrakter metallerle ilgili o yıllarda ciddi çalışmaların yapıldığı ve kongreler

düzenlendiği bilinmektedir. Bazıları Tablo 1.4'de verilmiştir.

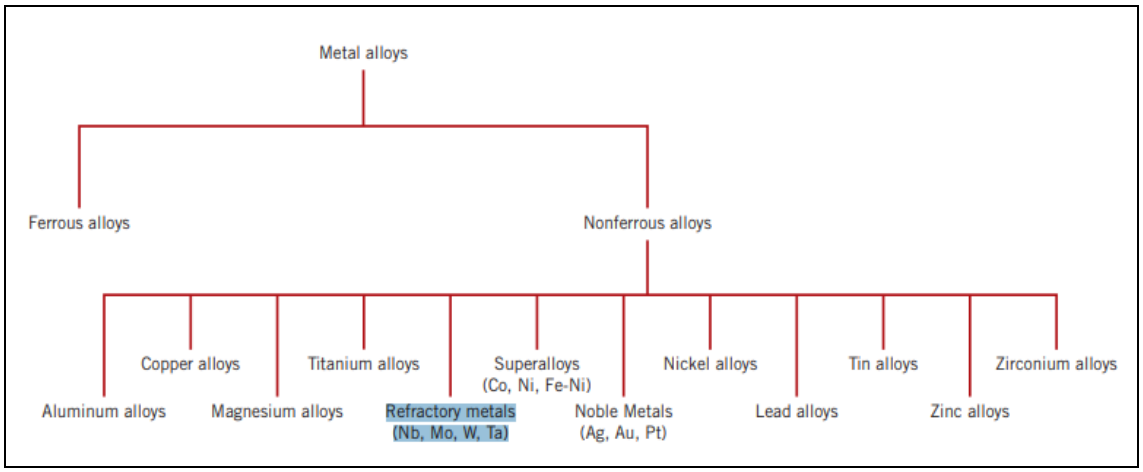
Tablo 1.4. 1960-1970 yılları arasında Refrakter Metaller kongreleri [69]

Şehir	**Tarih**	**Konu**
Detroit Michigan ABD	25-26.05.1960	Conference on refractory metals and alloys.
L.A. California ABD	9-10.12.1963	Conference on applied aspects of refractory metals
Paris Fransa	28.06-01.07.1965	International symposium on physical, chemical and nuclear properties of refractory materials
Indiana ABD	3-5.10.1965	Technical conference on physical metallurgy of refractory metals.
Tennessee ABD	12-14.09.1967	Conference on chemical vapor deposition of refractory metals

Hangi metallerin RM grubuna dahil edileceği ile ilgili farklı argümanlar vardır. Bu farklılıkların bazıları Fahrenheit-Celcius dönüşümünden de kaynaklabileceği düşünülse de sayıları 5 ile 15 arasında değişen metalin refrakter metal sayıldığı bilimsel ve ticari çalışmalar bulunmaktadır.

Nb, Mo, V, Ru, Rh, Ta, W, Re, Os, Ir, Zr ve Cr metalleri refrakter metal olarak isimlendirilmektedir. Ergime sıcaklıkları, oksitlerinin ergime noktalarından yüksektir. Hacim merkezli kübik (HMK) yapıdadır. V, Nb ve Cr refrakter metalleri oldukça düşük yoğunluğa sahiptir. Bu metallerden niyobyum (Nb), tantal (Ta), molibden (Mo) ve tungsten (W) elektronik, kimyasal ve nükleer uygulamalarda ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımları açısından çok iyi potansiyele sahiptir [70].

Son derece yüksek erime sıcaklıklarına sahip metaller, refrakter metaller olarak sınıflandırılır. Niyobyum (Nb), Molibden (Mo), Tungsten (W) ve Tantal (Ta) bu gruba dahildir. Renyum da bu gruba dahildir [71].



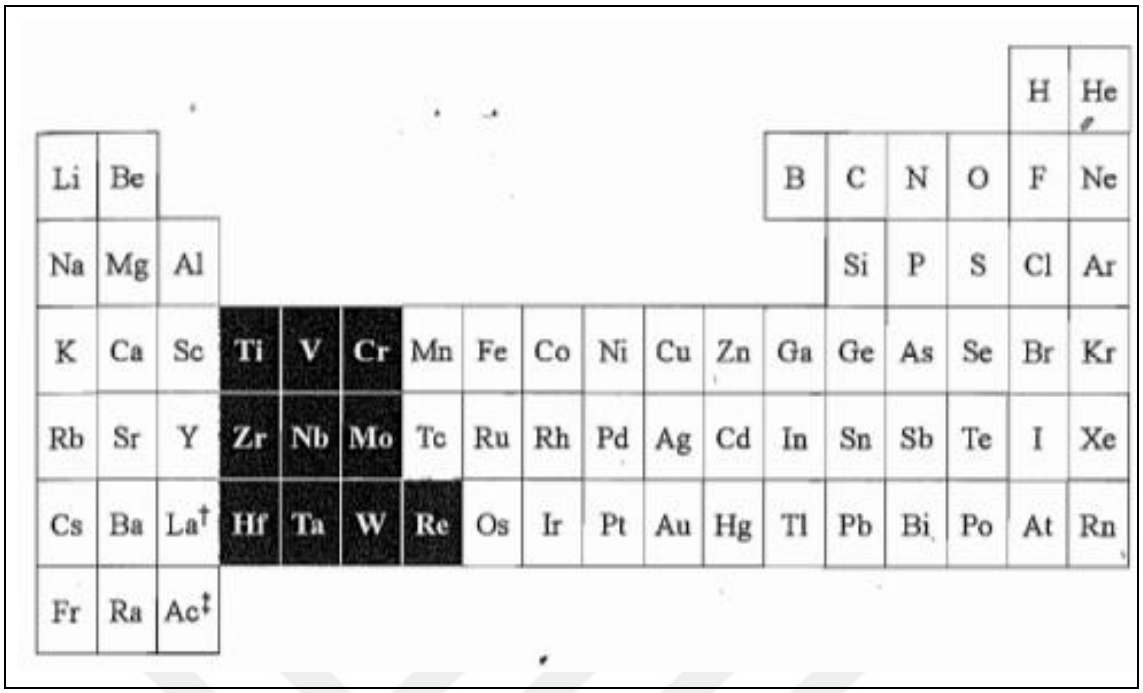
Şekil 1.8. Calister'e göre refrakter metaller [71]

Tablo 1.5. Refrakter metaller erime sıcaklıkları ve yoğunlukları

Element	**Erime Sıcaklığı °C**	**Yoğunluk gr/cm³**
Tungsten (W)	3.410	19,3
Renyum (Re)	3.180	21,0
Tantal (Ta)	2.996	16,6
Molibden (Mo)	2.617	10,2
Niobyum (Nb)	2.468	8,6
Hafniyum (Hf)	2.272	13,3
Vanadyum (V)	1.910	6,0
Krom (Cr)	1.907	7,2
Zirkonyum (Zr)	1.855	6,5
Titanyum (Ti)	1.668	4,5

Bazı kaynaklar ise erime sıcaklıkları yüksek olan Hafniyum, Vanadyum, Krom, Zirkonyum ve Titanyum elementlerini de Refrakter Metaller grubuna dahil etmektedir [72].

Refrater Metaller: (Erime Sıcaklıkları (°C): Zr (1855), Hf (2231), V (1910), Nb (2469), Ta (3020), Mo (2623), W (3422), Re (3186) [73].

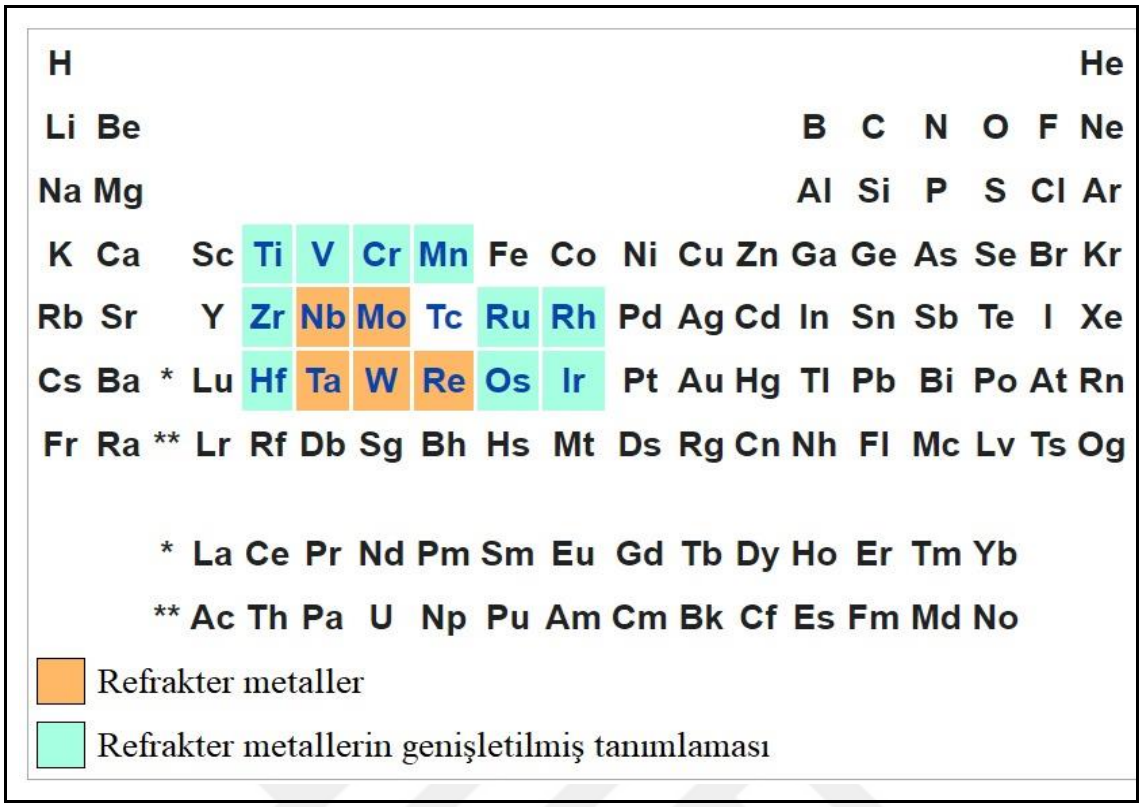


Şekil 1.9. Habashi'ye göre refrakter metaller [74]

International Journal of Refractory Metals and Hard Materials refrakter metalleri erime noktaları (Tm) 1850'nin üzerinde olan metaller olarak tanımlar. Bu tanıma göre, Nb, Mo, V, Ru, Rh, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Zr ve Cr'nin tümü refrakter metaller olarak adlandırılabilir [75].

Refrakter metaller, 3500 °F [1927 °C/AÜ] üzerindeki erime sıcaklıkları olan metaller olarak tanımlanır. Bu şekilde tanımlanan on bir metalden dördü (Cb, Mo, Ta ve W), arzu edilen özellikleri ve makul temin edilebilirlikleri nedeniyle son yıllarda yapısal malzemeler olarak önemli ölçüde geliştirilmiştir. Kalan yedi tanesi ise (Re, Hf, Ir, Rh, Ru, Tc ve Os) daha az gelişmiştir [76].

"Refrakter Metaller" terimi genellikle erime noktaları 2000^{o}C'den (3630^{o}F) yüksek olan metaller için kullanılır. Gruptaki başlıca malzemeler tungsten, tantal, molibden ve niyobyumdur. Erime noktası 1852^{o}C (3365^{o}F) olmasına rağmen zirkonyum da refrakter metaller grubuna dahildir. Diğer refrakter metaller renyum, iridyum, hafniyum ve osmiyumdur. İridyum ve osmiyum ayrıca değerli metallerin platin grubunda da kabul edilmektedir. Üçünün de üretilmesi çok pahalıdır, bu nedenle sadece çok özel uygulamalarda kullanılır. Tüm refrakter metaller, geleneksel üretim metodolojileri kullanılarak kolayca üretilir. Refrakter metaller içerisinde tantal ve niyobyum üretilmesi en kolayı, tungsten ise üretilmesi en zor olanıdır [77].

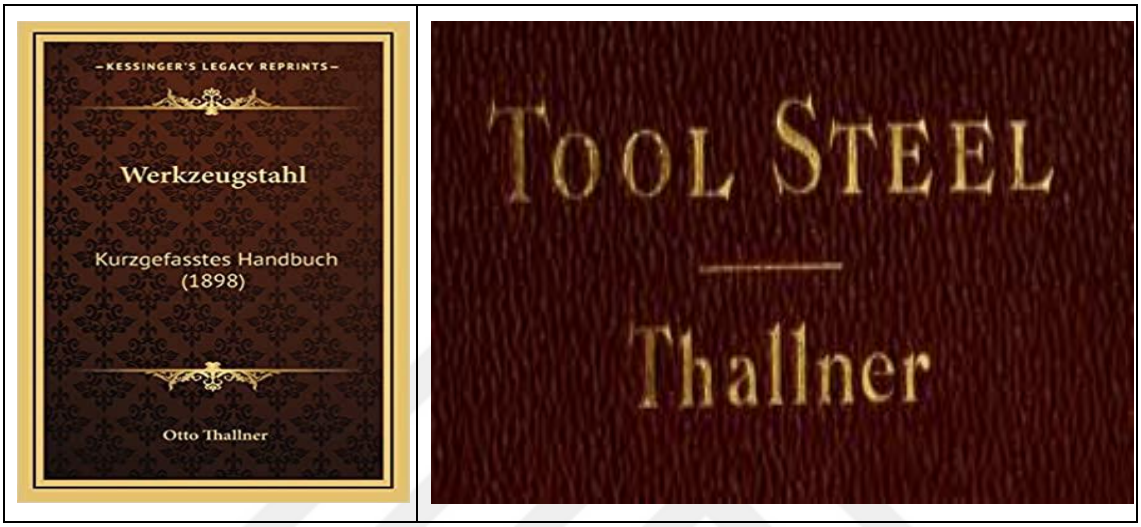


Şekil 1.10. Refrakter metaller tümü

Almanya'da çelik üreticisi BismarckHütte firmasında çelik üretim yöneticisi Otto Thallner tarafından 1898 yılında kendi tesislerindeki pratikten de yararlanılarak yazılan ve sonraki yıllarda İngilizce ve Fransızca gibi pek çok dile tercüme edilen "Takım Çeliği-Özlü Bir Elkitabı" (Werkzeugstahl: Kurzgefasstes Handbuch) adlı eserinde aşağıdaki ifadeler yer almıştır:

- Takım çeliğinin karbon ve silisyum elementlerinin uygun oranlarda (azı karar-çoğu zarar) kullanılarak,
- Ayrıca bilerek ve isteyerek Manganez, %4'e kadar Tungsten, %3'e kadar Krom, %7'e kadar Nikel,
- *Pahalı olduğu için nadir olarak da Molibden katılabileceği,*
- *Yüksek fiyatları* ve alaşımlı çelik çeşitlerinin üretilmesindeki zorlukları *nedeniyle* takım çeliği imalatında *Titanyum ve Vanadyum kullanılamayacağı,*
- Esasen test amaçlı küçük ölçeklerde Titanyum ve Vanadyum içeren çeliklerin deneme imalatlarının yapıldığı,
- Titanyum'un çeliğe özel bir sertlik kazandırdığı,

- Vanadyumun çeliğe tenasite (tenacity) kazandırdığı [tenasite; tekstilde: ipin dayanıklılığı, sağlıkta: sıkıca tutunma yeteneği; yapışkanlık/AÜ]
- Piyasada bazı molibden çeliği, titanyum çeliği, vanadyum çeliği gibi İngiliz çelikleri adı altında bazı ürünler olduğu, ama tabii ki alınıp satılan bu çeliklerin adı verilen bileşenlerin hiçbirini içermedikleri [78].



Şekil 1.11. Otto Thallner, takım çeliği-özlü bir elkitabı, 1898 [78]

Krom (Cr) içeren bilinen ilk alaşımlı çeliğin bundan 160 yıl önce 1865 yılında üretildiğinden hareketle günümüzden 125 yıl önce daha çok karbon/krom ve sertlik ile sınırlı bir vizyonla o günün koşullarında Otto Thallner'in "kullanılamaz" dediği elementlerle bugün üstün özellikli çelikler yapmak mümkün olmuştur. Günümüzde C, Mn ve Si dışında sayıları 10'u bulan, hepsi birbirlerine alternatif elementlerle (Cr, Ni, Mo, Ti, W, Co, Nb vb.) çok sayıda farklı kombinasyon çıkarılabilmektedir.

Diğer Refrakter Metallerle karşılaştırıldığında Molibden ve Niyobyumun avantajları şöyle özetlenebilir:

- Niyobyum, yoğunluğu düşük olduğundan havacılık için gerekli malzeme uygulamalarına uygundur,
- Niyobyum, yüksek sıcaklıklarda süperiletkenlik özellikleri göstermeye devam eder,
- Niyobyum, tüm refrakter metaller içinde en yüksek sünekliğe sahip metaldir,
- Molibden, sahip olduğu yüksek elasik modulus sayesinde malzemeye üstün sertlik ve tokluk özelliği kazandırır,

- Yüksek ısı iletkenliği, düşük ısıl genleşme katsayısı ve düşük özgül ısı [specific heat, öz ısı ya da ısınma ısısı, C.G.S. birimleri sistemine göre bir maddenin 1 gramının sıcaklığını 1 C°, S.I. birimleri sistemine göre 1 kilogramının sıcaklığını 1 K° arttırmak için gerekli olan ısı enerjisi miktarı/AÜ] değeri dolayısıyla termal şok direnci ve yorulma direnci sağlar,
- Molibden çok çeşitli kimyasal ortamlarda kararlılığını (stability) muhafaza eder [79].

Tubitak tarafından yayınlanan bir çalışmada cerrahi implantlar, havacılık, otomotiv, enerji santrali malzemeleri gibi pek çok yaygın kullanımı olan alaşımlı çeliklerde kromla birlikte daha üstün mekanik özellikler elde etmek için Molibden katkısı anlatılarak kırılganlık özellikleri incelendiğinde çeliğe Vanadyum ve Molibdenin Kromdan daha olumlu katkı sağladığı bildirilmiştir [80].

Dünya maden endüstrisi tarafından her yıl üretilen tüm Molibdenlerin yaklaşık %80'i Demir-Çelik sektöründe Alaşımlama Elementi olarak kullanılmaktadır. Bu toplam oran şu şekilde dağılmaktadır (yaklaşık olarak):

%40 Alaşımlı Çeliklerde

%23 Paslanmaz Çeliklerde

%8 Takım Çeliklerinde

%8 Dökümcülükte

Molibdenin alaşım elementi olarak yaygın kullanımı, eşsiz metalurjik etkilerinden kaynaklanmaktadır. Molibden, demir ve çelik alaşımlarının sertleşebilirliğini artırmasıyla bilinir. Ayrıca alaşımda yeterli miktarda karbon bulunduğunda karbürleri oluşturur. Her iki etki de güçlü ve aşınmaya dayanıklı alaşımların üretilmesini sağlar. Bu nedenle, geleneksel olarak, birçok ısıl işlem görmüş çelik ve takım çeliğinin bir bileşenidir.1970'lerden sonra Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı (HSLA) çeliklerin kullanım motivasyonu verimlilik ile çalışma performansını artırmak ve üretimi kolaylaştırmak olurken Molibden, genellikle birbiriyle çelişen bu gereklilikler arasında köprü kurmada önemli bir alaşım elementidir.

Bir alaşıma eklenen molibden miktarı, HSLA çeliklerinde %0,1 gibi düşük bir orandan takım çeliklerinde yaklaşık %9'a kadar değişir. Belirli bir uygulamada ne kadar molibden ekleneceği kararı performans kazancı ve maliyet optimizasyonu dengesi dikkate alınarak

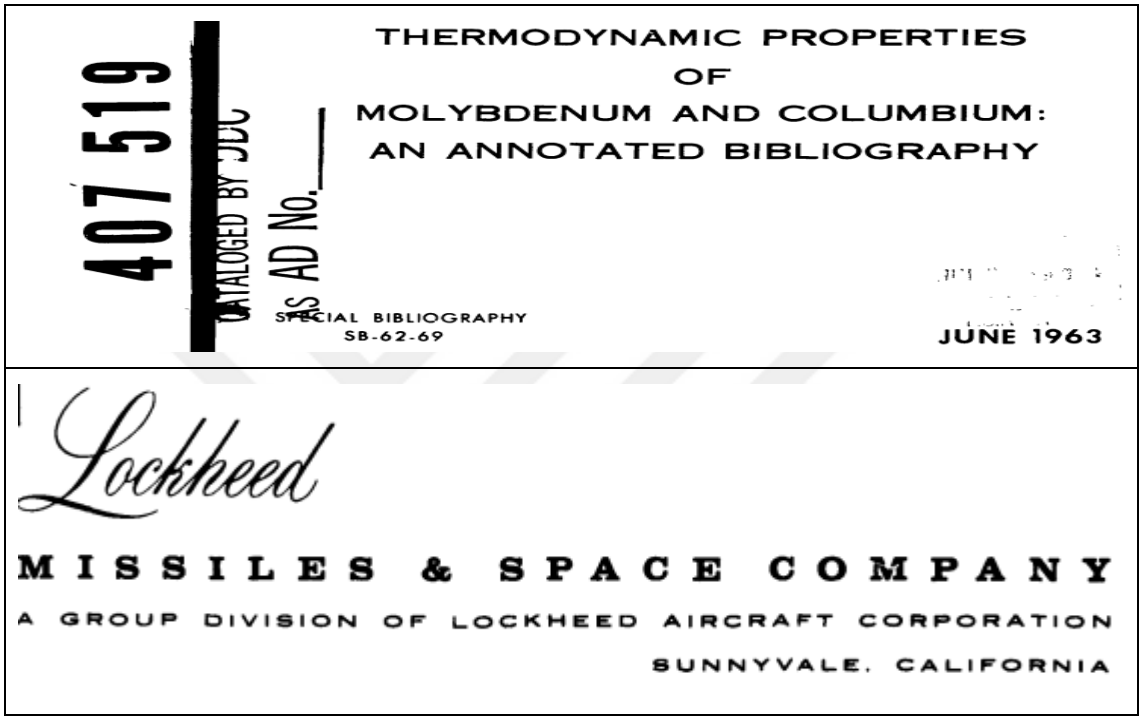
verilir. Az miktarda molibden ile çeliklerin sağlamlığı korunurken dayanım artırmada önemli bir kazanç sağlanır. Daha yüksek dayanımlı bir çelik kullanmanın mühendisler için faydası ise kullanılan çelik miktarını azaltarak daha hafif bir tasarım ile tasarruf sağlanmasıdır. Bu anlamda, bir çeliğe dayanımı artırmak için %0,1-%0,2 kadar az molibden eklemek tonlarca çelik tasarrufu ve sürdürülebilirlik sağlar [81].

Molibden, bulunduğu orta karbonlu alaşımlı martensitik çeliklerde ani soğutmadan kaynaklanabilme potansiyeli olan gevrekleşmeyi, dolayısıyla kırılganlığı önler. Ayrıca, sertleşebilirlik için sıradışı etki ve taneler arası kırılmaya karşı direncin yüksekliği gibi ek bir üstün özellik de deneylerle kanıtlanmıştır. Yüksek dayanım gerektiren çelik kalitelerindeki son yenilikler bilimsel olarak da kanıtlanan niyobyum ve molibden katkılarının olumlu metalurjik etkileri kullanılarak optimize edilebilir. Bu çeliklerde niyobyuma, güçlü tane inceltme etkisinin sertleşebilirliği azalttığı bilgisi ile tarihsel olarak kuşku ile yaklaşılırdı. Çelik kullanan sektörlerin çoğunda değişen ihtiyaçlar, tokluğun ön planda olduğu yeni nesil su verilmiş martensitik çeliklerde niyobyum ilavesi ile ciddi ilerlemeler sağlanmış olup %0,05 Nb ile olumlu sonuçlar alıabilir. Molibden ve Niyobyumun birlikte olduğu çeliklerde morfolojik fayda, özellikle katılaşmadan sonra uygulanan termomekanik işlemlerde (sıcak haddeleme veya dövme) görünür olmaktadır. Düşük karbonlu çeliklerde ise Bor ilavesi ile daha başarılı sonuçlar alınmaktadır. Niyobyum ve molibdenin toplam sinerjik etkisi, her birinin tek tek yaptıkları etkinin toplamından fazladır [82].

[Prof. Dr. Hardy Mohrbacher, Belçika Katholieke Universiteit Leuven'de kısmi zamanlı Yapısal Kompozitler ve Alaşımlar Anabilim Dalında akademisyen, IMOA Uluslararası Molibden Birliği'nin danışmanı, Molibden ve Niyobyum konusunda çok sayıda yayını bulunmaktadır. Yayınları: https://www.niobelcon.com/NiobelCon /publications/ AÜ]

Molibden, niyobyum ve sinerji kelimelerinin birlikte çokça geçtiği 2022 yılında tamamlanan bir başka yeni çalışmada özetle; bu iki metalin, bor elementinin de alaşımlama elemanı olarak ilavesiyle kazanımlar termodinamik, faz dönüşümleri kinetik olarak incelenmiştir. Mo-Nb ikilisinin mikroyapıya tane küçültücü etkisi ile sağlanan rafine doku sayesinde sertlik ve tokluk özelliklerinde artışların ultra dayanıklı çelik yapımına katkısı tespit edilmiştir. Denetimli haddeleme aşamasında başlayan fayda serisi, tavlama, su verme ve menevişlemede ısıl işlemlerde de devam ederek ürüne yansır [83].

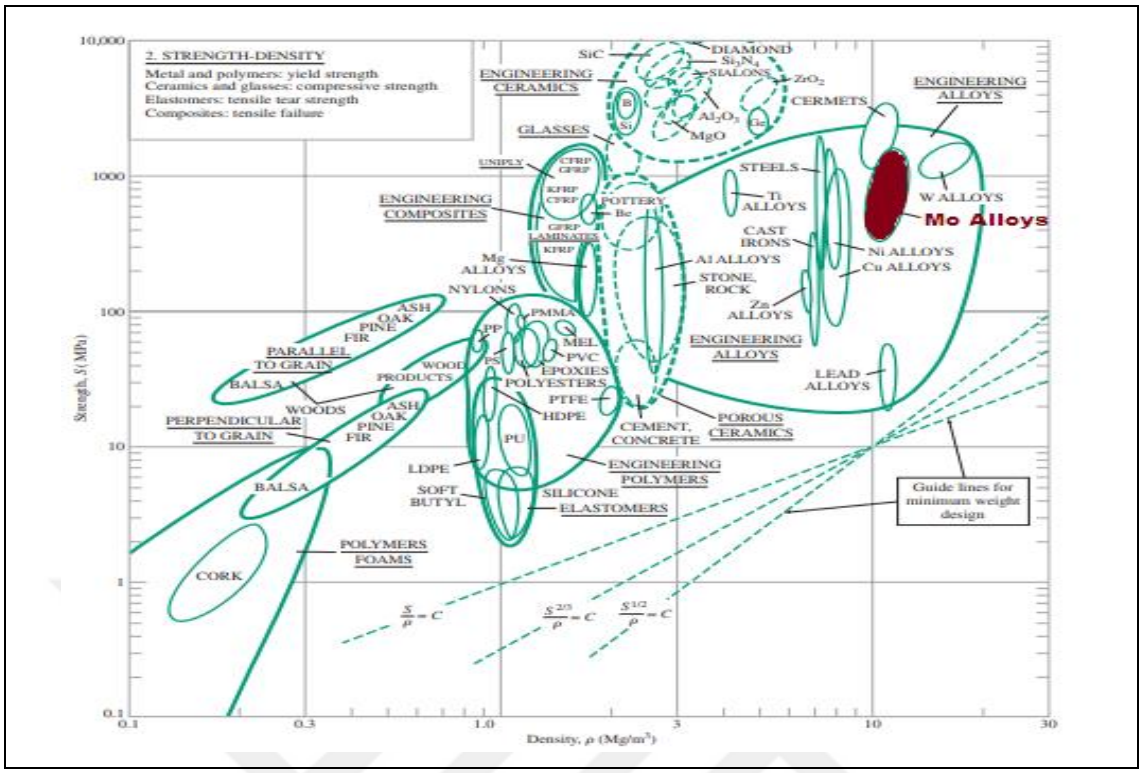
Keşfedildiği günlerden başlayarak Molibden ve Niobyum birlikte anılmış özellikle uzak ve havacılık endüstrisi için gözde elementler olarak üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Amerikan roket ve uçak firması Lockheed tarafından yayınlanan (1963) açıklamalı biyografide, **Şekil 1.12.** bu iki stratejik metal için 1924-1962 arasında yapılmış termodinamik, oluşum ısısı, aktivite, entropi, difüzyon kinetiği konularını kapsayan tüm araştırmalar listelenmiştir [84].



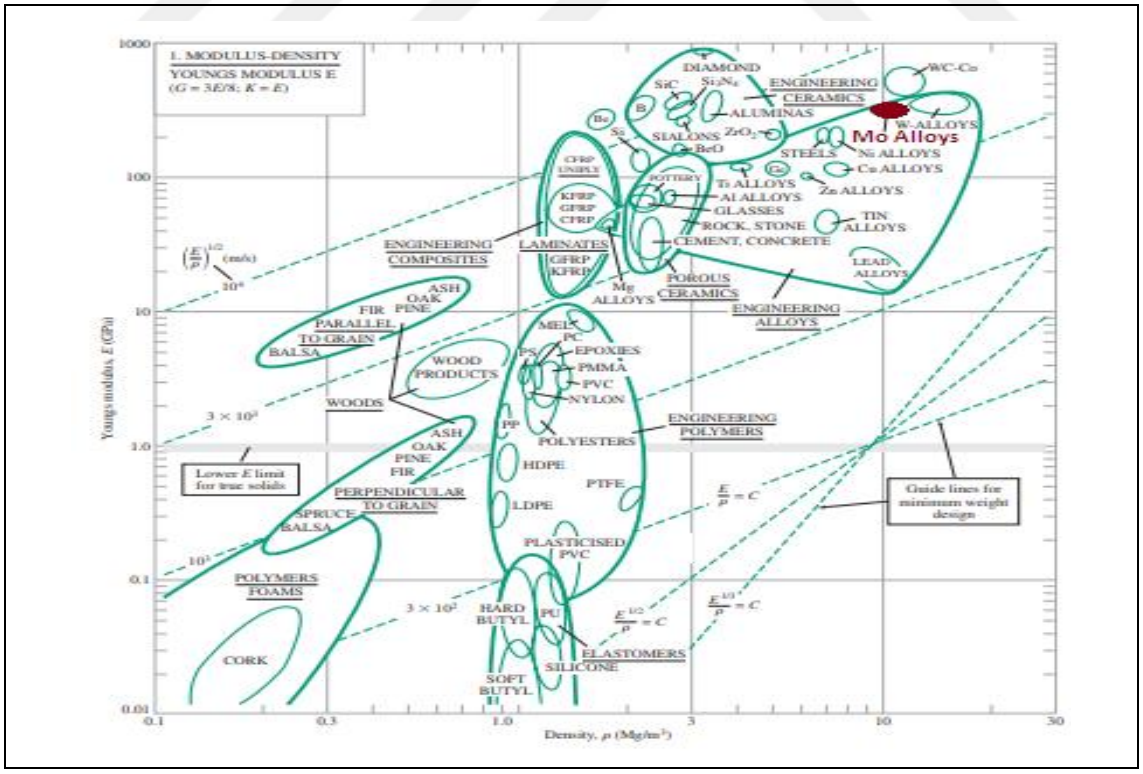
Şekil 1.12. Lockheed tarafından yayınlanan (1963) açıklamalı biyografi [84]

Mo ve Nb tek başlarına ama birarada daha güçlü olarak az miktarda kullanıldıklarında bile mikroyapıyı geliştiren ortak elementlerdir. Tane küçültücü ve çökelme sağlayıcı faydaları ile mekanik özelliklere katkıda bulunurlar. Oluşturdukları karbür ya da karbonitrürlerle, termomekanik işlemler safhasından başlayarak sertleşebilirlik artar [85].

Ashby diyagramlarında da molibden alaşımlarının yerleri aşağıda gösterilmektedir [86].



Şekil 1.13. Dayanım-yoğunluk ahsby diyagramında mo alaşımı [86]



Şekil 1.14. Elastisite modülü-yoğunluk ahsby diyagramında mo alaşımı [86]

1.5. Kalıp ve kalıpçılık ve Şekillendirme

Kalıp, birbirinin tamamen aynı olan, özdeş birden fazla parçayı, mekanik işleme olmaksızın kesme, bükme, eğme, çekme gibi yollarla şekillendirme işlemini tekrar eden şekilde yapan sistemin genel adıdır. Öyleyse kalıp ve kalıpçılık işlemlerinde "sürdürülebilirlik" sözkonusudur. İmalat mühendisliğinin geniş bir bölümü olan kalıp tasarımı, karmaşık ve büyüleyici bir konudur. Genel tasarımın, çok sayıda ve çeşitliliğe sahip hassas ilkelerinee titizlikle uyulması gereken alanlarından biridir.

Günümüzün pratik ve maliyet bilincine sahip dünyasında, birçok pahalı döküm, dövme ve işlenmiş ürün, yerlerini yassı metal parçalara çoktan bırakmış durumdalar. Bunun açık nedeni, kalıp baskı ürünü veya başka bir şekilde seri üretilen, ayrıca teknik ve estetik parametrelerinin daha çok kontrollerinin yapılabildiği ürünlerin göreceli olarak daha ucuz olduğudur. Dünya ağır, süslü ve karmaşık şekillerden yavaş yavaş uzaklaştı ve onların yerini işlevsel, basit ve bir mantık çerçevesinde oluşturulmuş biçimlerin alması eğilimi daha gözle görülür biçimde arttı. Süslü ayakları olan döküm küvetlerin yerini çoğunlukla kaplamalı yassı metalden yapılmış olanları ya da kimi zaman da plastikler aldı. Baskı kalıbı çok fazla sayıda parçayı, görünüm, kalite ve boyutsal doğruluk açısından tutarlı olarak üretebilen ideal bir araçtır. Metali kesebilir, bükebilir, derin-çekme (deep-drawing) yöntemi ile çekme herhangi bir çukur kap üretebilir, kabartma, basma, kenarlara son şeklini verme gibi akla gelebilecek en çılgın tasarım konseptlerine uygundur işler, kalıp sayesinde yapılabilir [87].

"Kalıp" kelimesi iki farklı şekilde kullanılabilecek çok genel bir kelimedir. İlki, genel anlamda kullanıldığında, tüm bileşenleri bir arada ele alındığında bütün bir "Baskı (pres) aleti" anlamına gelir. Daha sınırlı bir şekilde kullanıldığında ise baskı takımının zıt elemanı olan "zımba" adı verilen parça için de kullanılır.

Kalıp yapımı küçük ayrıntıların büyük bakış açılarıyla ele alınması ilkesiyle her bir yeni kalıp için özgün çalışma yapılmasını gerektiren imalat sanatıdır. İmalat sonucunda üretilen üründe kalite ve ekonomiden birlikte konuşabilmek için ilk yapılması gereken eylem planlamak ile başlar.

Performans ve ekonomiyi optimum bir noktada kesiştirmek amacıyla bir kalıp için temel gereklilikler şöyle sıralanabilir:

1. Uygun kalıp tasarımı,

2. Uygun malzemeler,

3. Doğru imalat; Mekanik işleme ve taşlama uygulamaları

4. Doğru ısıl işlem,

5. Uygun kurulum, kullanım ve bakım

Kalıp yapımı için de yukarıda listelenen birebir geçerli olsa da kalıpçılık kapsamı özelinde belirli bir uygulama için uygun bir kalıbın veya kalıp malzemesinin seçimini etkileyen faktörler şunları içerir:

1. Uygulanan yük, ortam sıcaklığı ve varsa kullanılan yağlayıcılar dahil olmak üzere gerçekleştirilecek bütün işlemler,
2. Üzerinde uygulama yapılacak iş parçasının sertliği, kalınlığı ve uygun olup olmadığı durumu ile iş parçasının boyutu da dahil olmak üzere tüm malzeme özellikleri,
3. Üretim hızı ve miktarı, buna ilişkin toleranslar ve teslimat ile ilgili bilgiler,
4. Tipi ve çalışma koşullarının uygunluk durumu da dahil olmak üzere kullanılacak pres veya makine,
5. Kalıp ve/veya takımın tasarımı,
6. Kurulumun doğruluğu ve sağlamlığı,
7. Malzeme, imalat, ısıl işlem ve bakım maliyetlerinin yanı sıra kalıp veya kalıbın ömrüne bağlı olarak üretilen parça başına maliyet,
8. Kalıp ve/veya takım malzemesinin temin ve tedariği ile ilgili veriler,
9. Aşınmaya, ısıya ve deformasyona karşı direnç, işlenebilirlik, ısıl işlem durumu ve taşlama dahil olmak üzere malzemenin özellikleri.

Farklı uygulamalar için amaca uygun karakter ve özelliklerde malzemenin seçilmesi, buna uygun ısıl işlem yapılması gerektiği açıktır. Yine de, alternatif malzemelerin, karşılaştırmalı olarak yapılacak değerlendirmelerin sonucu her zaman çözümü kesin ve keskin sınırlarda sağlamayabilir. Tedarikçi, imalatçı ve ısıl işlemci paydaşlarla konunun müzakere edilmesi önerilir. Çoğu durumda çözümler, birden fazla malzeme seçeneğini

işaret edebilir. Bu durumda yapılması gereken, optimum performansın en ekonomik sağlanması yönünde olmalıdır [88].

1.5.1. Kalıp Türleri

Üretilen malzemelerin nicelik ve nitelikleri göz önüne alınarak zımba kalıpları yüksek, orta veya düşük olarak sınıflandırılır.

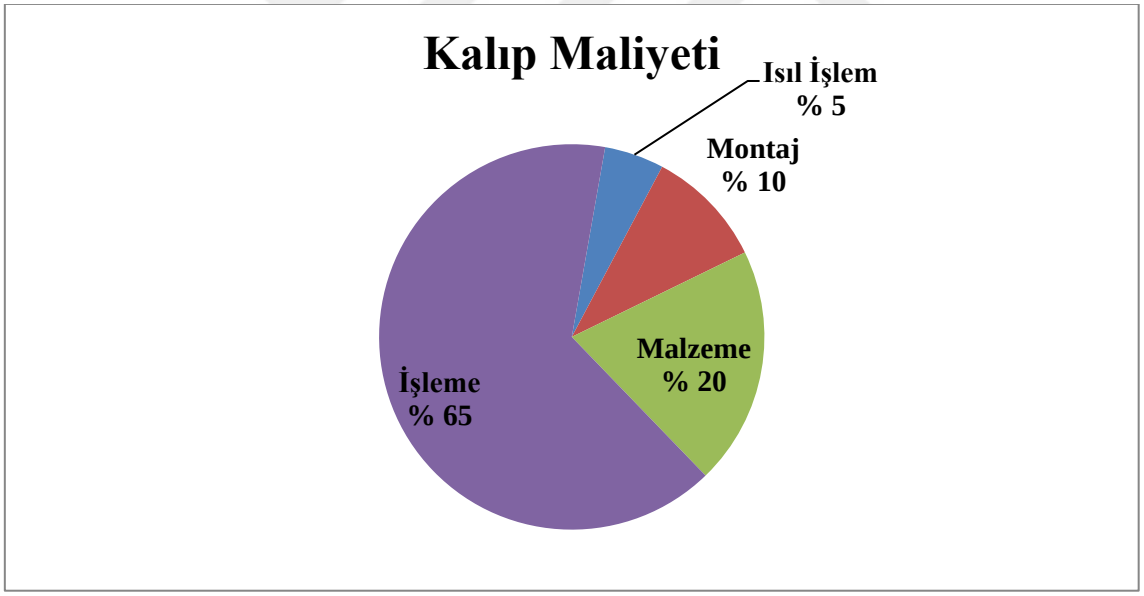
A Sınıfı: En iyi malzemelerin kullanıldığı bu grup yüksek miktarda üretim için kullanılır. Kolayca aşınabilecek tüm parçalar veya hassas bölümler kolayca değiştirilebilecek şekilde özenle tasarlanmalıdır. Kalıptan beklenen ömür, kalıp ömürü süresince olabildiğince aynı kalabilmesi ve bakım kolaylığı takım maliyetinden bağımsız olarak dikkate alınması gereken temel hususlardır.

B Sınıfı. Bu kalıplar, orta üretim miktarları için kullanılmakta ve yalnızca belirlenen miktarı üretmek için tasarlanmıştır. Toplam üretimle ilgili olarak kalıp maliyeti önemli bir konu haline gelir. Tam miktarı üretebilmeleri koşuluyla daha ucuz malzemeler kullanılabilir. Bakım kolaylığı sorununa daha az önem verilir.

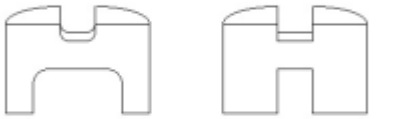
C Sınıfı. Bu kalıplar, yapılabilecek en ucuz kullanılabilir malzemeler kullanılarak imal edilir. Düşük hacimli parça üretimi için uygundurlar [89].

Takım çeliklerinin işlemesi; düşük güç tüketimi, düşük kesici takım aşınması ve iyi yüzey kalitesinin bir kombinasyonu olarak tanımlanır. Takım ömrü, ekonomik açıdan metal kesme ve işlemede önemli bir faktördür. İşlemenin genel amacı belirli bir hacimdeki malzemeyi mümkün olan en kısa sürede ve en yüksek oranda imal edebilmektir. Özellikle yeni yüksek performanslı takım çeliklerinden bazılarının işlenmesi zordur. Bu nedenle, buna uygun gelişmiş işleme operasyonları da tasarım aşamasında gözönüne alınmalıdır. İşleme süreci, yüksek enerji tüketimi, işleme sırasında bölgesel ısınma ve kesme takımının (kalemin) aşınması işleme operasyonlarının maliyetini etkiler. Takım çeliklerinin işlenebilirliğinde kimyasal bileşim, mikro yapı, inklüzyonlar ve termo-mekanik özellikler gibi birçok faktör rol oynar. Martensitik takım çeliklerinin işlenebilirliği esas olarak manganez sülfitler gibi metalik olmayan inklüzyonların miktarından ve çeliğin sertliğinden etkilenir. İşleme için optimum mikro yapı ise mümkün olduğu kadar düşük sertliğe sahip, yumuşak tavlanmış ferritik yapıda küreselleştirilmiş karbürler içeren homojen bir dağılımdır. Talaşlı imalatta tüketilen güç çoğunlukla keskin

kenarlarda ısıya dönüşür. Takım-iş parçası arayüzünde üretilen ısı, kesici takım ve yüzey kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Arayüzdeki yüksek sıcaklıklar, kesici takımın termal olarak yumuşamasına, takım ve iş malzemesi arasında kimyasal elementlerin yayılmasına, boyutsal doğruluğun kaybına ve kalıntı gerilmelere ve yüzey sertleşmesine neden olarak yüzey kalitesinin bozulmasına neden olur. Kesici takım ömrü, işlenebilirliğin önemli bir yönüdür ve işlenmiş yüzeyin kalitesini doğrudan etkiler. Kesici takımın aşınması ve kırılması, kötü yüzey kalitesi sonucunu doğurur ve boyutsal hassasiyetin bozulmasına neden olur. Uygulamada, daha uzun kesici takım ömrü, şekillendirme takımı üretiminde daha yüksek üretkenlik ile eş anlamlıdır. İşlemeden sonra, optimum bir akma mukavemeti, meneviş direnci, tokluk ve süneklik elde etmek için kalıp ısıl işleme tabi tutulmalıdır. Bir kalıp sertleştirildiğinde ve temperlendiğinde, 2normalde bir miktar bozulma meydana gelir. Sertleştirmeden önce kalıp üzerinde bir miktar işleme payı bırakarak, örneğin taşlama veya sert işleme ile sertleştirme ve menevişlemeden sonra kalıbın doğru boyutlara ayarlanması mümkündür [90].



Şekil 1.15. Kalıp maliyeti [91]

YAP	YAPMA	
		Keskin köşeler kullanmayın.
		Tüm iç keskin köşelerden kaçının.
		Ortak yerlerde stres oluşturabilecek keskin köşelerden kaçının.
		Bölgesel gruplar yerine uniform tasarım yapın.
		Keskin köşelerden sakının, yerine ekler kullanın

Şekil 1.16. Kalıp tasarımında temel kurallar [92]

Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı (TTGV) tarafından yapılan bir çalışmada sektörel sorunlar aşağıdaki gibi listelenmiştir:

1- Sektöre Giriş Maliyetlerinin Yüksek Olması:

Metal sektöründe piyasaya yeni girişimcilerin girememesi durumu, iç pazardamalzeme ve ürün fiyatların artmasına neden olmaktadır. Bu artış düşük fiyatlı ürün talep eden sektörleri yabancı firmaların ürünleri tercih etmesine sebep olmaktadır.

2- Bakım ve Onarım Problemleri:

Metalik malzemelerin uzun süreli kullanımında tek parça üretimin birçok farklı avantajının olmasının yanı sıra parçaların zarar görmesi durumunda bakım ve onarım maliyetlerinin yüksek olması, onarım aşamasında problemler olması yaşanan en büyük zorluklardandır.

3- Parça Geometrisinin Karmaşıklığı:

Parça geometrilerinden dolayı şekillendirme yöntemlerine başvurmak gerekmektedir.

Fakat parça geometrilerinin gelişmesi/karmaşıklaşması ile birlikte mevcut üretim teknolojileri içerisinde sorunlar oluşmaktadır.

4- Yerli Metal ve Toz Metal Üreticisinin Az Olması

Metal ve toz metal tedarikçi sayısının azlığı ve hammaddelerin ithal edilmesi ile tedarik sürelerinin uzaması ve pahalılığı müşteri taleplerinin zamanında yerine getirilememesine neden olabilmektedir. Özellikle eklemeli imalatta yerli toz metal üreticilerinin yok denecek kadar az olması en büyük sorunlardan biridir. Gelişen eklemeli imalat teknolojisinde toz metal malzeme üreticilerinin artması beklenmektedir [93].

1.5.2. İşleme/Şekillendirme

METAL İŞLEME, kütük, blum veya slab, önceden belirli bir amaç için döküm (solidification: katılaşma) veya Toz Metalurji (T/M) yoluyla elde edilmiş metal bir parçanın amaca hitap eden bir grup alet ve/veya kalıplar kullanılarak arzu edilen formun elde edilmesine yönelik plastik (kalıcı) deformasyon işlemlerinden oluşur.

Nihai geometriye ulaşmak için kullanılan malzemenin bütün fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyi bilinmesini gerektiren metal şekillendirme işlemleri için tatbik edilen metodolojilere göre farklı sınıflandırmalar yapılmaktadır: En temel sınıflandırmalardan biri; deforme edilecek iş parçasını oluşturan kimyasal kompozisyonun erime sıcaklığının yaklaşık 2/3'ü civarında ısıtılması veya ortam sıcaklığında yapılması esaslarına göre Sıcak ve Soğuk Şekillendirme işlemleri olabildiği gibi bazı özel durumlarda daha düşük sıcaklıklarda da ısıtarak şekillendirme işlemleri olabilir. Termomekanik şekillendirmede temel, dayanım ve sertlik arttıkça o malzemenin sünekliğinin azalacağına dayanır. Bu ise şekillendirmeyi zorlaştırır, giderek imkansızlaştırır. Süneklikten vazgeçmeden ya da denetimci bir yaklaşımla dayanıklılık parametrelerini arttırarak deformasyon yapılması sağlanabilir.

10.000 yıl öncesinde bakır ve altın işlemek için kullanılan bu teknolojinin ilkel metodları, Bakır Çağı, Bronz Çağı ve Demir Çağı gibi kendi dönemlerine adlarını vererek tarih boyunca el ile imalattan 13-14. yüzyıllardan itibaren ilk ilkel mekanik sistemlere doğru evrilmişler, 17-18. Yüzyıllarda Sanayi Devriminden itibaren bugünkü modern çeliğin temelleri atılmaya başlamıştır. Metal şekillendirme işlemleri genellikle iki ana kategoriye ayrılır:

1- Kütlesel Şekil verme

2- Sac Şekillendirme

Her iki işlem türünde de deforme olan metalin ve o metale şekil veren takım ile aletlerin yüzeyleri temas halindedir ve aralarındaki sürtünmenin karakteristiği malzeme akışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kütlesel Şekil Verme işlemlerinde, girdi malzemesi slab, blum, kütük, çubuk veya levha biçimindedir ve biçimlendirilmiş parçadaki yüzey-hacim oranı, büyük ölçüde sıkıştırma yüklemesinin etkisi altında önemli ölçüde artar. Öte yandan, bir sac levha parçasının çekme yükleri ile plastik olarak deforme edilerek üç boyutlu bir şekle dönüştürülmesi, genellikle sac kalınlığında veya yüzey özelliğinde önemli değişiklikler olmaksızın gerçekleşir [94].

Metalleri sıcak veya soğuk deformasyona maruz bırakarak ihtiyaç duyulan parçanın imalatı, endüstride en çok kullanılan mekanik şekillendirme üretim yöntemlerinden biridir. Temel prensipleri; esneterek gerilime maruz bırakmak, döverek sıkıştırmak veya ince sac metali keserek/delik açarak kesme gerilimi uygulamaya dayanır. Metallere uygulanan yükler altında davranış modellerinin tümü o malzemenin "mekanik özellikler" şemsiyesini oluşturur. Bu başlık altında ise; işlenebilme özellikleri, sertlik ve sertleşebilme, dayanım, elastik ve plastik davranışların nerede başlayıp bittiği, yorulma, aşınma ve kırılma hassasiyetleri, tokluk, süneklik gibi yük uygulandığında iş parçasının karşı koyma parametreleri bulunmaktadır. Malzemede üç tür gerilim ile karşılaşılır:

1- Sıkıştırma gerilimi,

2- Çekme gerilimi,

3- Kesme gerilimi.

Mekanik özellikleri açıklayan, uygulanan yük sonucu oluşan bu üç temel gerilime malzemenin karşı koyma biçimine ek yük/yükleme türleri ise bunların herhangi ikisinin birleşerek oluşturdukları burulma/burkulma veya yorulma gibi kombinasyonlardır [95].

1.5.3. Metal Şekillendirmede Soğuk İşlemler

Bazı istisnalar dışında genellikle ortam sıcaklığında yapılan plastik deformasyon işlemleridir. İstisna durumlarda ise malzemenin mukavemetini azaltmak ve sünekliğini arttırmak için yeniden kristalleşme sıcaklığını aşmamak üzere ısıtılabilir.

Sıcak İşlemlerle karşılaştırıldığında soğuk şekillendirmede sağlanan avantajlar şunlardır:

1- Isınma ile oluşabilecek tufal oluşumu olmayacağından daha iyi yüzey kalitesi ve ölçü denetimi elde edilir.

2- Isıtma gerekmediğinden enerji ekonomisi açısından tasarruf sağlar, ancak daha yüksek şekillendirme kuvveti gerektirir.

3- Daha denetlenebilir bir ortam sağlanır. Gereğinde makine-teçhizatın bakım ve onarımı ile sarf, bakım ve işletme malzemelerinin sökülüp takılması daha kolaydır.

Tablo 1.6. Temel metal şekillendirme işlemleri sınıflaması [96]

Sıkıştırarak	**Bükerek**	**Keserek**	**Çekerek**
Haddeleme	Açılı bükme	Kesme	Çubuk çekme
Dövme	Yuvarlak bükme	Dilme	Boru çekme
Boyutlandırma	Dikme	Körleme	Tel çekme
Ekstrüzyon	Flanşlama	Delme	Kıvırma
Perçinleme	Doğrultma	Kırpma	Kabartma
Paketleme		Ayırma	Kabuk Soyma
Zımbalama		Çentik açma	Ütüleme
Parlatma şekillendirme		Burkma	Y.Enerji
Kalıba alma			
Ovalama			

Pres makineleri ile imalatta dikkate alınması gereken başlıca hassas noktalar şunlardır:

1- Malzeme, yüzey kalitesi tasarıma uygun olmalıdır.

2- Kalıbın hareketli bölümü dayanıklı ve aşındığında kolayca değiştirilebilmelidir.

3- Bakım kolaylığı ve teknik emniyet sağlanmalıdır.

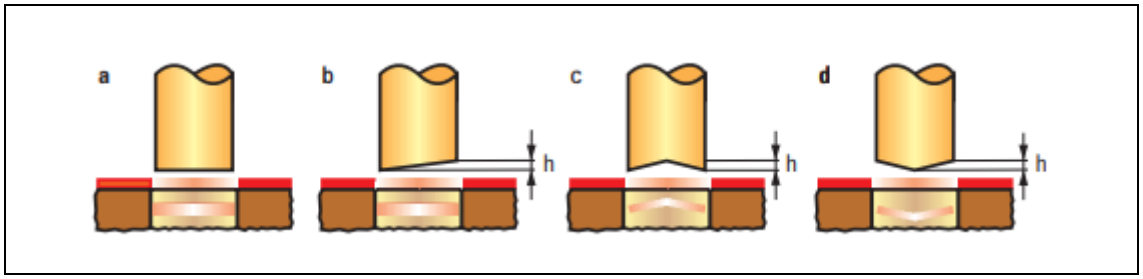
4- Kalıp, standart, az sayıda parça kullanılarak tasarlanmalıdır.

5- Hurda minimumda tutulmalıdır [97].

Soğuk Baskı ve Şekillendirme, Otomotiv ve yan sanayi başta olmak üzere beyaz eşya, savunma sanayi ve enerji sektöründe farkı uygulama alanlarında kullanılan en popüler metal şekillendirme uygulamalarındandır. Soğuk şekillendirmenin tercih edilmesindeki en önemli neden, yüksek hızda ve tutarlı bir üretim ortamı oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Bu ortam da maliyetleri azalttığı gibi daha verimli ve kaliteli malzeme üretimi sağlamaktadır [98].

ZIMBALAR Çok çeşitli yuvarlak, dikdörtgen ve kare delikler için standart zımbalar mevcuttur. Üreticiler bu zımbaları standart ölçülerde ve ayrıca özel siparişte sunmaktadır. Zımbaları tasarlarken göz önünde bulundurulması gereken ana hususlar şunlardır: 1) bükülmeyecek şekilde tasarlanmalıdırlar; 2) Sıyırma kuvvetine dayanacak kadar güçlü olmalı ve 3) Kesme eyleminin bir sonucu olarak dönememelidirler [99].

Zımba Yüzü Geometrisi Zımba ve kalıp yüzeyini açılı (eğimli) yaparak, kesilen alanı herhangi bir anda kontrol etmek mümkündür. Şekil 1.17'de, farklı zımba yüzü geometrileri gösterilmektedir: a) Düz alın yüzeyi, b) Eğimli yüzey, c) İçbükey yüzey ve d) Dışbükey yüzey [100].



Şekil 1.17. Zımba yüzü geometrileri: a) düz, b) içbükey, c) içbükey, ve d) dışbükey [100]

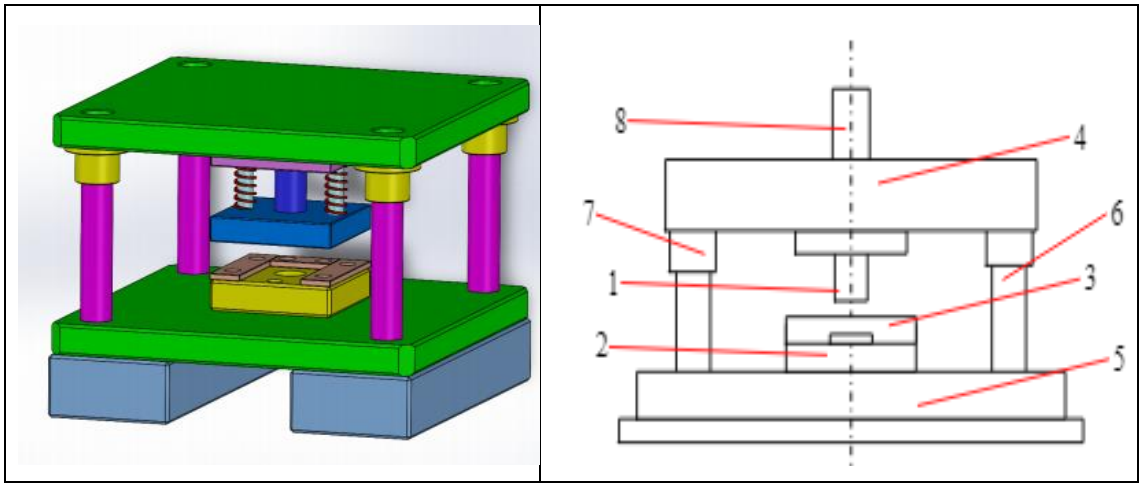
Erkek zımba ve dişi kalıp arasındaki açıklık tasarımın en önemli parametrelerinden biridir ve boşluk miktarı düzenleyen genel kurallar vardır. Boşluk miktarı, işlenen malzemenin cinsine ve kalınlığına göre değişir ve iş parçasının kalınlığının yüzdesi olarak ifade edilir. Yumuşak çelikler için %5–12'si arasında, yumuşak malzemeler; alüminyum, pirinç ve çekme kalitesinde soğuk haddelenmiş çelikler için %9–11 arasında, düşük karbonlu,

soğuk haddelenmiş ve sıcak haddelenmiş, asitlenmiş ve yağlanmış çeliklerle bakır ve sertleştirilmiş pirinç için %12 veya %3, yüksek karbonlu çelik ve tavlanmış paslanmaz çelikler için her tarafta %14 ile en iyi şekilde sonuçlar elde edilir.

Sertleştirilmiş malzemeler için, erkek zımba-dişi kalıp arası ek açıklık gerekli olabilir. Bir açıklık belirlendikten sonra, operasyonlar esnasında bunun muhafaza edilebileceği şekilde kalıbın tasarlanması kritik öneme sahiptir.

Kalıp boşluğu miktarını en iyi şekilde optimize etmek ve düzgün olmayan bir kırılmayı en aza indirmek için bazı denemeler gerektiren tecrübelerle kazanılır. Makul sınırlar dahilinde boşluğu arttırmak ve tatbik edilen pres basıncını azaltmak takım ömrünü uzatır, alet bileme gerektirmeden üretilen parça baskı sayısını artırır. Oluşması muhtemel çapağın yüksekliğinin ve şeklinin izin verilen boyut toleransları sınırları içinde olup olmadığı önemli bir faktördür [101].

Genel olarak çalışılan kalıp sistemleri, alt/üst, sabit/hareketli, erkek (zımba)/dişi (kalıp) ve pim, burç, klavuz, tutucu gibi yardıcı parçalarla birden fazla elemandan oluşmakta olan bir sistemdir. Kalıbın ana elemanları birbirlerine tam uyum sağlaması için erkek/dişi ya da alt/üst olduğuna bakılmaksızın tamamı aynı malzemeden yapılmaktadır. Aksi taktirde uyuşmazlık sorunları ile karşılaşılabilmektedir.



Şekil 1.18. Saç kesme presi ana parçalar [102]

Zımbalama işleminin çalışılan silisli sac malzeme üzerindeki etkisi birden çok ardışık aşamalarla gerçekleşir: İlk olarak, zımba metal sac ile temas ederek yuvarlanmasına

neden olur. Metalin kırılma kesme gerilimine ulaşana kadar sac üzerindeki yük artmaya devam eder. Zımbalamanın bu aşamasında, sünek kırılmaya kadar yük artar [103].

Sac metal şekillendirmede hassas ölçüler söz konusudur. Uygun bir tasarımla birlikte en az tasarım kadar önemli iyi ve kaliteli işçilik, uygun üretim metodolojisi ve denetimi ile doğru malzeme seçimi ürün kalitesindeki sürdürülebilirlik üzerinde büyük etkiye sahiptir

Standart bir zımbalama işleminde zımba presi, kalıp sisteminde bulunan zımbalar silisli sac metal üzerinde delikler oluşturmak üzere laminasyon üzerinde zımba elemanları aracılığıyla yük uygular. Zımbalama sırasında laminasyonu desteklemek için laminasyonun alt tarafında bir kalıp bulunur. Zımba ve kalıp yaklaşık aynı boyutladadır, birleştikleri kenarda kesmeye neden olur. Zımba ve kalıp arasındaki boşluk genellikle sac kalınlığının %2'si ile %10'u arasında değişir [104].

Zımbalama, sacın kalınlığı boyunca kesme gerilimi uygulayarak bir kalıp ve zımba kullanarak dikey olarak sacları delme veya kesme işlemidir. Sadece delik açmayla sınırlı olmayan zımbalama işlemi başka geometrik şekiller oluşturmak amacıyla da kullanılmaktadır. Kesme, zımba ile iş parçası sac kuvvetli yük altında temas ettiğinde temas bölgesinde derine doğru yayılarak "kırılma" ile sonuçlanacağı bilinen plastik deformasyon eylemidir. Eylemin kesme veya tam delme ile sonuçlanabilmesi için gerekli yük miktarı, sürtünme de göz önüne alınarak, sacın kesme dayanımının önemli oranda üzerinde olması gereklidir. Diğer alternatiflerle karşılaştırıldığında üretilen birim parça başına maliyet daha düşüktür. Bu nedenle de elektrik motorlarının çekirdeklerini oluşturan laminasyon saçlarını üretmenin en yaygın işlemidir [105].

Çok farklı ince sac metal şekillendirme işlemleri arasında, içerisindeki elemanlar arasında "zımba" (punch) bulunduran kalıp setlerinin, delme ve kesme işlemlerini, hassas ve toleranslara uygun, pürüzsüz, kenarları düzgün üretilmesinde verimli sonuçlara ulaşılmaktadır. Ekonomik olarak düşünüldüğünde ise; baskı işlemi bittikten sonra üretilen her bir tek ürün ayrı değerlendirildiğinde kesilen dış kenarların kalitesinin iyileştirilmesi için gerekli maliyet unsuru malzeme, işçilik ve süre gerektiren nihai işlemlerin olmaması arzu edilir.

Konvansiyenel aynı kapasiteye sahip preslerle karşılaştırıldığında kesme presleri kullanıcı kuruluşa yaklaşık iki kat fazlaya mal olabilir. Ayrıca, daha da seri çalışabilecek konvansiyonel presler için tasarlanan standart kalıpların maliyeti %70'e kadar varan

oranlarda daha az olabilileceği için daha ekonomik olacağı varsayılabilir. Buna rağmen uygulama düşünüldüğünde bu dezavantajlara rağmen önemli tasarruflar elde edilmektedir [106].

1.6. Tel Erozyon

Artarken nitelikleri de giderek farklılaşan mühendislik malzemeleri gereksinimlerimiz, teknolojideki gelişmelere paralel olarak bu malzemeler üzerinde çalışan imalat sektörü paydaşlarını da üretim metodolojilerinin de en az malzeme bilimindeki gelişmeler düzeyinde olabilmesi yönünde çalışmalara yönlendirdi. Üretimde hız, üründe ve serviste kalite artarken sanayide kullanılan ekipmanlara ait parçaların tamamında değilse de önemli bir kısmında "verim artışı" önemli bir vektör haline geldi.

Yüksek sertliklerde ve kompleks geometrilerle tasarlanmış işleme parçalarına ait boyutsal analizlerde milimetreden mikron, giderek nano, bunun sonucunda ise "daha hassas" kavramı başarı derecelendirmelerinde daha etkin olmaya başladı. Geleneksel yöntem fiziksel temasla mekanik işlemeler, yerlerini kimyasal enerji, elektrik enerjisi ya da yüksek sıcaklıklar kullanarak yeni nesil final şekil verme olarak geliştirilen ileri metodolojilere bıraktı. Elektro-Termal yöntem olarak da adlandırılacak teknolojiler geliştirildi.

Tel Erozyon, yüzey hassasiyetinin temel parametresi yüzey pürüzlülüğünü orta değerlerde sağlayabilen üretim teknikleri olarak bilinen talaşlı imalat işleme usullerine ait ek zaman ve maliyet unsurları taşlama ve parlatma da gerektiren ezberleri değiştirerek daha iyi değerlerde ve tam ölçü toleranslarına sahip hassas yüzey pürüzlülüğü kalitesi sağlayan makine, takım ve kalıp elemanları imalatında yeni nesil bir işleme metodu oldu.

EEİ (Elektro Erozyon İşleme) - Electrical Discharge Machining (EDM)

TEİ (Tel Erozyon İşleme) - Wire Electrical Discharge Machining (WEDM)

Geleneksel olmayan işleme yöntemleri içinde halen en yaygın olarak kullanılan yöntem EDM'dir. Endüstride bugün kullanılmakta olan tezgah sayısı göz önüne alındığında, geleneksel olmayan yöntemlerin içinde en ön sırada gelmekte, geleneksel yöntemlerle de karşılaştırma yapabilecek düzeydedir. Kalıpçılık endüstrisinde EDM yöntemi

kullanılmadan çağdaş bir endüstriyel üretimden söz etmek mümkün değildir. Halen EDM uygulamalarının yarısından çoğu kalıpçılık endüstrisinde, özellikle hassas kalıp yapımındadır.

Elektro Erozyon ile işleme, dielektrik bir sıvı içinde elektriksel iletken iki elektrot arasında ard arda oluşan çok sayıdaki elektriksel boşalımların (kıvılcımların) elektrotları aşındırması ilkesine dayanır.

Uygun elektriksel parametreler ve malzeme seçimi ile şekilli takım olarak kullanılan elektrot çok az aşınırken, iş parçası olan elektrot aşınarak işlenmiş olur. Böylece, şekilli takım elektrodun şeklinin dişisi iş malzemesine işlenir.

Aşındırma olayı, elektrot malzemesinin kıvılcım içinde yüksek sıcaklıklarda (10.000 ^{o}K) eriyip buharlaşması ve böylece malzeme yüzeylerinin küçük çukurcuklar (kraterler) ile kaplanmasıdır. Gerekli kıvılcım enerjisi, elektrodlar ile paralel bağlantılı bir elektrik devresi ile sağlanır. EDM tezgahlarında 4 ayrı bölüm görülür:

1- Kıvılcım Üretici

2- Dielektrik Devresi

3- Kıvılcım Aralığı Kontrol Ünitesi

4- Mekanik Ünite

Kullanıldığı yerlerin sektörlere göre yaklaşık dağılımı:

1- Kalıpçılıkta %50,

2- KOBİ modeli imalat yapan işyerlerinde %30

3- Havacılık endüstrisinde %10

4- Otomotivde %5

5- Diğer uygulamalarda %5 [107].

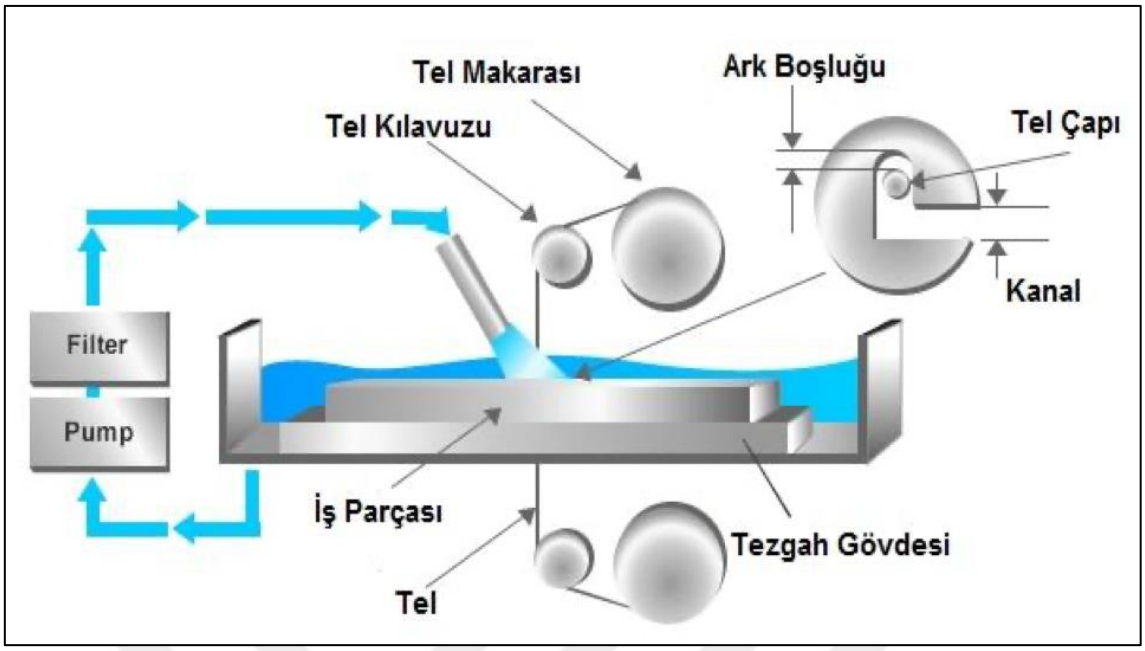
Tel Erozyonla İşlemenin Avantajları

- Elektrik iletkenliği özelliğine sahip her türlü malzeme sertlik değeri ne olursa olsun işlenebilmekte, ayrıca kalın malzemelerin (~200mm) ve karmaşık profillerin işlenebilmesine imkan sağlamaktadır.

- Talaş kaldırmak için takımın iş parçasına uyguladığı kuvvet hemen hemen sıfır olduğundan çok narin ve kırılgan parçalar bu metotla işlenebilir.
- Özellikle kalıp imalatında kullanımı yaygındır. Tezgah ve kesime bağlı olarak tolerans 0,01 mm ye inebilmektedir. Kesme boşluğu ise tel çapı ve aşındırma bölgesi (akıma bağlı tel yarıçapı) kadardır. Bu nedenle dişi ve erkek kalıp yapımında büyük kolaylık sağlar.
- Tel erozyon tezgahından çıkan imalatın taşlanması gerekmez.
- Çapaksız parça işlenebilmesi ve yüzük pürüzlülüğünün diğer imalat yöntemlerine göre az olması belli başlı avantajlarındandır.

Tel Erozyonla İşlemenin Dezavantajları

- Telin düşük talaş kaldırma hızına sahip olması ve kesici boyutunun sınırlı olması.
- İş parçasının kenarlarında çapak oluşmaz. Ancak birçok metalde yüzeyde ince ve sert bir tabaka oluşur bu da parçanın kullanma yerine göre avantaj veya dezavantaj oluşturabilir.
- Parça oda sıcaklığında gevrekleşmeye meyilli ise termal gerilmeler sonucu yüzeyinde kılcal çatlaklar oluşabilir. Bunun giderilebilmesi için işleme sonrasında diğer finiş işlemleri uygulanmalıdır [108].



Şekil 1.19. Tel erozyon mekanik işlemler şematik gösterimi [108]

Proses Kontrolu

Etki Faktörleri: İşlemlere etki eden parametreler aşağıdaki şekildedir.

Tablo 1.7. Tel erozyon kesme işlemini etkileyen faktörler

Parçası Parametreleri	**Tel Parametreleri**	**Elektriksel Parametreler**	**Elektrik Dışı Parametreler**
Kimyasal Özellikler Isıl İşlem Öyküsü Fiziksel Özellikler (Sertlik, Kalınlık)	Kimyasal Özellikler Fiziksel Özellikler (Çap, Boy) İlerleme Hızı Gerginlik	Akım Gerilim Vurum Süresi Vurum Bekleme süresi	Dielektrik İletkenliği Püskürtme Basıncı

Tel erozyon metoduyla geleneksel yöntemlere göre daha başarılı neticelerin alındığı başlıca uygulamalar:

1- Yüksek sertlikte makine elemanlarının işlenmesi,

2- Çok sayıda girinti ve çıkıntıları olan zor geometrili kalıpların işlenmesi

3- Tasarımı klasik yöntemlerle işlenemeyen küçük delikler gerektiren imalat uygulamaları,

4- Dar doğrusal kanallı imalat gerektiren mikro işleme,

5- Düzgün silindirik olamayan ya da açısal delik oluşturulması,

1.7. Elektrik Çelikleri

Enerji kavramının gündemin sürekli ilk sıralarında olduğu günümüz global ekosisteminde elektrik ile çalışan makinelerinin, verilen elektrik enerjisini bir "güç" kaynağı olarak "iş"e dönüştürmeleri sırasında kaçınılmaz olarak bazı kayıplar verilir. Bu kayıpları önlemek mümkün değilse de en aza indirmek ve elektrikli makinelerinin enerji verimliliğini etkili duruma getirebilmenin yolu da motor bileşenlerinin kayıp faktörlerini en aza indirmektir.

İmalat sanayinde motor, transformatör, jeneratör gibi elektrik ekipmanlarının önemi, gelişen teknolojiyle birlikte artmaktadır. Manyetik alanı yönlendirilmiş veya yönlendirilmemiş silisli sac, elektrik çeliği, ya da sadece "Silisli Sac" olarak adlandırılan soğuk haddelenmiş çelik ürünü sanayi ara malı laminasyon çeliği ise bu sektörün hammadde girdilerinde listenin ilk sıralarında bulunmaktadır.

Elektrik Çeliğine ait ilk buluş 1902'de Robert Hadfield tarafından önerilmiş, 1903'te patenti alınmıştır. Bundan 34 yıl sonra ikinci buluş 1934'te Norman Goss tarafından patenti alınarak 1935'te açıklandı. Esasen elektrik direnci ve elektromanyetik işlevsellik açısından %6,5 Silisyum içeren malzeme 7 kat yararlı gibi gözükse de pratikte bu sac çok sert ve kırılgan olduğundan endüstriyel uygulamalardsa genellikle %Si oranı en çok %3-4 mertebelerine kadar olması tercih edilmektedir. Yine de bazı özel amaçlar için %6,5 Silisyum içeren malzeme piyasada çok az miktarlarda pazar bulmaktaysa da fiyatı standart elektrik çeliklerine oranla hayli yüksektir [109].

Elektrik motorlarının imalatında kullanılan stator ve rotor laminasyon elemanlarının seri olarak çok sayıda üretimi, elektrik sacı olarak adlandırılmakta olan (0,50 mm kalınlığındaki) silisli sacların mekanik kesme (punching) ve sac paketlerin istiflenmesi (stacking) yöntemi ile yapılmaktadır [110].

Bir elektrik motoru için imal edilmesi gereken rotor-stator laminasyon paketlerinde kullanılacak elektrik çeliklerine karar verirken malzeme seçimi aşamalarında; en iyi tek

çözüm olmadığı, optimum kazanım için manyetik özellikler, mekanik özellikler ve maliyet bileşenleri üçgeni içinde karar verilmelidir. Rotor, doğrusal bir eksen üzerinde üst üste dizilmiş ince yüzeyli yalıtımlı laminasyonlardan meydana gelmektedir. Bu laminasyonlar için birden çok imalat yöntemi bulunmaktadır. Zımba/Kalıp seti ile pres makineleri ile sac şekillendirme var olan yöntemler arasında en yaygın kullanılmakta olanıdır. Silisli sac tercihinde kararı etkileyen faktörler şunlardır:

- Çeliğin Kimyasal bileşimi
- Tanelerin dizilimi
- Laminasyon kalınlığı
- Gerilmelerin etkisi
- Isıl işlemler
- İzolasyon [111].

Şekillendirme teknikleri şöyledir:

1- Mekanik Kesim (Zımba veya Giyotin Makas),

2- Lazer Kesim,

3- Tel Erozyon,

4- Su Jeti Kesim [112].

Motorlar, alternatörler, jeneratörler gibi elektrik makineleri uygulamalarında kullanılan laminasyon elemanlarının silis içeren elektrik çeliklerinden zımbalanması, mekanik kesilmesi veya lazerle kesilmesi ile üretilir. Kesilmiş kenara yakın manyetik malzeme esas olarak bu işlemlerden etkilenir. Delme, kesme, presleme gibi işlemler sonucu laminasyon saclarında, üretim parametrelerine bağlı olarak, manyetik özellikler önemli ölçüde değişebilir [113].

Düşük karbon içerikleri nedeniyle, bu malzemeler için daha uygun bir metalurjik isim "demir-silikon alaşımları" olacaktır. Bununla birlikte, "elektrik çelikleri" terimi, silikonun ana alaşım elementi olduğu yassı haddelenmiş manyetik malzemelerin tanımı olarak evrensel olarak kabul edilmişse de ‘Silisli Sac’ da denmektedir. Elektriksel ve manyetik

özellikleri dolayısıyla rotor-stator laminasyon paketleri lamine çekirdekler imalatı için kullanılmaktadır. Elektrik sacları motorda magnetik alan yaratmada en iyi verimin alındığı saclardır. Bir diğer deyişle kaybın en az olması arzu edilir.

Elektrik Çeliklerinin Sınıflandırması

1. Yönlendirilmemiş; Bunlar, manyetik özellikler olarak malzeme düzlemindeki mıknatıslanma yönü hemen hemen her durumda aynı olduğu elektrikli çeliklerdir. "Yönlendirilmemiş" terimi, bu malzemeleri, manyetik özelliklerin belirli bir yönünü veya yönlülüğünü yaratan işlemlerle üretilenlerden ayırmak için kullanılır.
2. Yönlendirilmiş; Bu terim, haddeleme yönüne göre güçlü bir şekilde yönlendirilmiş manyetik özelliklere sahip elektrikli çelikleri belirtmek için kullanılır. Bir haddeleme ve tavlama işlemiyle, manyetik özelliklerin haddeleme yönünde çok daha üstün olması için tanelerin hizalandığı bir metalik kristal yapıya sahip uygun bileşime sahip alaşımlardır
3. Tam işlenmiş; Manyetik özellikleri tamamen çelik üreticisi tarafından geliştirilen elektrik çelikleridir. Adını, malzemelerin istenilen manyetik kaliteyi elde etmek için herhangi bir ek işlem gerektirmeden tamamen işlenmiş, kullanıma hazır olmasından almaktadır. Bununla birlikte, işlemlerden kaynaklanan magnetik değişiklileri düzenlemek ve verim kaybını azaltmak veya ortadan kaldırmak için kullanıcı tarafından düşük sıcaklıkta ilave bir ısıl işlem yapılabilir.
4. Yarı İşlenmiş; Bu elektrik çelikleri, üretici tarafından nihai kalınlık ve levha veya bobin olarak üretildikten sonra manyetik özelliklerin modifikasyonu için tavlanmaz. Bu malzemelerin gerekli ısıl işlemleri ile manyetik özelliklerin elde edilmesi kullanıcının sorumluluğundadır.

Silikonlu çelikler karbon çeliklerine benzer Yüksek Fırın veya Elektrik Ark Ocağında ergitme, arıtma, vakum, döküm (katılaşma) ile ayrı ayrı sıcak ve soğuk haddeleme olarak termomekanik şekil verme işlemleriyle üretilir. Ancak kendine özgü imalat kuralları da vardır [114].

Tablo 1.8. Elektrik çeliklerinin tipik kimyasal bileşimleri [115]

Malzeme	**%C**	**%Mn**	**%P**	**%S**	**%Si**
Düşük Silikon Steel	0.003	0.15	0.03	0.001	1.6
Orta Silikon Steel	0.003	0.15	0.01	0.001	2.0
Yüksek Silikon	0.003	0.15	0.01	0.001	2.7
Yönlendirilmiş	0.003	0.07	0.01	0.001	3.1

Tane yönlendirilmemiş saclar sıklıkla jeneratör, elektrik motorunun rotor-statorlarında kullanılırken tane yönlendirilmiş elektrik sacları daha çok transformatör imalatında kullanılmaktadır [116].

Elektrik sacları için ülkemizde Avrupa ile aynı standartlar kullanılmaktadır:

TS EN 10341 (2007), Soğuk haddelenmiş sac ve şerit. Yarı işlenmiş durumda teslim edilen, alaşımsız ve alaşımlı elektrik çeliğinden.

TS EN 10106 (2018), Çelik yassı mamuller. Tam işlenmiş durumda teslim edilen soğuk haddelendirilerek *yönlendirilmemiş* taneli elektrik çeliğinden levha, bant ve şeritler. (Kalınlıklar: 0,35 mm, 0.50 mm, 0,65 mm ve 1,0 mm)

TS EN 10107 (2014), Çelik yassı mamüller. Konvansiyenel ve yüksek geçirgenlie sahip olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Tam işlenmiş durumda teslim edilen *yönlendirilmiş* taneli elektrik çeliğinden levha, bant ve şeritler. (Kalınlıklar: 0,23 mm, 0.27 mm, 0,30 mm ve 0,35 mm)

Elektrik saçları için yurtdışı alım-satımlarda kullanılmakta olan standartlar ise şunlardır:

ASTM A840 Laminasyon çelikleri,

ASTM A876 ve A876M *Yönlendirilmiş* elektriksel çelikler,

ASTM A726-05 Soğuk Haddelenmiş Yarı İşlenmiş Manyetik Laminasyon Çelikleri,

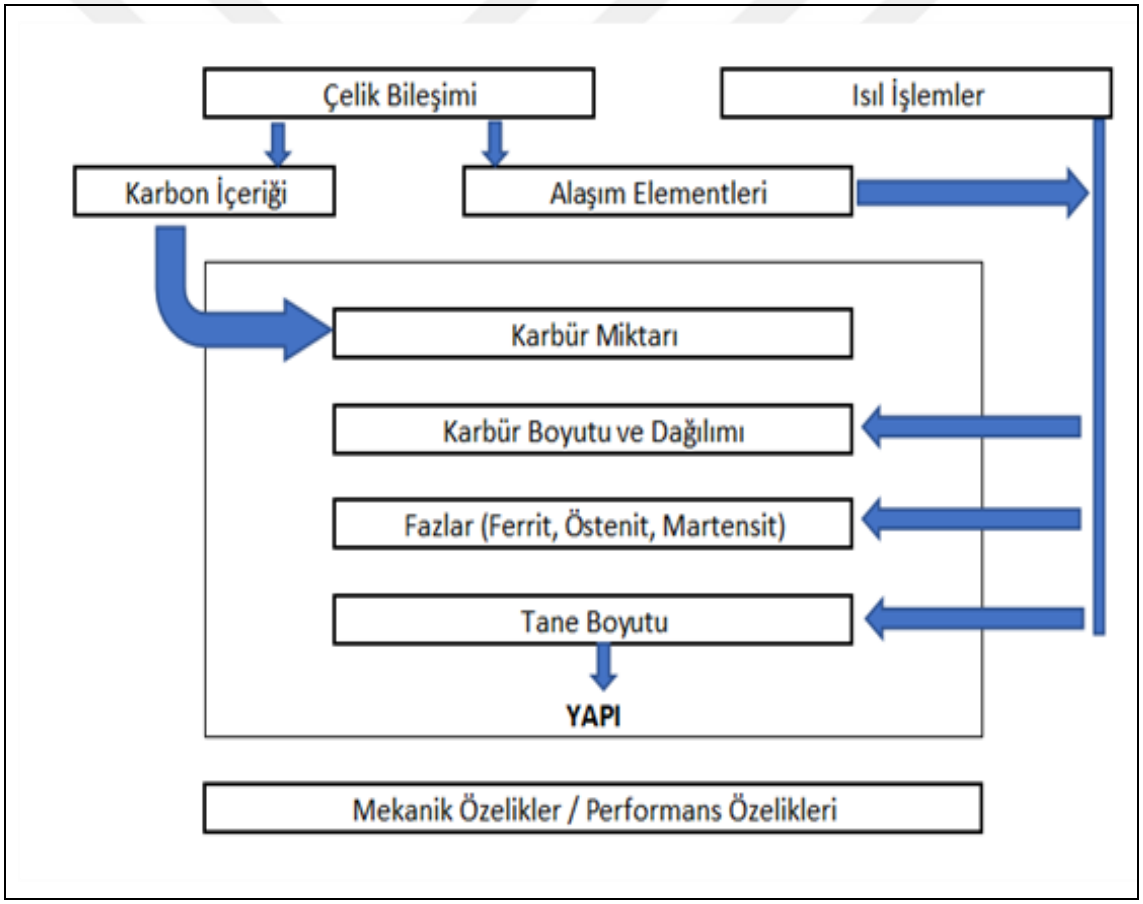
ASTM A677-07 ve A677M Tamamen İşlenmiş *Yönlendirilmemiş* Elektrik Çelikleri

ASTM A683-05 ve A683M *Yönlendirilmemiş* Elektrik Çelikleri, Yarı İşlenmiş

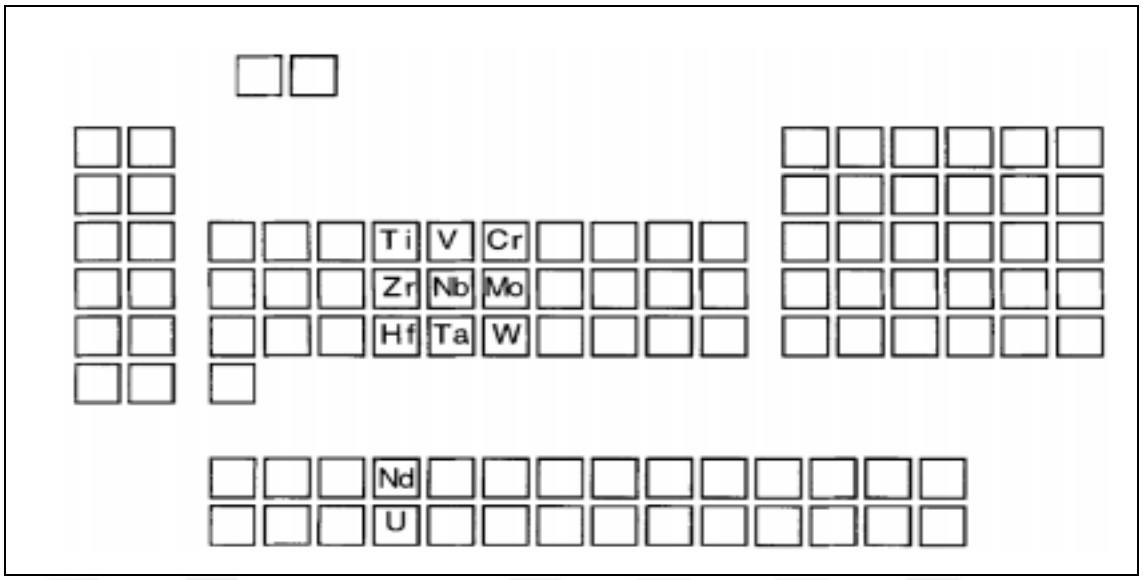
ASTM A876-09 Yassı Haddelenmiş, *yönlendirilmiş* elektrik Çelikleri, Tam İşlenmiş

1.8. Karbürler ve Segregasyon

Mekanik özellikler ile mikroyapı, mikroyapı ile kimyasal bileşim arasında doğrudan ilişki olduğu kesin olarak bilinmektedir. Isıl işlemler dizisi ile bunun daha da denetimli olmasına çalışılmaktadır. Kesme ve şekillendirme işlemlerinde çoğunlukla Karbon-Krom ikilisinin oluşturduğu çelikler kullanılmaktadır. Bunlardan herhangi birinin, ya da ikisinin aynı anda yüksek olması ile oluşan karbür içeriği sertlik ve aşınmalara karşı dayanıklılık sağlarken tokluk açısından düşük dayanıklılık özelliğinde aynı ya da benzer performans görülemez. Bunun önüne geçmek için uygulanabilecek bir dizi ısıl işlem protokolleri yardımıyla sert karbür parçacıklarının içerisinde bulundukları matris içerisindeki karşılıklı etkileşimlerinin kontrol edilmesi ile performans arttırılması sağlanabilir.



Şekil 1.20. Karbür-yapı-özellik ilişkisi [117]



Şekil 1.21. Periyodik tabloda kuvvetli karbür oluşturan elementlerin konumları [118]

Geçiş metalleri tarafından oluşturulan çok sayıda karbür kombinasyonunu kristal yapıları ile var olan elementlerin miktarları esas alınarak elektron dizilişleri ve birbirlerine hangi tür bağlarla (kovalent, iyonik, metalik) bağlanma biçimleri ile kararlılık arasında ilişki vardır. Periyodik tabloda Ti, Zr ve Hf güçlü karbür yapıcılardır. Elementin karbona affinitesi sağa gittikçe azalır. Cr, Mo ve W elementleini karbon ile birleşerek oluşturdukları karbürler göreceli olarak daha az kararlıdırlar. Karbür oluşturmak için metalin elektron yapısının karbon atomlarını kabule hazır olması gereklidir. Titanyum örneğinde son yörüngeden 4 elektron feda ederek TiC oluşabir. Titanyumun sağındaki Vanadyum örneğinde, münferit hem Vanadyum-Vanadyum, hem de Vanadyum-Karbon bağlarındaki son yörüngedeki elektronlar birbirlerini iterler, bu ise TiC ile karşılaştırıldığında VC'nin kararlılığında bir azalmaya yol açar [119].

Karbürlerin miktar ve türü, çelikteki karbon içeriğine ve karbür oluşturan elementlerin (örneğin krom, molibden, vanadyum ve tungsten) miktarına bağlıdır. Yalın Karbon çelikleriyle düşük alaşımlı çeliklerde karbür, sementit (Fe_3C) olarak bulunurken yüksek alaşımlı kalitelerde daha karmaşık karbür türleri bulunur. Karbürlerin sertliği, bileşimlerine göre değişir; saf Fe_3C için sertlik yaklaşık 800 HV (64 HRC) iken karbonun demir yerine krom gibi diğer elementler ile birleşerek oluşturduğu karbürlerde yaklaşık 1400 HV'ye (76 HRC) kadar çıkabilir. Isıl işlemlerden sonra takım çeliklerinin yüksek aşınma direnci, başta martensit olmak üzere matrisin sertliğine ve matriste çözünmemiş halde kalan karbürlerin miktarına ve türüne bağlıdır. Tavlanmış takım çeliklerinde

tungsten, molibden veya vanadyum içeriği çok düşük ve krom içeriği nispeten düşük olurken, manganez içeriği yüksek olabilir. Sementit, tüm karbon takım çeliklerinde ve 538^0C'nin (1000 ^{0}F) altında su verilmiş ve temperlenmiş alaşımlı takım çeliklerinde bulunur. M_7C_3, orta ve yüksek krom içeriğine sahip çeliklerde ve yalnızca makul miktarlarda diğer karbür oluşturucu alaşım elementlerinde gözlenen, krom açısından zengin bir karbürdür. Sertleştirme işlemi sırasında östenit içinde çok yavaş çözünür. Bu karbür, tavlanmış veya yüksek derecede temperlenmiş koşullarda yüksek hız çeliklerinde D tipi soğuk iş kalitelerinde bulunur. $M_{23}C_6$, demir için yüksek çözünürlüğe sahip, ancak molibden veya tungsten gibi diğer güçlü karbür oluşturucular için çok daha az çözünürlüğe sahip krom açısından, M_2C ve M_6C ise (Fe_4Mo_2C ve Fe_3Mo_3C gibi) bir molibden açısından zengin bir karbürdür. MC ise vanadyum açısından zengin bir karbürdür. Titanyum, niyobyum, tantal ve zirkonyum gibi diğer güçlü karbür oluşturan elementler, MC karbürler oluşturabilir, ancak bu elementler takım çeliklerinde yaygın değildir. MC, orta ila yüksek vanadyum içeriğine sahip çeliklerde, özellikle yüksek hızlı takım çeliklerinde gözlenir. Çok güçlü bağlara sahiptir ve en sert karbürdür. Östenizasyon sırasında çözünmeye karşı direnç gösterir. Takım çeliklerinde bulunan karbürlerin miktarı tavlanmış durumda östenitleme ve su verme sonrasına göre daha fazladır, çünkü karbürler östenite yüksek sertlik seviyeleri elde etmek için gerekli karbonu sağlar. Elde edilen karbürlerin tipi de kimyasal bileşimin bir fonksiyonu olarak değişir [120].

Karbürlerin fiziksel ve kimyasal yapıları ve bunların matris içerisinde nasıl dağıldıkları çeliğin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Karbon ile birlikte ısıl işleme de bağlı olarak **Elementel Metal** simgesi **M** olarak; MC, M_2C, M_3C_2, M_5C_2, M_7C_3, M_6C ve $M_{23}C_6$ olmak üzere yedi tip karbür bulunabilir. Bunlardan çoğunun morfolojisi genellikle küreseldir.

M_2C, Molibden (Mo) bakımından zengindir ve çubuğa benzer parçacıklar kümesi oluşturan iğnemsi bir şekle sahiptir. M_7C_3 ise Cr açısından zengindir, tane sınırlarında geniş bir ağ olarak bulunur, dağılarak sertliği artırır ve oksidasyon olayını önler. M_6C, Demir (Fe) ve Molibden (Mo) açısından zengin olup parça göreceli olarak daha hızlı soğuduğundan dış yüzeylere yakın bulunurlar. Oysa diğer karbür türleri parçanın ortası dahil her yerinde bulunur.

$M_{23}C_6$, matris içinde tamamen dağılmış Krom (Cr) açısından zengin ince ikincil karbürlerdir. MC sertliği ve aşınma dayanımını arttırır, Molibden tarafından oluşturulan M_2C menevişleme sırasında ikincil sertleşmenin oluşumunu azaltır. ikincil sertleşmenin oluşumunu azaltır. $M_{23}C_6$ ise menevişleme sırasında matriste çökelen extra ince yapısı yardımıyla gerilme direncini arttırır [121].

Takım çeliklerinde, su verme ve sonrasında menevişleme sırasınada nedeniyle oluşumu sırasında matriste karbürlerin çökelmesi birincil öneme sahiptir.

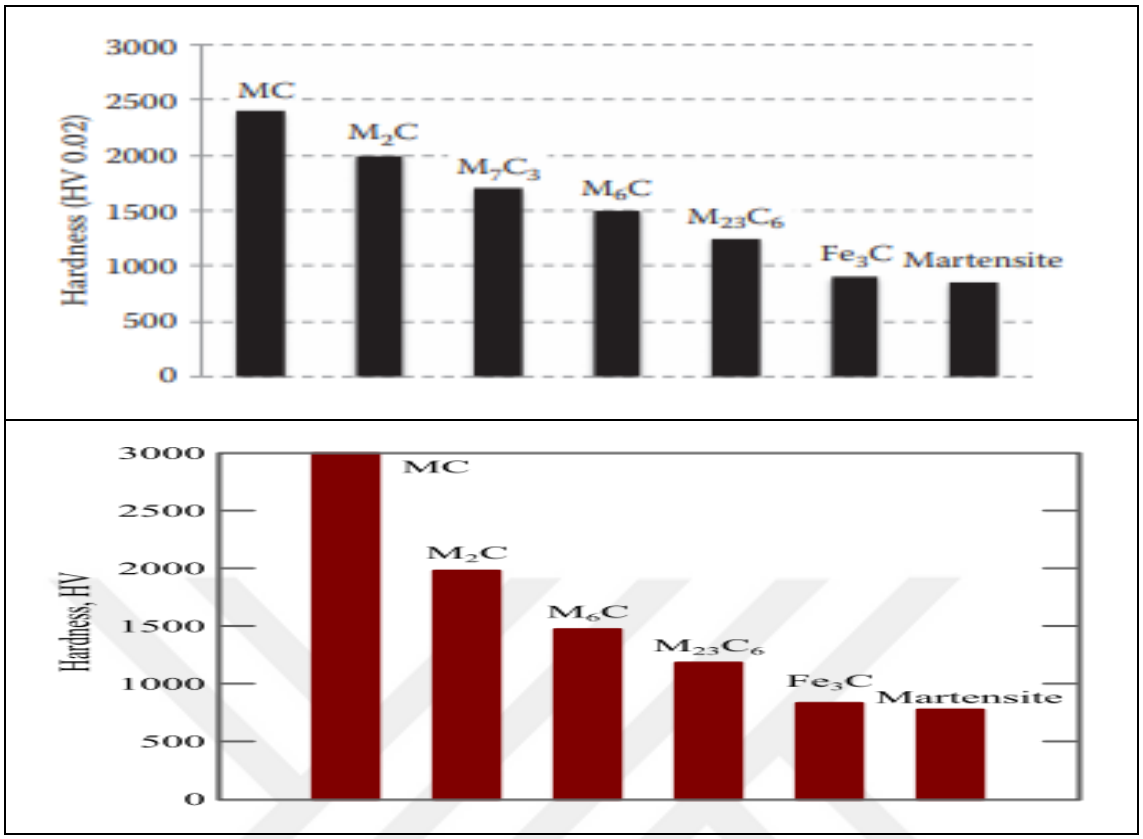
Çelik içinde M_2C, M_3C,M_6C, M_7C_3, $M_{23}C_6$ gibi kararlılık seviyeleri farklı karbürler oluşabilir.

Bu karbürler menevişleme kinetiğine göre kaç derecede ve o sıcaklıkta malzemenin ne kadar süre kaldığına bağlı olarak farklı karakterlerdedir. Boyutları, şekilleri ve hacimsel oranlarına bağlı olarak ikincil sertleşme sağlayarak mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlayan doğrudan bir etkiye sahiptir. Varılmak istenen amaca uygun olarak uygulanacak ısıl işlem protokolü, karbür çökelmesini kontrol eder [122].

Karbürlerin karşılaştırmalı sertlikleri ile ilgili literatürde bulunan 1980 tarihli ve araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılan eski bir çalışma şekil 1.22'dedir. Burada altı karbürün şematik sertlik gösterimi vardır. O yıllara dek olan teknik bilgilerle M_7C_3 dahil edilmemiştir [123].

Daha sonraki bilimsel çalışmalarla bu grafik güncellenmiş ve şekil 1.22 halini almıştır [124].

M_7C_3 karbürünün eklenmesine çalışmalarıyla ve makaleleriyle katkı sağlayan değerli bilim insanlarından biri de Kocaeli ve Marmara üniversiteleinde görev yapmış olan merhum Prof. Dr. Şadi Karagöz'dür. (ö. 2011)



Şekil 1.22. Karbürlerin karşılaştırmalı sertlikleri-Yeni (2017), ve eski (1980)

1.8.1. Karbürlerin Genel Özellikleri

M_3C Ortorombik yapıda (a≠b≠c ve tüm açıları 90°/AÜ), sementit (Fe_3C) tipi bir karbürdür, genellikle Fe, Mn, Cr ile bulunsa da W, Mo, V karbürler de görülmektedir.

M_7C_3 Altıgen yapıda olup çoğunlukla Cr alaşımlı çeliklerde bulunur. Sert, yüksek sıcaklıklarda çözünmeye ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Bu nedenle yüksek hız çeliklerinin vazgeçilmez elementlerinden biridir.

$M_{23}C_6$ Yüzey merkezli kübik yapıdadır, yüksek kromlu çeliklerde ve tüm yüksek hız çeliklerinde bulunur. Fe, Cr, W ve Mo ile karbür kombinasyonları oluşturur.

M6C Yüzey merkezli kübik yapılı, W veya Mo açısından zengin bir karbürdür. Orta miktarda Cr, V, Co içerebilir. Tüm yüksek hız çeliklerinde bulunur. Aşınmaya karşı son derece dayanıklıdır.

M_2C Altıgen yapısı ile W ve Mo açısından zengin karbür oluşumudur.

MC Yüzey merkezli kübik yapıda ve V açısından zengin bir karbür tipi olup zor çözünür [125].

Tablo 1.9. Karbürlerin genel özellikleri [126]

Karbür Tipi	Sertlik (HRC)	Yaygın Element
M_3C	70	Fe, Mn, Cr
$M_{23}C_6$	73	Cr
M_6C	75	Fe, Mo, W
M_7C_3	79	Cr
M_2C	79	W, Mo
MC	84	V

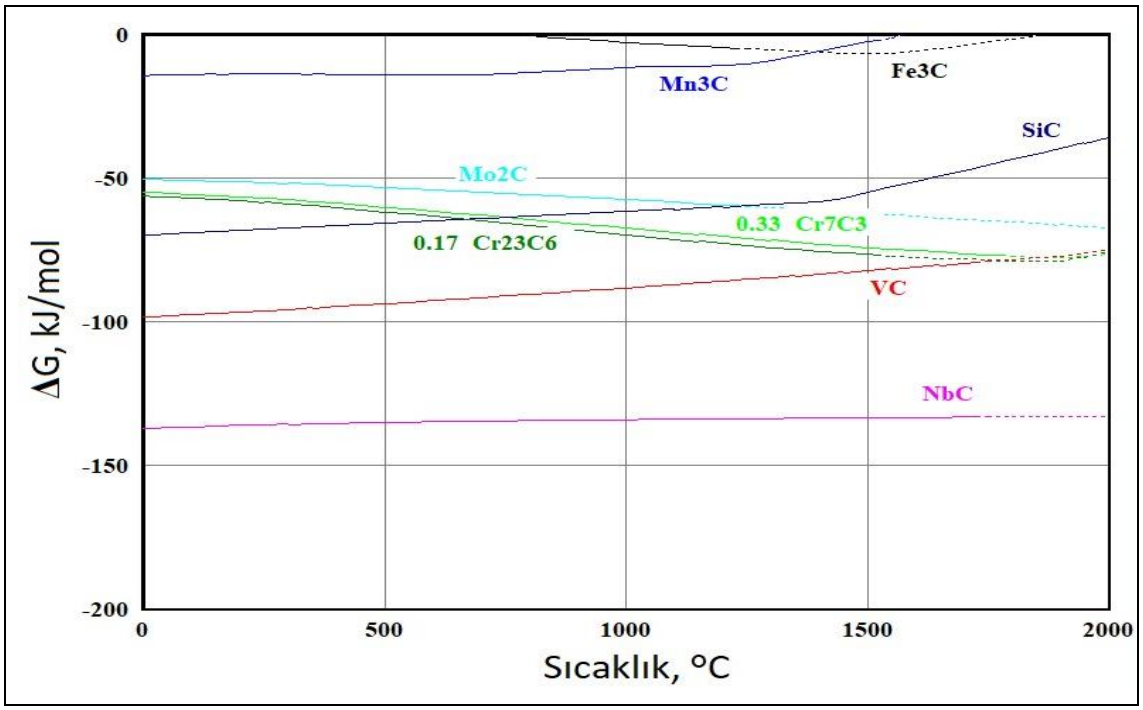
Görüntü analizleri ile karbür morfolojisini yorumlamak ve oluşan karbür tipini ayırt etmek kolay değildir. Her bir karbür tipi farklı kimyasal bileşime sahip olduğundan takım çeliklerindeki karbür tipi, EDS analizi ve kantitatif analizi ile belirlenebilir. Literatürde kullanılan ölçütler kısaca şöyle özetlenebilir:

- V veya Nb'ye karşılık gelen tek bir yüksek tepe noktasına sahip spektrum, MC karbürdür
- M_7C_3, Cr pikinin Fe pikinden daha yüksek olması veya tersi ile ayırt edilir
- $M_{23}C_6$, yüksek Cr pikleri ve Fe'nin başka bir yüksek pikiyle ayırt edilir veya Fe/Cr oranı yaklaşık 1'dir
- M_6C, yüksek bir Mo veya W zirvesine ve yüksek bir Fe zirvesine sahip bir spektruma sahiptir
- M_3C, yüksek bir Fe zirvesine ve/veya yüksek bir Cr zirvesine sahip bir spektruma sahiptir
- M_2C, yüksek bir Mo veya W zirvesine sahiptir, ancak M_6C'den Fe'nin küçük zirvesi olmadığında ve önemli V ve Cr zirvelerinin varlığı ile ayırt edilir [127].

Oluşan karbür tipi, alaşımlama elementlerine ve bunların miktarına bağlıdır. Malzemenin sertlik artışına etki ise karbürlerin hacimsel oranına, boyut ve dağılımına bağlıdır [128].

Hanoi Üniversitesinde yapılan bir çalışmada; %12 Krom içeren Beyaz Dökme Demirde östenit matris içinde bulunan kaba taneli M_7C_3 karbürlerin bir kısmının uygun ısıl işlemlerle Martensit fazı içinde ultra küçük taneli ikincil $M_{23}C_6$ karbürlere dönüşerek sertlik değerinin 48 HRC'den 62 HRC'ye çıktığı, mekanik özelliklerde ise yüksek aşınma direnci ile yüksek tokluk sağladığı tespit edilmiştir [129].

Şekil 1.23 Ellingham Diyagramında elementlerin karbür oluşumları gösterilmektedir. metal karbür oluşumunun serbest enerji değerlerinin sıcaklık ile değişimini gösteren diyagram, HSC Chemistry 6.12 termodinamik simülasyon yazılımı ile çizilmiştir. Diyagramın çizilmesinde, yazılımdaki ‘‘H, S, C and G Diagrams’’ modülü kullanılmıştır. Diyagram incelendiğinde oda sıcaklığında en kararlı metal karbürlerin sırası ile NbC, VC, SiC, $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3, Mo_2C, Mn_3C ve Fe_3C olduğu görülmektedir. Ayrıca, artan sıcaklıklar ile VC, SiC ve Mn_3C’nin kararlılıklarında bir düşüş gözlemlenmektedir.



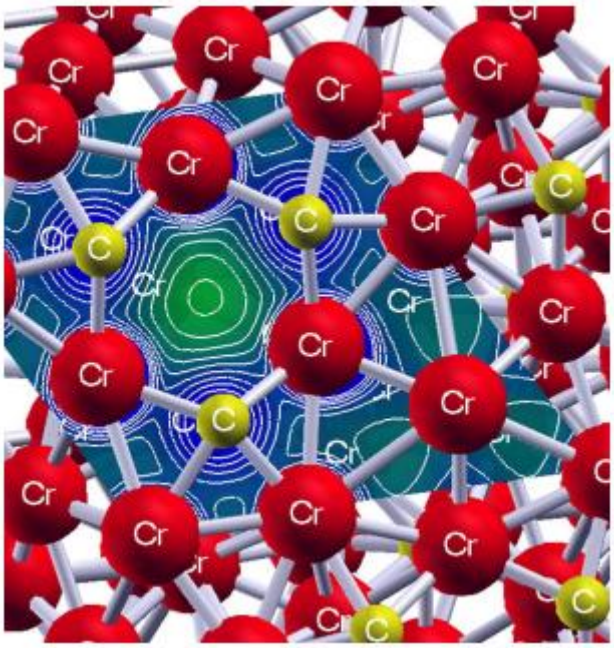
Şekil 1.23. Ellingham Diyagramında elementlerin karbür oluşumları

Rus ve Amerikan bilim insanlarının (Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg ve Missouri University of Science and Technology) V, Cr, Mn, Fe, Co ve Ni içeren kromlu çeliklerde en yaygın karbür olan $M_{23}C_6$ karbürlerin faz kararlılıkları üzerine yaptıkları ortak çalışmada $Mn_{23}C_6$, $Cr_{23}C_6$ ve $V_{23}C_6$'nın en kararlı fazlar olduğu sonucuna varılmıştır: Kararlılık; metal-metal veya metal-karbon bağları ve elementlerin elektron yapılarının getirdiği avantajlar nedeniyledir. MC, M_3C, M_3C_2, M_5C_2, M_6C, M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ gibi farklı karbürler çeliklerin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde olumlu etkileyen oluşumlardır. Bunların çeliğe sağladığı güç matristeki ve tane sınırlarındaki homojen karbür dağılımı nedeniyle ortaya çıkar. Farklı M_xC_y karbürler ısıl işlem [menevişleme/AÜ] sırasında;

$$M_3C \rightarrow M_2C \rightarrow M_{23}C_6, \text{ ve/veya} \quad (13)$$

$$M_3C \rightarrow M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6 \quad (14)$$

dönüşümlerine uğrarlar. Bu ise aşınma direncinde ek bir artışa yol açar. Ayrıca; molibden, nikel, tungsten ilavesinin bir dengeleyici etki ile $M_{23}C_6$ oluşumunu hızlandırdığı ve karbür çökeltme kinetiğini etkilemesi sözkonusudur [130].



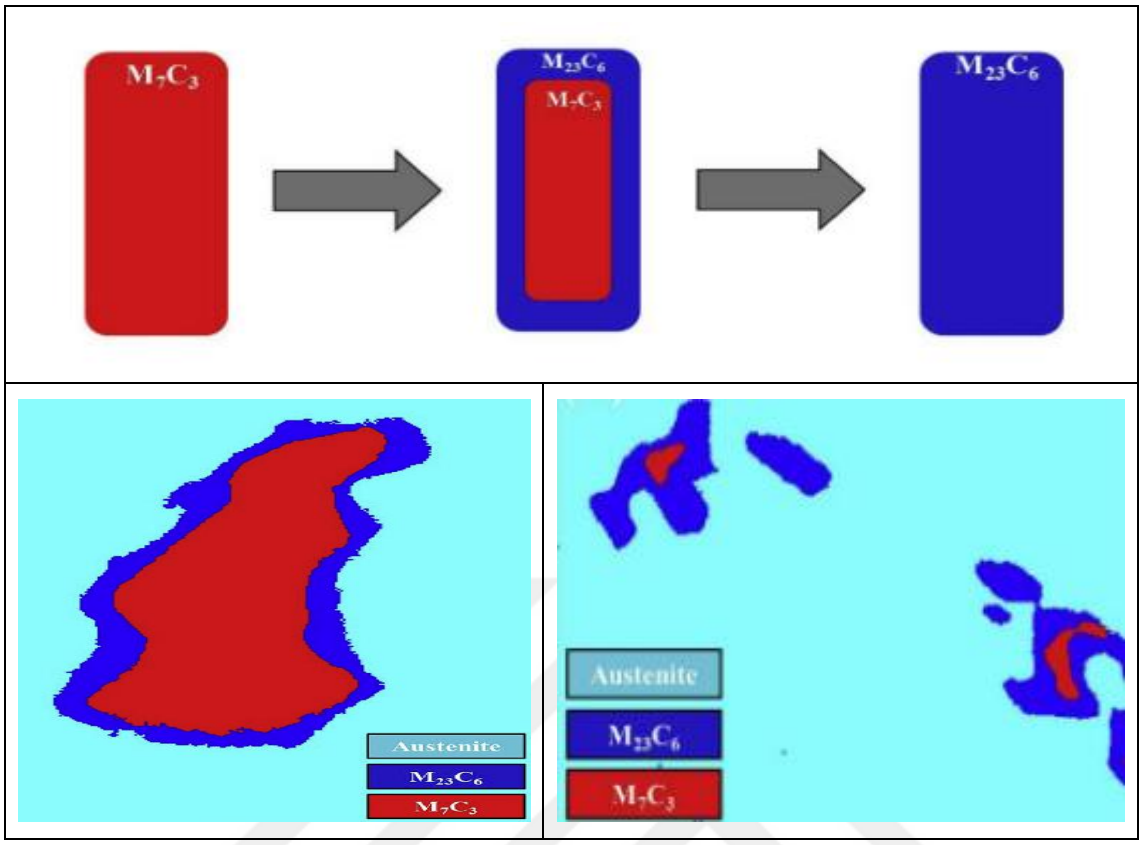
Şekil 1.24. Karbür atomlarının şematik gösterimi [130]

Hitit Üniversitesinde yapılan "Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Faz Dengesinin Benzetimi" çalışmasında; artan Molibden içeriği ile ikincil $M_{23}C_6$ karbürlerin miktarında artış ile üretilen benzer kimyasal içeriğe sahip numuneler içerisindeki faz dağılımı ve faz kompozisyonlarını mikroyapı inceleme, SEM taramalı elektron mikroskobu ve EDS sacınım spektrometresi analizleri yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde, hiç ısıl işlem yapmadan Molibden içeriğindeki %0,5'den %1,5'e, %1 'lik bir artış ve buna bağlı ikincil karbürlerin miktarındaki artış ile sertliğin 45 HRC'den 51 HRC'ye artışı tespit edilmiştir. Daha sonra uygun ısıl işlemlerle daha da geliştirimek üzere Molibden artışı ile Östenit matris içinde düzgün dağılmış Demirce zengin daha küçük taneli ikincil $M_{23}C_6$ karbürlerin sertliğe katkısını onaylamaktadır. Bu neticeler deney sonuçları ile modellemelerin uyduğunu ve çok bileşenli sistemlerde faz dengesinin tahmin edilebilmesinin sağlayacağı yararları anlatmaktadır [131].

Kunming Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Xi'an Jiaotong Üniversitesi Malzemelerin Mekanik Davranış Laboratuvarı ve Harvard Üniversitesinde yapılan bir çalışmada $M_{23}C_6$ tipi çok bileşenli karbürlerin mekanik özellikleri ile elektron ve bağ yapıları sistematik olarak incelenmiş ve sonuçlar, mevcut teorik ve deneysel verilerle karşılaştırılarak analiz edilmiştir; Buna göre $M_{23}C_6$ (M = Fe, Cr, Mn) çok bileşenli karbürler termodinamik olarak kararlıdır. Genel olarak, çeliklerdeki $M_{23}C_6$ tipi karbürlerin genellikle karışık çökeltiler olarak çeşitli başka metalik elementler kullanılarak yapılandırıldığı ve $M_{23}C_6$ bileşiklerinin metalik ve kovalent bağların kombinasyonları ile oluşması sonucu yüksek erime noktasına ve yüksek sertliğe sahip oldukları belirtilmiştir. Sertliğin, malzemenin aşınma direncini karakterize etmek için önemli bir parametre olduğu gözönüne alındığında bu gruptan $Fe_{21}Mo_2C_6$'nın diğer karbürlerden daha sert ve kırılgan olduğu sonucuna varılarak bu nedenle de aşınmaya dayanıklı ideal bir malzeme olduğu, sonuç olarak Molibden (Mo) veya Demir (Fe) içeren $M_{23}C_6$ bileşiklerinin mekanik özelliklerinin, $Cr_{23}C_6$, $Mn_{23}C_6$ ve $Fe_{23}C_6$'nın saf fazlarından üstün olduğunu ortaya koymaktadır [132].

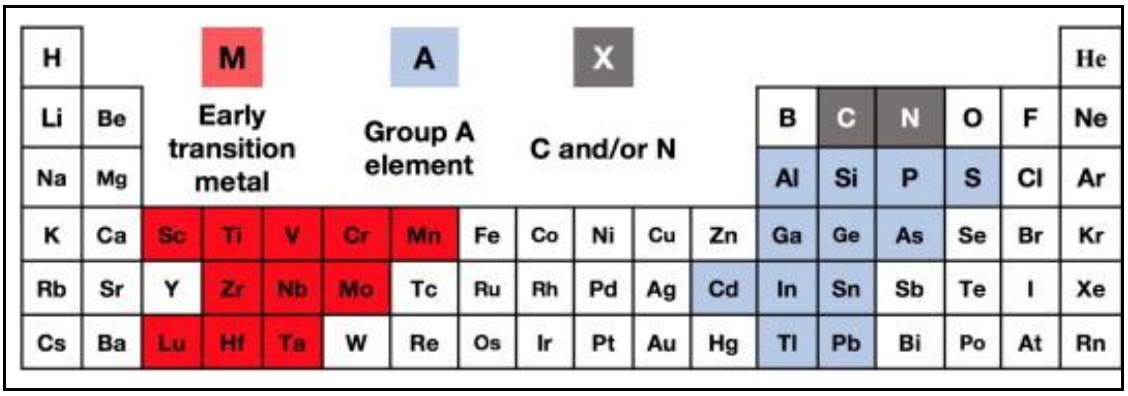
M_7C_3 sertlik karşılaştırılmasında daha serttir. $M_{23}C_6$ ise Cr içeren karbürler arasında termodinamik olarak en kararlı olanıdır. Bu iki özellik bir arada düşünüldüğünde aşınma davranışında $M_{23}C_6$ fazlarının daha dayanıklı olacağı anlaşılır [133].

Birmingham Üniversitesinde yapılan yeni bir çalışmadan oluşturulan bir teoriye göre soğuk iş takım çeliklerinde en çok görülen metal karbür tipleri olan M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ gibi çeşitli Cr içeren karbürler çeliğin mekanik özelliklerini çökelme güçlendirmesi yoluyla geliştirir. Bu teoriye göre menevişleme sırasında ulaşılan sıcaklık ve süreye bağlı olarak dökümü takiben katılaşmadan sonra oluşan M_7C_3 tip karbürlerin bir kısmı ısıtıldığında $M_{23}C_6$'ya dönüşür. M_7C_3 daha sert karbür çekirdekte olacak şekilde $M_{23}C_6$ karbürler tarafından kaplanır [134].



Şekil 1.25. Çok bileşenli karbürlerin mekanik özellikleri ile elektron ve bağ yapıları sistematik olarak incelenmesi [134]

Karbürlerle ilgili bir diğer teori de oluşumun salt Metal Karbür (Örneğin Krom-Karbür ya da Molibden-Karbür) şeklinde ikili oluşmadığı, ayrıca Silisyum ve eğer çelik içerisinde mevcutsa Aluminyum ile M-A-X kısaltması ile ifade edilen üçlü bir Karbür bileşikleri (Örneğin Krom-Aluminyum-Karbür ya da Molibden-Silisyum-Karbür), ve yine eğer çelikte azot varsa üçlü Nitrür bileşikleri oluşturdukları şeklindedir. Martin Magnuson (Linköping Üniversitesi-İsveç) ve Maurizio Mattesini (Complutense Üniversitesi-İspanya) tarafından yapılan çalışmada konu elektron yapıları ve kimyasal bağlar perspektifi ile incelenmiştir. Çok sayıda alternatif oluşturabilecek metalik ve seramik özellikleri olan nano düzeyde, katmanlı (Nano-Laminated) bileşik(ler) kombinasyonu önemli bilimsel ve teknolojik ilgi kaynağıdır. İkili Karbürler, üçlü karbürlerin ebeveynidir [135].



Şekil 1.26. Magnuson-mattesini, max fazı elementleri [135]

Amaçlanan özel bir çalışmada ise, M, Molibden ve Vanadyum olmak üzere toz metalürji ile M_5AX_4 oluşturmak için ne uygun Mo:V oranının 4 olduğu belirlenmiştir [136].

Piyasada satılmakta olan takım çelikleri üreticileri tarafından genellikle eş eksenli ferrit tanelerinden oluşan bir matris içinde düzgün dağılmış küreselleştirilmiş karbür parçacıklarından oluşan bir mikro yapıya sahiptir ve bu, malzemenin istenen bir geometride işlenmesini kolaylaştırır. Bu mikroyapıyı elde etmek için kullanılan işleme yumuşak tavlama denir. Daha sonra ön ısıtma, östenizasyon, su verme ve iki aşamalı menevişlemeyi (temperleme) içeren bir dizi ısıl işlemler yapılır. Östenizasyon, su verme işleminden sonra oluşan martensit miktarını en üst düzeye çıkarmak ve menevişlemede ikincil sertleştirme için yeterli alaşım elementlerini çözmek için kritik öneme sahiptir [137].

Serleştirilmiş soğuk iş takım çeliklerinin mikro yapısı, önemli miktarlarda kalıntı östenit ve çözünmemiş karbürler ile esas olarak martensitiktir. Bununla birlikte, bazı soğuk iş takım çeliklerinde beynit de oluşabilir [Hızlı soğma olmadığı durumlarda östenit, ferrit fazının içinde iğnemsi veya bağımsız küçük plakacıklar şeklinde sementit (Fe_3C) dönüşümü sonucu oluşan yapıya beynit denir, yani; Beynit= Ferrit + Sementit (Fe_3C) [138].

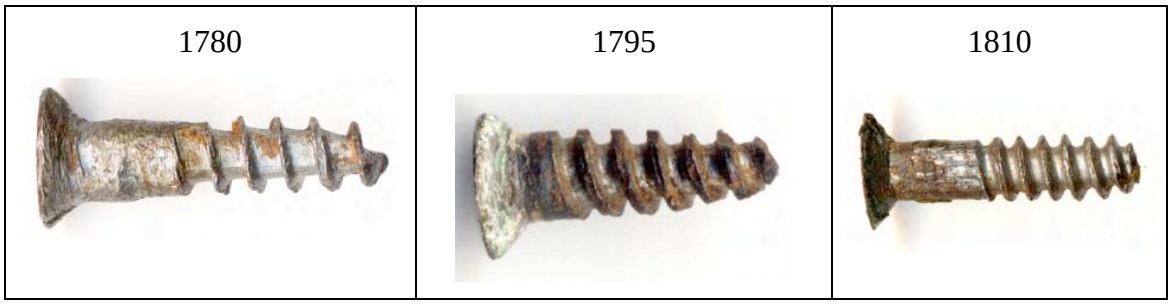
1.9. Bağlantı Elemanları ve Ovalama

Havacılık, uzay, gemicilik, otomotiv gibi stratejik sektörler başta olmak üzere endüstrinin istisnasız her alanında bağlantı elemanları kullanılmaktadır. Sayılamayacak kadar çok örneği olan çok çeşitli vida ve civatanın, kullanıldığı yer, ortam, işlev, fiziksel ve malzeme özelliklerinin tanımlandığı standartlarla bunları oluşturan üretim metodolojileri

de beklentilere göre gelişmektedir. Küçük bir vidanın bir hava aracını düşürebildiği düşünüldüğünde diğer tüm malzemeler gibi bu sektörde de daha düşük maliyetle daha kaliteli, yani verimli üretimin önemi daha iyi anlaşılır.

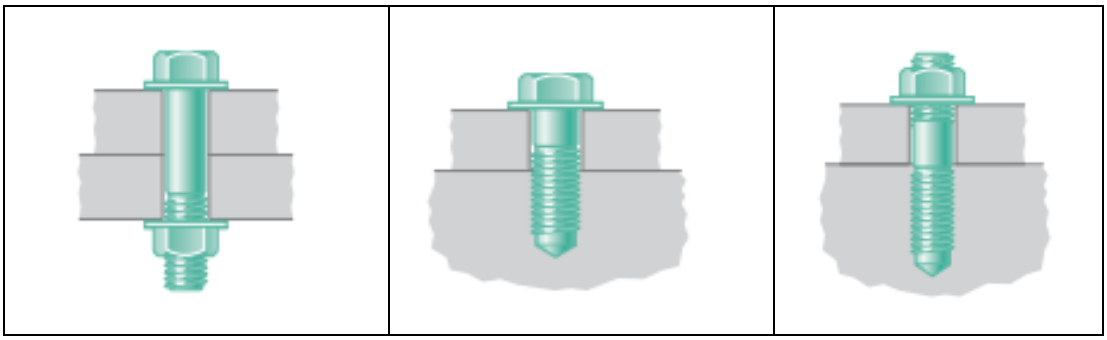
Vida ve civatalar kullanarak sabitleme işlemi hem statik hem de dinamik bileşenleri olan ve bağlantı elemanları endüstride en çok kullanılan ürünlerdir. Civatalar ve türevleri kullanılarak imal edilen ürünlerde masraf kalemi olarak %1 oranı ifade edilmektedir. Çok geniş kullanımın olduğu otomotiv sektöründe, orta segment bir aracın üzerinde farklı nicel ve nitel büyüklüklerde ortalama 3.000 bağlantı elemanı sabitleyici kullanılmaktadır [139].

Bağlantı elemanı olarak en eski el yapımı metal vidaların kullanımı Avrupa'da 15. yüzyılda mobilyalarda başlamıştır. Tornada yapılan ilk ağaç vidalarına ait kayıt 1760 tarihli Staffordshire'dan Mr. Job ve Mr. William Wyatt adlarına bir İngiliz patentine dayanmaktadır. 18. yüzyılın sonlarına doğru ise daha işlevsel takım tezgâhları geliştirilmiştir. Bunlar ilk olarak 18. yüzyıl Avrupa'sının imalat merkezlerinde ve çevresindeki evlerle dükkanlarda küçük gruplar tarafından üretildi. Yine de bu yıllarda vida başları el imalatı olurken bütünüyle otomatik ilk vidanın patenti girişimciler Mr. Sloat ve Mr. Springsteen adlarına 1837'de alınmış, ilk imalat 1845'te yapılmıştır [140].



Şekil 1.27. Bağlantı elemanları ve ovalama [140]

Büyük-küçük hemen hemen tüm makineler ve yapılar, sonradan birleştirilmek üzere ayrı ayrı imal edilen parçalardan oluşur. Bu tek parçalar bütünleştiğinde bağlantı kesimleri geometrik farklar nedeniyle göreceli olarak zayıf bölgelerdir ve potansiyel hasar yerleri oluştururlar. Bu nedenle, gereğinde söküp yeniden takılabilmesi de göz önüne alınarak bağlantı tasarımında kullanılacak malzemelerin seçimi hassasiyetle ele alınmalıdır.



Şekil 1.28. a. standart civata b. standart vida c. saplama [141]

Vidalar ve cıvatalar iş parçalarının montajında sabitleme amacıyla kullanılan en yaygın bağlantı elemanlarıdır. İki terim arasındaki temel fark bu bağlantı elemanlarını arzu edilen işleve uygun tutmak için kullanılan yöntemdir. Vidalar normalde kafaları tarafından tahrik edilir ve dişleri kullanılarak döndürülerek deliğe takılır. Cıvatalar ise deliklerden geçirilirek takılır ve bir somunla yerinde tutulur [142].

Vida yapımında Ovalama tekniği, benzerleri, örneğin kare kütüklerden yuvarlak ürün elde edilmesi, kalın slablardan rulo/levha sac üretilmesi ya da düz levhalardan otoyol korkuluğu şekillendirmesi yapılması gibi, kalıplar vasıtasıyla malzemeye final şeklini veren bir haddeleme işlemidir. Bu işlemler en az üç kategoriye ayrılabilir:

A. Plaka ve çubuk haddeleme

B. Vida ovalama

C. Rulo/filmaşin şekillendirme [143].

Vida ve civatalara yiv ve diş aşma işlemleri konvansiyonel olarak mekanik işleme (talaş kaldırma işlemi) yoluyla yapılabilirse de bu yol üründe %15-20 malzeme kaybı ve mukavemetin kararlılığını azaltmaktadır. Buna alternatif olarak kalıp yardımıyla metal şekillendirmede daha yüksek yüklere dayanım sürekliliği sağlanır. Vida ovalama, harici bir haddeleme işlemidir. İş parçasına diş profili işlenmiş sabit ve hareketli sert kalıplar vasıtasıyla diş açılır. Hareketli kalıbın iş parçasına uyguladığı yükle diş profili hiç talaş kaybı olmaksızın bir saniyede transfer edilerek çok sayıda ürün seri olarak elde edilebilir [144].

Ovalamanın avantajları şöyle sıralanabilir:

Optimum tane yönü; Ovalama sırasında malzeme içerisindeki taneler açılan dişin yönünü takip eder, bu ise darbelere karşı yorulma dayanımının %50'ye varan artışı anlamına gelir,

düzgün, parlak ve pürüzsüz bir yüzey elde edilir, mekanik aşınmaya karşı önemli bir mukavemet artışı sağlanır, işlemeyle karşılaştırıldığında %20 civarında malzeme tasarrufu sağlanır, çok hızlı yüksek ürün sayılarına ulaşılır, bazı aşırı sert çelikler hariç neredeyse sert-yumuşak tüm malzemelere uygulanabilir [145].

Mekanik talaş kaldırma yoluyla işleme yöntemi ile karşılaştırıldığında ovalama yoluyla dış diş açma için plastik deformasyon uygulamanın faydaları arasında verimlilik, malzemeden tasarruf, gelişmiş güvenilirlik ve dayanıklık yönlerinden 3-5 kat artış olması sayılabilir [146].

Ovalama kalıpları iki çeşittir:

1- Düz/Yassı ovalama kalıpları

2- Yuvarlak/Silindirik ovalama kalıpları

   a- İki Silindirli ovalama kalıpları

   b- Üç Silindirli ovalama kalıpları

Diş açılması istenen vidanın şekil, malzeme özellikleri ve işlem metoduna göre uygulanmada dikkate alınması gereken noktalardan bazıları şunlardır:

1) Vida çapı.

2) Kalıp geometrisindeki durumu.

3) Vidala parçasının uzunluğu.

4) Daha önceden yapılmış ve sonra yapılacak işlemlerle ilişkisi.

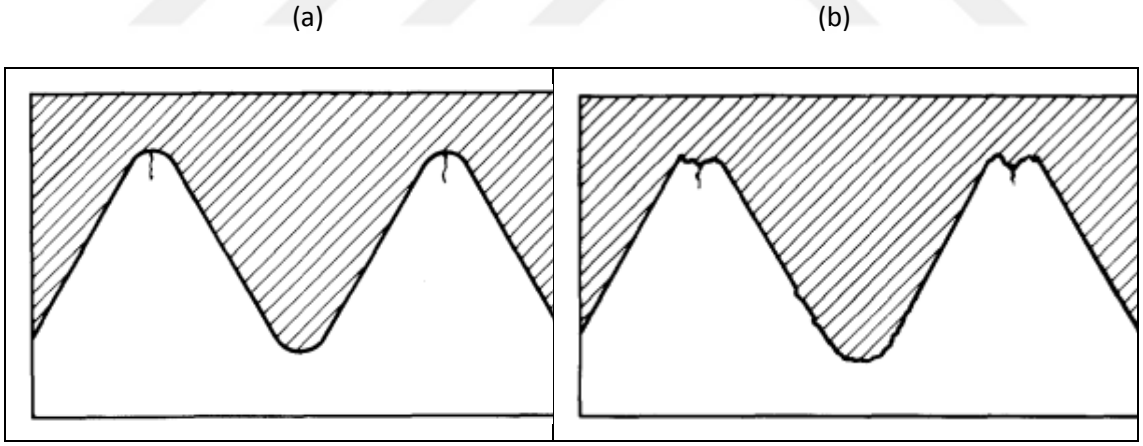
5) Vida geometrisi (düz, konik veya başka şekil).

6) Destek uygulama yöntemi [147].

Vida ve cıvata üretimininde ovalama, silindirik veya konik bir boşluk üzerinde diş haddelemesi için harici bir ‘soğuk şekillendirme’ işlemidir. Bu işlem özel olarak tasarlanmış makinelerde dikey yapılabildiği gibi yatay ataşmanlar kullanan tezgahlar kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Ovalama sistemi, karşı karşıya konumlanmış iki düz kalıp kulanılarak veya ikili-üçlü radyal beslemeli silindirik kalıp setleri arasına sokulan ham parça üzerinde gerçekleştirilebilir [148].

Ovalamada en sık görülen kusurlar, bir tür istenmeyen dikiş izi olarak da adlandırılabilecek malzemede uzunlamasına çizikler veya kıvrımlar gibi yüzey kusurları ve kalıntı gerilmelerdir. Bunlar ciddi kalite kontrol sorunlarına neden olabilir. Çizikler ve kalıp izleri gibi çeşitli yüzey kusurları, proses parametrelerinin yanlış seçilmesinden, yağlama ile ilgili sorunlardan veya kalıp ile ilgili malzeme, üretim, tasarım veya uygun olmayan montaj koşulları sonucu ortaya çıkar. Kalıntı gerilmeler ise diş açmak için kullanılan haddeleme işlemi sırasında uygulanan üniform olmayan bir deformasyon sonucu doğal olarak oluşan genel bir soğuk işlem değişkenidir ve dikkatle takip edilmelidir [149].

Şekil 1.29 (a)'da gösterildiği gibi bir dişüstünde oluşabilecek bir zedelenme izi, eşlik eden bir olağandışılık yoksa pek çok vida ovalamasında karşılaşılabilecek türde ve tipik olduğundan normal kabul edilir. Kalıbın diş dibi vida tarafından tamamen dolacak şekilde oturmuşsa bu iz görünürlüğünü kaybeder. İçeride yine bir yara izi vardır, ancak taşlama ile ortaya çıkar. Merkezden uzakta ve boyutsal olarak küçük olduğundan vida veya cıvatanın mekanik özelliklerine yapması muhtemel olumsuz etki kabul/ihmal edilebilir seviyelerdedir.



Şekil 1.29. (a) Tam dolu, (b) tam dolu olmayan hatvede tipik dişüstü çizikler [150]

Şekil 1.29 (b)'de diş bölgesinin tam doldurulmadığı durum kalıp ömrü açısından istenen bir durumdur. Yuvarlanması arzu edilen oluşan bu açık berelenme izinin yapısı, boyutları uygulanan metodolojiye, tasarıma, iş parçasının büyüklüğüne ve nihayet malzemesine bağlıdır. Ovalanan iş parçalarının sert malzeme olması veya ovalaması sırasında serleşme davranış karakteri gösteren malzemelerden olması durumlarında bu tür mikro oluşumlar nicelik olarak azalır ve boyutları küçülür. Plastik şekillendirmeye daha uygun sünek

malzemelerde daha önemlidir [150].

1.9.1. Kalıp Ömrünü Etkileyen Faktörler

Diş açmada kullanılan ovalama kalıplarının ömrü, öncelikle kalıp dişlerinin profilinin bozulma hızı ile belirlenir. Haddeleme işlemi sırasında her iki kalıp üzerinde basınç ve eğilme ve kayma hareketinden kaynaklanan ciddi stres oluşturur. Kalıplar genellikle, diş profilinin ürünün kabul kriterlerini aşacak şekilde tolerans dışına çıkmasına neden olan diş üstü bölgelerin kısmen veya tamamen parçalanması ve abrazif aşınma ile ufalanmasıyla bozulmaya başlar. Metal yorgunluğu da haddeleme sırasında uygulanan gerilimlerden kaynaklanan hasar oluşum hızını arttırır. Kalıbın uygun montajı ve çalışma sırasında o işin karakterine uygun optimum hız tespiti ile hem çıkan üründei hem kalıp ömründe başarılı sonuçlar elde edilebilir. Ovalama sırasında yüzeylerde tufal veya herhangi bir başka oksit bulunmamalıdır. Hasar oluşumui kalıp seti arasındaki boşluğun uygun ayarlanmamasından da kaynaklı olabilir. Aşınma başladığında sıklıkla kalıp kenarlara yakın yerlerde vida diş dipleri ile doğrudan temas eden kalıp diş profillerinden parça kopmaya başlar. Dökülme genellikle boşluklar ve takımlar üzerinde uygun olmayan pahlarını bazen de yüksek sertlik durumu oluşur. Kalıbın yan tırtıl ve dişüstü tırtılının, vidanın hatveler arasında diş üstü ve diş dibi bölgelerine teması, sertlik ve oluşabilecek bir boşluk uyumsuzluğu yardımıyla hassasiyet artar. Yuüksek baskıya maruz kalan bölgelerde başlayan mikro ufalanmalar tedricen kalıbın geneline yayılır [151].

1.9.2. Çelikte Tufal Oluşumu

Çelik 560 C'nin üzerinde ısıtıldığında demir oksitlenerek wüstit (FeO) oluşmaya başlar. Bu sıcaklık, wüstitin ilk oluşmaya başlama sıcaklığıdır. Demir iyonları yüzeyden dışa doğru, oksijen iyonları ise harici atmosferden içeriye doğru parçaya yönlenerek tufal arayüzeyini oluşturur. Oluşan oksit tabakası ait olduğu çeliin kimyasal kompozisyonuna doğrudan bağlıdır. Çeliği oluşturan elementlerin oksijen affinitelerine göre tufal oluşumu farklılık gösterir [152].

1.10. Triboloji ve Hasar Analizi

1.10.1. Aşınma Olgusu

Yüklerin yüksek olduğu kalıplara ve kaydırma mekanizmalarına özel amaçla yerleştirilen aşınma plakaları, bazı metal işleme makinelerinde önemli bir bileşendir. Aşınma parçaları olarak da bilinen bu plakaların zaten aşınması beklenir ancak kolayca değiştirilebilirler.

Aşınma genellikle bir parçanın yüzey topoğrafyasını değiştirip ciddi yüzey hasarına yol açsa da zaman zaman faydalı bir etkiye de sahip olabileceğinden her aşınma bir endişe kaynağı olmamalıdır. Kimi zaman çeşitli makineler ve motorlar için alıştırma periyodu ya da pürüzleri düzeltmek için gidermek de bilerek ve isteyerek yapılagelen aşınma işlemlerindendir. Bu nedenle, denetimli şartlar gözetilerek karşımıa çıkan bir aşınma, sıradan bir tür düzleştirme veya parlatma (polisaj) cilalama işlemi olarak kabul edilmelidir. Örneğin tahtaya tebeşirle yazı yazmanın da bir aşınma süreci olduğunu ve yazı tahtasında gördüğümüz kelimelerin aslında aşınma parçacıklarından oluştuğunu düşünebiliriz.

Aşınma sözkonusu olduğunda yapışma, yıpranma ve korozif ve yorulma aşınması olarak dört temel aşınma ile daha tali olmak üzere erozyon aşınması, sürtünme aşınması, darbe aşınması gibi formu değiştiren olgular tek başlarına veya en az ikisi bir arada olarak da karşımıza çıkabilir [153].

Genel olarak tüm Mühendislik malzemeleri kataloglarda yazılı olan ya da eldeki verilerle hesaplanarak laboratuvar test sonuçlarıyla da doğrulanan teorik değerlere ya hiç ulaşamazlar, ya da nadiren ulaşırlar. Bu nedenle de gerçek çalışma koşullarında sorunları en aza indirmek, hatta kritik kararlarda (örneğin havacılık, uzay, tıp) riski sıfırlamak için malzeme seçiminde amaca yönelik tolerans değerleri ilave edilir. Mühendisler, teknisyenler, ve işletmeciler performansı etkileyen çevresel koşullar, stres, yük tekrarı gibi bileşenlerin malzemeyi teorik olarak hesaplanandan ne kadar önce yorabileceğini, muhtemel arızaları düşünmeli, süreci tahmin edebilmeli ve giderek planlamalıdır. Üretimden, montajdan ya da kalite kontrol kaynaklı hatalar tasarım kaynaklı olup olmadığından bağımsız olarak, kimi zaman da bakım-onarım eksiklikleri ve/veya ihmalleri ile de birleşerek karşımıza yorulma sonucu kırılma arızası olarak çıkmaktadır.

Bileşenlerin veya yapının hasar görmesine neden olan temel mekanizmalar şunlardır:

1- Plastik deformasyon

2- Çatlaklar

3- Korozyon

4- Aşınma [154].

Kırılma, malzemenin, uygulanan yük altında nasıl davrandığına, kırılma mekaniğine ve hatta kırılmdan sonra kırık bölgenin görünümüne bağlı olarak çeşitli şekillerde tarif edilir. Kırılma bir felaket ya da afet değildir. Kırılma, malzemenin plastik deformasyona uğrayıp uğramadığına bağlı olarak sünek kırılma veya gevrek kırılma olarak ikiye ayrılır.

1.10.2. Sünek Kırılma

Sünek kırılma, plastik deformasyon ile karakterize edilen metalin yırtılarak kopmasıması ve önemli plastik deformasyon ile karakterize edilir. Tek başına aşırı yük veya malzemeden kaynaklanan ihmal edilemeyen süreksizlikler sebebiyle, bazen de bu iki nedenin bir araya gelmesi nedeniyle oluşabilir. Bu tür kırılmalar, usülüne uygun olmayan kullanım hataları nedeniyle olduğu gibi tasarımda malzeme seçimindeki tercih veya bizatihi tasarımın kendisi de kırılma sebepleri arasındadır. Tasarım hatası, yanlış malzeme seçimi, yanlış üretim tekniği ve/veya kullanım nedeniyle oluşur. Kırılma öncesi sünek metallerdeki plastik deformasyon gözle görülebilir. Kırılma sonucu kırılan gri yüzey lifler şeklinde girintili çıkıntılıdır.

1.10.3. Gevrek Kırılma

Plasik deformasyon sözkonusu değildir. Sertliği yüksek kırılgan malzemelerde ortaya çıkan gevrek kırılmanın en bariz oluşumu çatlak ve bu çatlağın hızlı ilerlemesi ile ve kalıcı bir şekil değişikliği olmaksızın görülür. Kırılan bölge düz ya da düze yakın pürüzlü bir yüzey şeklinde ortaya çıkar. Sivri çıkıntılar ile oyuk ya da girintilerle mekanik işleme yüzey hataları nedeniyle malzemenin mikroyapısı içerisindeki tanelerden ayrılmayla ya da tanenin bölünmesiyle meydana gelir. Malzemede mevcut bir boşluk, gevrek kırılmayı lokal olarak önceden belli olmadan hızlı kırılma şeklinde anlık ortaya çıkarır [155].

Aşınma sürecinin karmaşıklığı, sertlik, tokluk, süneklik dahil olmak elastisite modülü,

akma dayanımı, yorulma özellikleri, temas eden yüzeylerin yapısı ve bileşiminin yanı sıra geometri, ortam sıcaklığı, temas basıncı ile uygulanan yükün nasıl dağıldığı, sürtünme katsayısı, kayma mesafesi, aşınma arayüzünde bağıl hız, yüzey kalitesi, varsa yağlayıcılar, kirleticiler ve ortam atmosferi olmak üzere birçok değişkenin dahil olduğu bilinirse daha iyi anlaşılabilir. Temas yüzeyleri arasındaki uzaklık ve temas süresi de süreçte aynı şekilde önemlidir. Tüm bu güçlüklere rağmen belirtilen çalışma koşulları altında aşınmanın çeşitli alt kategorileri için deneylere dayalı nicel ilişkiler geliştirilmesi yönünde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir [156].

Kalıp aşınmaları kalıp ile işlenen metal arasındaki sürtünmeden ortaya çıkar. Kalıbın yapıldığı malzeme ve varsa ısıl ilem ve/veya kaplama, uygulanan yük miktarı ile temas yüzeyindeki basınç, temas hızı, sıcaklık, varsa kullanılan yağlama kalıp aşınmalarına etki eden temel faktörlerdir. Kalıp yüzeyindeki hasarlar genellikle yapılan iş üzerinde yavaş yavaş yüzey malzeme kayıpları ile başlar.

Aşınma ile ilgili birbirine benzeyen ancak farklı istatistiki veriler bulunmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan aşınma oranları:

Abrazif aşınma: %50

Yapışma aşınması: %15

Erozif aşınma: %8

Kimyasal aşınma: %8

Korozyon aşınması: %5

Yorulma aşınması: %14 [157].

1.10.4. Aşınmanın Ana Bileşenleri

1- Aşınan ve aşındıran malzemelerin özellikleri,

(Mekanik, fiziksel, kimyasal, mikroyapı)

2- Yüzey özellikleri,

3- Temas sırasındaki nominal yük,

4- Sürtünme,

5- Elemanlar arsındaki uzaklık,

6- Aşınan ve aşındıran malzemelerin sertlik değerleri,

7- Ortam sıcaklığı,

8- Yağ malzemesi,

9- Yağlama, ve Soğutma [158].

Birbirlerine bir temasın sözkonusu olduğu göreceli hareket halindeki birden çok yüzeyleri içeren bir mekanizmanın tribolojisi, belirli girdi (input) ve çıktı (output) verileri içeren bir süreç olarak değerlendirilmelidir. Bir tribolojik temasın analizi için başlangıç noktası olarak kullanılan girdi verileri, hem makro hem de mikro ölçekte kontağın geometrisi, ilgili farklı parçaların kimyasal bileşimi, mikro ve fiziksel yapısı ile geometrisi, ayrıca çevresel parametrelere dayalı malzeme özellikleridir. Diğer önemli girdi verileri ise; normal yük, hız, açısal kuvvet ve sıcaklık gibi enerji parametreleridir. Tribolojik süreç, iki yüzeyin birbirine göre hareket etmesiyle gerçekleşir ve girdi verilerine dayanarak fiziksel ve kimyasal yasalara göre hem fiziksel hem de kimyasal değişimler meydana gelir. Zamanın bir fonksiyonu olarak, tribolojik süreç hem iş parçası ya da parçalarının geometrisinde, hem de malzeme bileşiminde değişikliklere neden olur ve enerjiyle açıklanabilecek çıktılar olan; sürtünme, aşınma, hız, sıcaklık, ses ve dinamik davranış etkileriyle sonuçlanır [159].

Bir patlatma zımbasının delme işlemi sırasında oluşan sürtünme gerek yüzeyde, gerekse daha derinlerde kılcal çatlaklar oluşturur. Giderek bu mikro çatlaklar birleşerek kalıp malzemelerinden küçük parçacıkların ayrılmasına, ayrılan bu parçacıkların da birbirleri ile teması sonunda tozlar oluşmasına neden olur. Triboloji, şekillendirilmek istenen ve kalıp malzemelerinin mikroyapı dahil tüm özelliklerine, uygulanan yükün şiddet ve tekrar sıklığına, sıcaklık başta olmak üzere ortam şartlarına bağlı olarak "aşınan" ve "aşındıran" yüzeylerde oluşması istenmeyen ya da geciktirilmek istenen kalıcı deformasyonu ve nasıl en aza indirilebileceğini inceler. Her ne kadar "aşınan" kadar "aşındıran" malzemelerde de bir aşınma sözkonusu olduğundan hedeflenen ürün özelliklerini ve kalitesini bu olay doğrudan etkiler ve en az kalıp elemanındaki aşınma kadar önemlidir.

Bir takım çeliğinin aşınma davranışını ve kırılma direncini en uygun noktada buluşturmak için, en uygun karbür tipinin seçimi ile çelikte bulunan farklı birincil karbürlerin sertlik

ve kırılma tokluğu davranışları arasındaki optimumu sağlayan bir mikroyapı sağlanmalıdır [160].

İki katı yüzey arasındaki temas ve yapışma ile bir parçacığın aşındırıcılığı sırasıyla;

1- Yüzeylerin yüksüz teması,

2- Uygulanan yük plastik akmaya ve soğuk kaynağa neden olur,

3- Kayma hareketi ve uygulanan yük gerinim sertleşmesi üretir,

4- Kaynayan noktasıdaki pürüz koparak parçacıklar yer değiştirir [161].

Tribolojik sorunlar gözönüne alındığında alet-iş parçası etkileşimi, ürünün kalitesini, süreç performansını ve takım ömrünü etkileyen önemli bir özelliktir. Örneğin, sac şekillendirme işlemlerinde aşınmış malzemelerin birikmesi sonucu takım temas yüzeyinde sac malzemelerin yapışma aşınmasına neden olabilir. "Çapak" olarak adlandırılan bu tribolojik problem genellikle tolerans kaybına neden olur ve ürün kalitesini etkiler. Yapışma aşınması eğiliminin çelik kalitesine, yani takım çeliğinin kimyasal ve faz yapısına doğrudan bağlı olduğu bilinmektedir. Kritik metal-metal teması nedeniyle birbirleri arasında matrise yapışmayı karbür fazı önler. Bununla birlikte, makro ölçekli testlerde her fazın aşınma mekanizmasına katkısını ayırmak zor, hatta imkansızdır. Karbürler, karbonitrürler ve nitrürlerin boyut ve dağılımları, matrisin yapışma ve sürtünme özellikleri ile nihai performansa katkıda bulunarak tribolojik davranışları etkileyen önemli parametrelerdir [162].

1.10.5. Sac Levha Şekillendirmede Triboloji

Yaygın sac şekillendirme işlemleri arasında bükme, derin çekme, ütüleme, zımbalama, streç şekillendirme, eğirme ve damgalama en çok kullanılan işlemlerden birkaçıdır.

Herhangi bir şekillendirme prosesinde sistemin işlendiği makine ve iş parçası, yani işleyen ve işlenen olarak iki ana unsur ile mekanik ve termal enerjilerin transferinin gerçekleştiği takım ile iş parçası arasındaki arayüz bulunmaktadır. Bir biçimlendirme işlemini tanımlayan fiziksel olguların nicel ilişkilerle ifade edilmesi zordur. Metalin akışı, alet/malzeme arayüzündeki sürtünme, ısı değişimi, plastik şekil değiştirme (deformasyon) yönünden mikro yapı, özellikler ve proses koşullarının analizi tahmin edilmesi zordur. Metal şekillendirme operasyonlarının anlaşılması ve optimizasyonu için,

ilgili olayları sistematik bir şekilde sınıflandırabilmek için metal şekillendirmeyi bir sistem olarak düşünmek gereklidir.

Çapak oluşumunu başlatan mekanizmaları kapsamlı bir şekilde incelendiğinde aşındırmanın üç aşamadan oluşan bir süreç olduğu tespit edilmiştir: Başlangıç aşaması, yapışma ile büyüyen mikro tanelerin birleşmeleri ve çalışma malzemesinin üzerinde ciddi şekilde birikmesi. İlk iki aşamada, sözü edilen yapışma sonucu oluşan miktar mikroskobik seviyelerde olduğundan neredeyse hiç görülmezler, ancak sonuç olarak ürün kalitesinde bozulmalar gözlemlenir. Oluşan mikro parçacıklar başlangıçta sonraki vuruşlar sırasında kaybolabilir. İlerleyen aşamada ise kararsız sürtünme koşulları oluşur ve ürün yüzeyinde girintiler veya çiziklerle birlikte ilk iki aşamada fazlaca görülmeyen daha büyük yapışma birikintilerin oluşturduğu çapaklanma kusuru görünür hale gelir. Yapılan araştırmalarda aşınmanın yüzey pürüzlülüğü ile arttığı, yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasının sürtünmeyi önlemek için olumlu etki yaptığı, parlatılmış yüzeylerde daha az yaygın olduğunu göstermiştir [163].

Delme esnasında üründe oluşabilecek hasarlar (Şekil)şunlardır:

A) Yuvarlanma (Rolling),

B) Yassılık (Flatness),

C) Parça Kopması (Rupture Fragement),

D) Çapak Oluşumu (Particle Burring) [164].

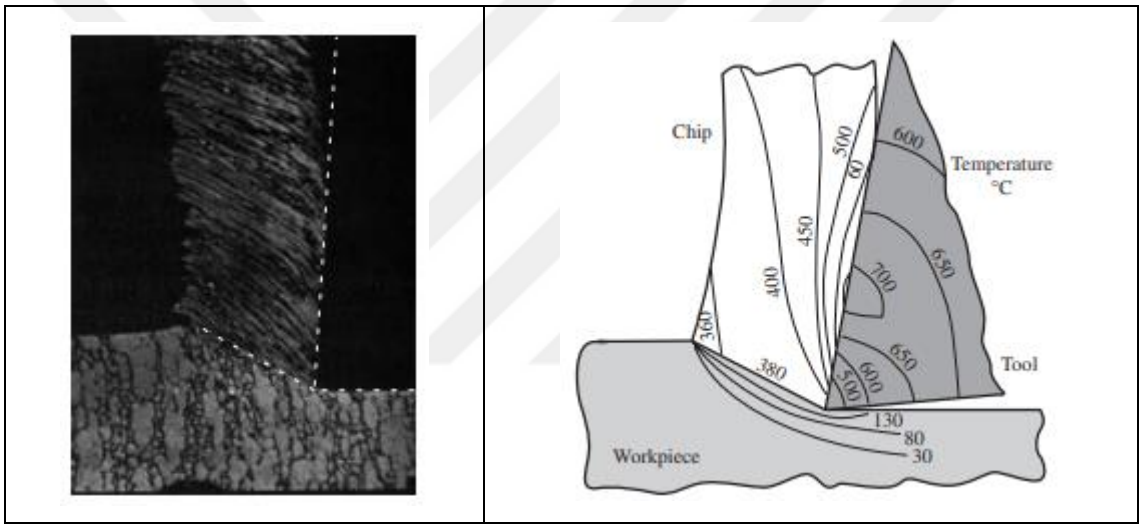


Şekil 1.30. Delme esnasında üründe oluşabilecek hasarlar [164]

ASTM Standartına göre çapağın tanımı: Birbirine değen iki katı arasında özgün yüzeyde ortaya çıkan, makroskopik olarak ayırt edilebilen, genellikle yeri ve nitelikleri belli, malzeme taşınımını da içeren ve plastik şekil değiştirme ile ayırıcı özelliği tanımlanan pürüz ve çıkıntı şeklinde yüzey hasarı [165].

Çapak oluşumunun, laminasyon paketlerinde sacların manyetik özelliklerini bozarak ciddi kalite problemlerine neden olur. Baskı kalıbı ve zımbalama, lazer ve tel erezyon kesim yöntemi, ya da su jeti kesim yöntemi kullanılarak kesilmesi dahil hangi metod kullanılırsa kullanılsın kesme kenarında oluşan deformasyona bağlı kesme kusurları elektriksel verim özelliklerinin bozulmasına neden olduğu gözlenmiştir [166].

Yüksek sertliğe sahip bir takım malzemesi kullanılarak takım ömrü maksimize edilebilirse de kesme sıcaklıklarında sertliğin korunması, kesme koşullarında yüksek kırılma tokluğuna sahip olması kritiktir. Ayrıca zımba, yüksek sıcaklıklarda kimyasal inertliğe sahip olmalı ve çalışma sıcaklıklarını azaltmak için yüksek termal iletkenliğe sahip olmalıdır. Çok az malzeme bu özelliklerin tümünü sergiler.



Şekil 1.31. Kesme düzlemi teorisi ve etal kesmede sıcaklık dağılımının gösterimi [166]

1.10.6. Kesici Takım Aşınması

Kesici takımların aşınması son derece karmaşıktır ve aşağıdakiler de dahil olmak üzere pek çok farklı olguyu birarada içerir:

1- Aşınma. Bu, talaş/takım veya iş parçası/takım etkileşimlerinden kaynaklanan doğrudan aşınmadan kaynaklanabilir veya takım yüzeyine karşı yığılmış kenar parçalarından veya iş parçasında ara sıra meydana gelen sert kapanımlardan kaynaklanabilir.

2- Yapışma. Sıcak, kimyasal olarak reaktif iş parçası alet malzemesine yapışabilir ve yavaş yavaş malzemeyi çıkarabilir. Yapışma, iş parçası malzemesinin alete

difüzyonunu kolaylaştırabilir ve alet malzemesinin kimyasal inertliğinin önemi daha da artar.

3- Özellikle ortam sıcaklığı çok yükseldiğinde bir kaplamanın delaminasyonu meydana gelebilir. Ek olarak, kaplama ve alt tabaka arasında benzer termal genleşme katsayılarına sahip olmak faydalıdır çünkü kaplama, oda sıcaklığında olduğu kadar çalışma sıcaklıklarında da bütünlüğünü korumalıdır.

4- Termal yorgunluk, özellikle darbeli yüksek hızlı işlemede dikkatle izlenmelidir.

5- Termal şok, takım malzemesinin kırılmasına neden olabilir.

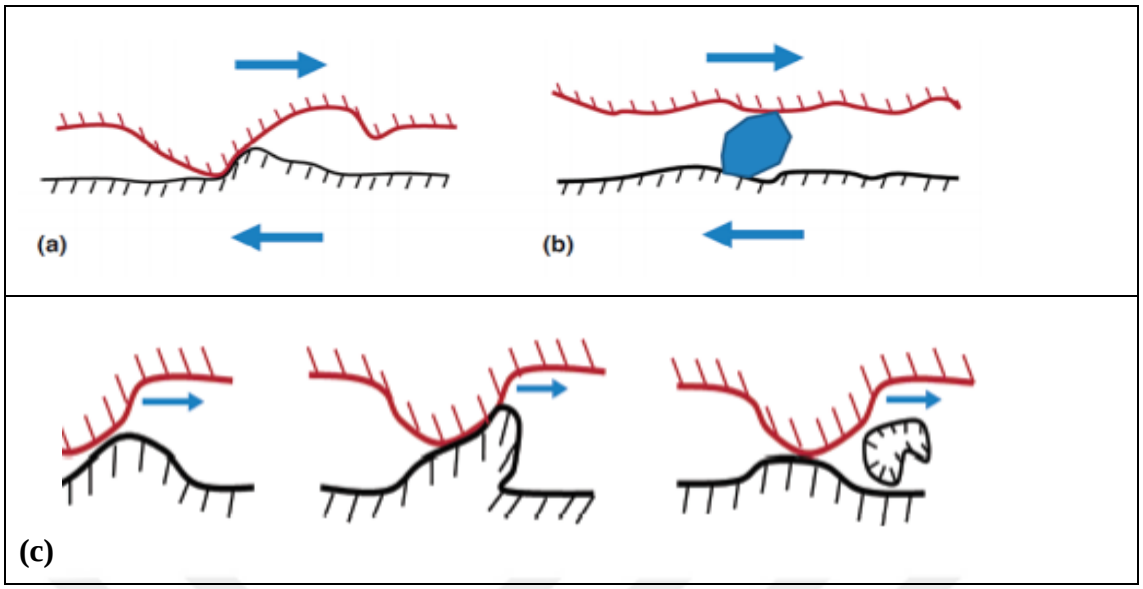
6- Korozyon ihtimali incelenmelidir [167].

Katı yüzeyler arasındaki temas tipi ikili veya üçlü olabilir.

(a) İki cisim teması, temas yüzeylerinin birbirine karşı kayması anlamına gelir,

(b) Üç cisim temasında, temas eden yüzeyler arasında kalan aşındırıcı bir parçacık olduğunda görülür,

(c) Abrasif aşınma, bir yüzeye karşı sert çıkıntıların (yüzey pürüzleri) veya sert parçacıkların (dış veya sıkışmış aşınma kalıntıları) göreli hareketi olarak tanımlanabilir [168].



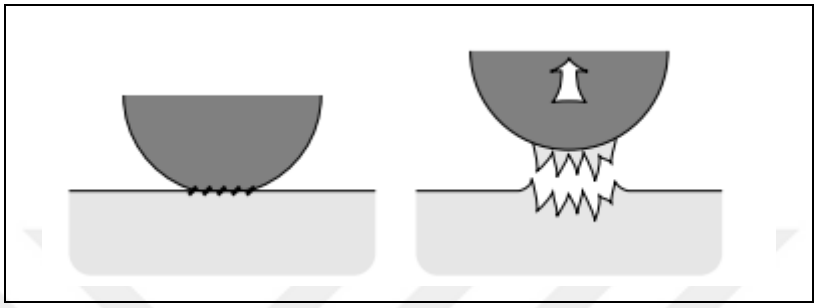
Şekil 1.32. a) İkili aşınma, b) üçlü aşınma, c) abrasif aşınma mekanizması [168]

Hasar, (parçacıklar veya çıkıntılar) aşınmayı kategorize eder: çok baskı varsa, aşındırıcının doğrudan kendisi de etkilenir, normal (nominal) veya düşük yükte aşındırıcı durumunu korur. Ortamın ezilmiş olduğu anlamına gelir. Ne ki; her iki durumda da, temas gerilimi değişen derecelerde aşınmaya neden olabilir.

Aşınma birçok farklı biçimde meydana gelir, malzemenin deformasyonu veya bir yüzeyden parça çıkmasıyla açıklanabilir. En yaygın olarak, aşınma birikintilerin varlığı aşınmanın meydana geldiği yüzeylerde parçacıkların yüzeyden ayrılması ile oluşan çapak oluşumu ile belirgindir. En sık karşılaşılan aşınma türleri ise; kayma aşınması (yapışkan aşınma), abrasif aşınma, eroziv aşınma ve sürtünme aşınması [169].

Yapışma aşınması ve kayma aşınması, katı bir cismin başka bir katı cismin yüzeyi boyunca bir kuvvet altında kaydığı aşınma mekanizması için kullanılan iki genel terimdir. Kayma veya yapışma, her iki terim de meydana gelen aynı aşınma olayını anlatıyor gibi görülse de, kayma göreceli hareketin tipini belirtir. Yapışma ise, aşınmanın nasıl meydana geldiğine dair bir mekanizmayı ifade eder. Terimlerdeki farklı kullanımlar kayma aşınmasının aşınma ve oluk açma gibi diğer aşınma işlemlerini içerdiği düşünüldüğünde karmaşıklık içinde artar. Yapışma mekanizması, yüzey malzemelerinin sistmde var olan basınç altında plastik deformasyonu nedeniyle temas eden pürüzlerden oluşan kısmi oluşumlar olarak tanımlanabilir. Kayma hareketi altında aşınan pürüzler bulundukları yüzeyden koparak diğer yüzeye yapışır. Kayma aşınmasında birbirlerine göre hareket eden yüzeylerde, doğrusal salınım, tek yönlü kayma, burulma salınımı ve çok yönlü

kayma olmak üzere genellikle dört farklı şekilde gerçekleşebilir. Yapışma aşınması ise, genellikle bir yatağın içinde normal hareket etmesi gereken bir milin arızi nedenlerle sıkışmasında görülür. Hareket karakterisiğine (örneğin yön) ve aşınan partiküllerin hareketine göre sürtünme aşınması da kısmen kayma aşınması kategorilerinde ifade edilebilir. Bu nedenle, belirli bir hasar incelemesi için eğer bir aşınma araştırılıyorsa, hareket türünün de analize dahil edilmesi gereklidir [170].



Şekil 1.33. Yapışma ve transfer [171]

Erozif Aşınma; bir katı parçacık akışının etkisinden kaynaklanır. Erozif aşınma, parçacıkların boyutuna, sertliğine, hızına ve çarpma açısına bağlıdır. Aşınma oranı genellikle artan parçacık boyutu ve sertliği ve darbe hızı ile hızla artar. Farklı eroziv aşınma ortamları için malzeme sıralaması ise; Güçlü ve tok malzemeler için maksimum aşınma oranı, yaklaşık 30°'lik bir darbe açısında meydana gelir, ancak sert ve kırılgan malzemeler için yaklaşık 90°'lik, elastik malzemeler için ise 0°'ye yakın çarpma (darbe) açısında oluşur.

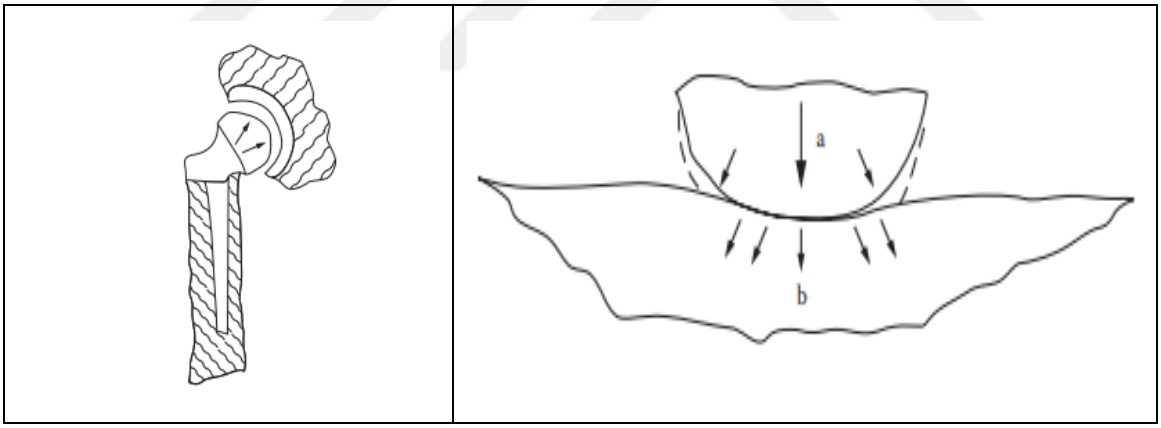
Sürtünme Aşınması; temas eden iki yüzey çok küçük salınımlı kaymaya maruz kaldığında meydana gelir. Hasar, yüzey kısmi olarak bozulduğunda meydana gelir ve parçacık oluşumunun aşındırıcı etkisiyle veya yer yer metal-metal yapışma aşınmasıyla birleşerek hasar ilerleyebilir. Sürtünme hasarı, kaymayı ortadan kaldırarak (temas basıncını artırarak veya yüzeyleri ayırarak,) yağlama (yüzeyleri ayırmak ve döküntüleri temizlemek için) ve kaplamalar gibi yüzey işlemleriyle azaltılır [172].

Darbe Aşınması; malzeme kaybı ile karakterize edilen, katı bir yüzeye sıklıkla tekrar eden basınç uygulaması gerilmesi sonucu yorulma aşınmasıyla meydana gelen hasar olup mekanik olarak yükü aktaran ve çarpmaya maruz kalan malzemeyi etkileyebilir. En basit örneği çivi çakan bir çekiç olarak gösterilebilir, ancak her ikisinin de tasarımının uygun olması halinde hasar olarak nitelendirilebilecek bir aşınma oluşmaz. Ancak, darbe

aşınması muhtelif uygulamalarda uzun dönemde performansı etkileyecek sonuçlar doğurabilir. Bir başka örnekte, büyük çelik bir çekiç kullanarak yeryüzünde herhangi bir zemine çelik kazıklar çakmak, hem çekiç, hem de kazık kafasını, temas noktalarında elastik veya plastik gerinimlerin neden olduğu göreceli kayma olan darbe aşınmasına maruz bırakır. Sıcak veya soğuk, tüm dövme kalıpları, örneğimizdeki gibi zımba pres kalıpları ile perçinleme mekanizmaları gibi vurarak şekil veren metal işleme düzeneklerinde önemlidir. İleri biyomalzemelerden yapılan metal kalça eklem protezlerindeki aşınmalar yenme aşınması ile darbe aşınmasının kombinasyonudur. (Şekil 1.34 a)

Her iki yüzey de göreceli hareketin yanı sıra sıkıştırma gerilimi görür (Şekil 1.34 b).

Bir malzemeye bir gerilim (kuvvet) uygulandığında, gerilim bir seviyeye ulaşana kadar elastik (geri dönüşlü) olarak deforme olur. Takiben plastik deformasyon (geri dönüşsüz) görülür. Her iki elemanın yüzeyleri elastik veya plastik olarak deforme olabilir ve (a) ve (b)'deki malzeme, darbe gerilimini karşılamak için radyal yönlerde yanal olarak hareket edecektir [173]



Şekil 1.34. Kalça eklem protezinde darbe aşınmasının şematik gösterimi [173]

Darbe koşullarında yüzey hareketi (kayma). Yüzey (a) çıkıntı yapar, (b) eğilir.

ASTM Standartına göre çapağın tanımı: Birbirine değen iki katı arasında özgün yüzeyde ortaya çıkan, makroskopik olarak ayırt edilebilen, genellikle yeri ve nitelikleri belli, malzeme taşınımını da içeren ve plastik şekil değiştirme ile ayırıcı özelliği tanımlanan pürüz ve çıkıntı şeklinde yüzey hasarı [174].

Çapak oluşumu sac metal şekillendirme endüstrisinin karşılaştığı önemli tribolojik sorunlardan biridir. Aşındırmanın bir anda ortaya çıkan bir hasar türü olmayıp kademeli

bir süreç olduğu; işleyen takım seti ve işlenen sac metalin kimyasal ve mekanik özellikleri ve yüzey pürüzlülüğü, baskı yükü miktarı, varsa yağlama, ısı, soğutma düzenekleri gibi etmenlerden etkilenmektedir. Takım çeliğinin özgün mikro yapısı, çapak oluşumu üzerinde etkili olan bir diğer önemli faktördür. Çapak oluşumunun nasıl başladığına ilişkin ilk malzeme transferine yönelik araştırmalarda; çapakların erken evrelerinde mikroyapı içerisinde bulunan daha sert fazların, matrisin yapışma aşınmasına engel olarak daha düşük sürtünme katkısı ile çapak oluşumunu azaltmaktadır [175].

Çok sayıda tekrar eden yüklerin sebep olduğu metal deformasyonları kaynaklı yorgunluklar muhtemelen değerlendirmesi en zor olgulardandır; sonuç olarak katıların mekaniğindeki hasarların ana nedeni olduğu söylenebilir. Sorun, tekrar eden yüklerde ilk aşamada çok küçük bir mikro, hatta nano-ölçekte bir kusurun hasarı başlatması olarak açıklanabilir. Bunun büyüme tehlikesini tahmin etmek mümkün değildir. İkinci aşamada, 10^5, 10^6, 10^7 ve üzeri sayıda çevrimlerde çatlak, tane sınırlarında kaçınılmaz olarak ilerler ve sıklıkla malzemenin yüzeyinde görünür olur [176].

Orta Karbon (C) yüksek Krom (Cr) ihtiva eden Soğuk İş Takım Çeliklerinde hasarlar çoğunlukla takımın çalışması sırasında aşınma fonksiyonu olarak ortaya çıkarsa da yorulma kaynaklı muhtelif hasarlar görülebilir. Kristalografik dokular, ince-uzun tane yapısı, alaşım elementleri tarafından oluşturulan karbür gibi ilave fazların veya metalik olmayan kalıntıların matris içerisindeki dağılımları gibi malzemeye özgü anizotropiler, tekrar eden yük altında oluşan hasarlarda belirleyici role sahiptir. Takım Çeliklerinde bulunan Krom Karbürler yüksek sertlik, ve buna bağlı olarak yüksek aşınma dayanımı özellikleri sağlarlar. Ancak bu sert fazlar sıcak termomekanik işlemler sırasında hadde yönünde uzamış karbürler oluştururlar. Böylece, bu çelikten beklenen mekanik özelliklerle birlikte anizotropi, aynı zamanda takım çeliğinin yorulma davranışları göstermesine neden olur. Yorulma çatlakları ya bu karbür tanelerinin ya da kümelerinin hemen sınırında ya da bizatihi karbürün kendisinin kırılması sonucu genellikle malzemenin yüzeyi civarında ortaya çıkar [177].

Kalıp Endüstrisinde kesme, baskı ve zımbalamada kullanılan Soğuk İş Takım Çeliklerinde alaşımlama elementleri Karbon (C), Krom (Cr) ve Molibden (Mo) ve diğer elementler tarafından matris içerisinde oluşturulan Karbür yapısının iki yönlü etkisi olduğu bilinmektedir: Kararlı yapılarıyla daha üstün sertlik ve aşınma direncin ön planda

olduğu üstün dayanıklılık özellikleri sağlaması yanında, aynı zamanda, tekrar eden yüklerde takım ömürünü sınırlayan form bozuklukları ve kırılma ile de sonuçlanabilecek mikro-çatlak oluşumuna neden olma potansiyeli [178].

Takım hasarı, ölçeğine ve nasıl ilerlediğine göre aşınma ve kırılma olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Aşınma, pürüzlülük, mikro temas, hatta atomik düzeyde malzeme kaybı durumudur ve genellikle sürekli ilerler. Öte yandan kırılma, aşınmadan daha büyük ölçekte bir hasardır; aniden ortaya çıkar. Sonuç olarak, mikro aşınmadan büyük kırılmaya kadar ölçeklenebilecek sürekli bir hasar spektrumu vardır [179].

(Picas, 2012) Katalonya Politeknik Üniversitesinde yapılan ve Geleneksel ve Yeni Nesil çelikler üzerinde yapılan bir çalışmada; Yorulma ve kırılma sonuçlarına ve fraktografik gözlemlere dayanarak, kırılma ile sonuçlanan malzeme yorulmasında tekrar eden yüklerde çatlak oluşum mekanizmalarının statik yük altındakilerden farklı olduğu, takım çeliklerinin her bir mikro yapısal bileşeninin rolü ve bunların çatlak başlamasındaki etkileri tanımlanmıştır. Statik yüklerde çatlaklar, uygulanan kuvvet, karbürün kırılma dayanımından daha yüksek olduğunda başlar, daha küçük ve daha homojen dağılmış karbürlere sahip takım çelikleri daha yüksek dayanım gösterir.

Tekrar eden yüklerde metalik matriste hasar gözlemlenmiştir. Karbürlerin etrafındaki stres kırılmaları tetiklenebilir ve yorulma ileten çatlaklara yol açar. İncelenen her iki takım çeliği için de yorulmalardan metalik matris ve farklı karbür özellikleri ve morfolojileri sorumludur [180].

1.10.7. İmalat ve Performans Sorunları

Takım çeliklerinin performansları, tasarlandıkları en güç çalışma koşullarının üstesinden gelecek şekilde imal edilir. Alaşımın kimyasal kompozisyon ve mekanik işleme buna göre seçilir. Ancak malzemelerin tamamında olduğu gibi tüm çelik türleri, en yüksek kalitede üretilmesi koşullarında bile birtakım çalışma sınırlarına ve bazı faktörlere bağlı olarak tavsiye edilen çalışma koşullarında bile kaçınılmaz olarak aşınırlar. Ayrıca, uygulama sırasında ortaya çıkan sorunlar, hasar ile sonuçlanabilecek ciddi başarısızlıklara neden olabilir. Olabilecek hasarları engellemek, değilse en aza indirmek, yani riskleri azaltmak için;

- Malzeme seçiminde kaliteli çelik kullanılması,

- Uygun Mekanik Tasarım,
- Doğru Isıl İşlem uygulaması ve nihayet
- Düzgün Taşlama ve Tel Erozyon ile yapılacak işleme gerekir.

Öngörülen zamandan önce sorunla karşılaşıldığında olası nedenler ve giderilmesi için iki ana konu birlikte değerlendirilmelidir: (1) stres kaynağı ve (2) mikroyapı

Bazı durumlarda mikro yapı en son teknolojiye göre üretilmiştir. Bu durumda kalite ve başarısızlık aşırı streslerden, kötü mekanik tasarımdan, yanlış kullanımdan veya kullanım sırasında maruz kalınan aşırı yükten kaynaklandığı söylenebilir. Diğer durumlarda ise, kalıp uygun şekilde tasarlanmış ve kullanılmış olabilir, ancak performans düşüklüğünden ve kusurlardan mikroyapının sorumlu olacağı düşünülmelidir [181].

Takım çeliklerinde hasarlar farklı türlerde tek tek beya bunların kombinasyonları şeklinde oluşabilir. Beş ana tür hasardan bahsedilebilir: Aşınma, ufalanma, plastik deformasyon, çapak oluşumu ve yorulma. Bu arıza tiplerinin tümü, çalışma operasyonları sırasında uygulanan termo-mekanik toplam yüklerden kaynaklanırsa da asıl kaynak, takım çeliği ile kesme malzemesi arasında dinamik-mekanik olarak uygulanan kuvvetlerdir. Hasarlar, genellikle "yorulma" kavramı ile açıklanabilir. Genellikle büyük ölçüde yorgunluk hasarı mekanizmaları söz konusudur. Aşınma kendini abrazif (yıpranma) veya adeziv (yapışma) aşınması olarak gösterir. Çok sayıda tekrar eden yüklerde aşınmanın zaten ilk sayılardan itibaren geldiği ve yüzey pürüzlülüğünde bir azalma ile karakterize edildiğini gösterdi; İleri aşamalarda oluşmaya başlayan çizik olarak ifade edilebilecek bozulmalar daha derine inmiş ve artan döngü sayısıyla abrasif aşınma daha net görülebilmiştir. Malzemedeki büyük karbürlerin yıpranmayı azalttığı bilinmektedir. Bu nedenle, takım çeliklerinin yapışma aşınma direncini iyileştirmenin en iyi yolu, takım ile iş parçası arasındaki sürtünme katsayısını azaltan sertliği arttırmaktır Şekil 1.35

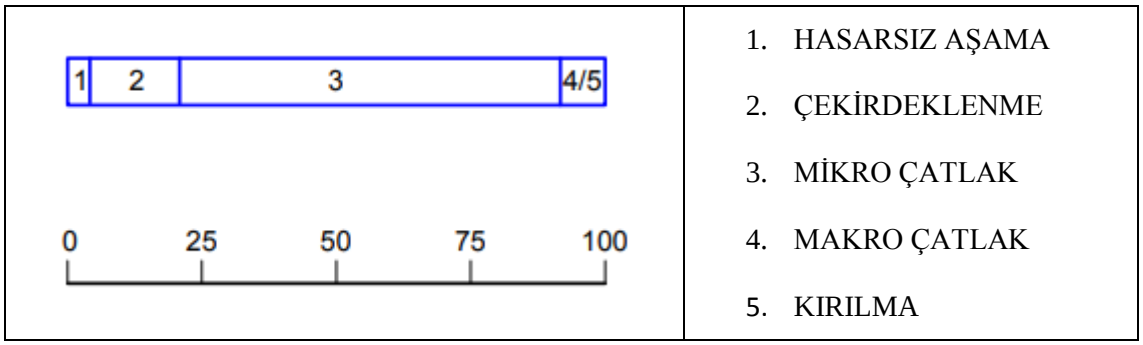
• (1) Malzemede çatlak yok,

• (2) Çekirdeklenme, çatlak oluşum başlangıcı,

• (3) mikro çatlak büyümesi, çatlak uzunluğu 1 mm'den azdır,

• (4) makro çatlak büyümesi, çatlak ilerlemesi Paris-Erdoğan (1963) 0yasası,

• (5) Hasar, kısa sürede gerçekleşir [182].



Şekil 1.35. Hasar oluşumunda süreçler [182]

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışmalar üç ana gruptan oluşmakta olup bunlara ait bilgiler şöyledir:

1- Saha imalat uygulamaları

   a. Rotor Laminasyon imalatı

      i. Kalıp tasarımı: Mebsan firmasının Dudullu İMES Organize Sanayi Bölgesinde İstanbul Ümraniye kalıp imalat atölyelerinde yapılmıştır.

      ii. Pres makinesinde şekillendirme denemeleri: Mebsan firmasının İstanbul Tuzla Kurtköy Egemen Sanayi Sitesinde baskı atölyesinde yapılmıştır.

   b. Vida imalatı

      i. Kalıp tasarımı : Ceviz Pres firmasının İstanbul Bayrampaşa Emintaş Sanayi Sitesi kalıp imalat atölyelerinde yapılmıştır.

      ii. Ovalama makinesinde şekillendirme denemeleri: Sertel Vida firmasının Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesinde vida fabrikasında yapılmıştır.

2- Laboratuvar uygulamaları

   a. Kimyasal analizler

      i. Matil firmasının İ.T.Ü'deki ÇETAM kimya laboratuvarında yapılmıştır.

      ii. Repamet firmasının İstanbul Maltepe'deki Servis Merkezinde yapılmıştır.

      iii. Mekanik analizler: Matil firmasının İ.T.Ü'deki ÇETAM mekanik laboratuvarında yapılmıştır.

   b. Görüntü analizleri

      i. Matil firmasının İ.T.Ü'deki ÇETAM Görüntüleme laboratuvarında yapılmıştır.

      ii. Borçelik firmasının Bursa/Gemlik'deki Görüntüleme Merkezinde yapılmıştır.

3- Termokimyasal Modelleme çalışmaları: Factsage programıyla yapılmıştır.

Ülkemizde önemli kullanım alanları olan takım çeliklerinin yurt içinde üretimi olmadığından tamamı ithalat yoluyla temin edilmekte olup son 10 yıla ait ithalat bilgileri Tablo 2.1'de verilmiştir. 2022 yılında, farklı G.T.İ.P [183] Cetveline göre aşağıda Tablo 2.2'de gösterilen fasıl 72.24-72.28 Takım Çelikleri için ortalama kg fiyatı 2,7 Amerikan Doları birim fiyatla yaklaşık toplam 167 milyon Amerikan Doları ödeyerek 62 Bin ton ithalat yapılmıştır. İthalat yapılan gümrük giriş kapısı sayısının 8 olduğu varsayımıyla neredeyse yılın her günü bu kapılardan birer TIR (treyler) sanayi ara malı vasfında bu yarı-hammaddeler ülkemiz kullanıcılarına sunulmuştur [184].

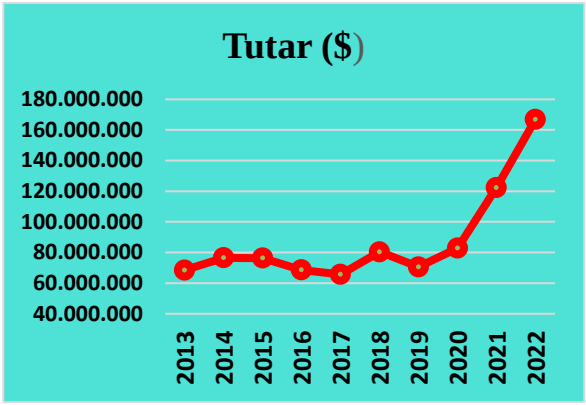
Kullanım yerleri düşünüldüğünde önemli katma değer sağlaması memnuniyeti yanında, eğer varsa mühendislik bilimselliğine uygun olmayan ve/veya muhtemel bir yanlış kullanım dolayısıyla bir "israf" sözkonusu olacaktır. %1'lik bir hatalı kullanımın ülkemize maliyeti, kayıp işgücü, enerji gibi harcamalar düşünülmese bile sadece malzeme olarak 17 milyon dolar, yaklaşık en az 300 milyon lira, malzeme seçiminde doğru ve yerinde kararlarla işe uygun çelik tercih edilmesiyle, ya da uygun kullanımlarla önlenebilir.

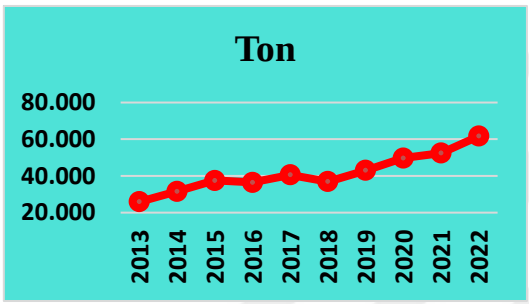
Tablo 2.1. GTİP'lere göre ithal edilen takım çeliklerinin dağılımı

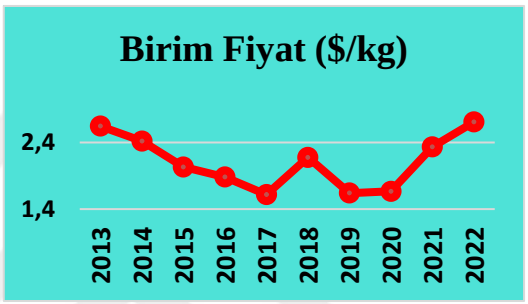
Alaşımlı çelikten çubuklar (takım çeliğinden, dövülmüş)
Alaşımlı çeliklerden sadece sıcak hadde,rulo olmayan yassı mamuller (takım çeliğinden),en>=600mm
Alaşımlı çelikten çubuklar (takım çeliğinden soğuk olarak şekil verilmiş, işli)
Alaşımlı çelikten çubuklar (sıcak haddeli, çekilmiş, Takım çeliğinden)
Alaşımlı çeliklerden sıcak haddelenmiş yassı mamuller, (genişlik;<600mm takım çeliğinden)
Takım çeliğinden yarı mamuller; dikdörtgen (kare dahil) veya sıcak hadde veya sürekli döküm, dövülme
Külçe/diğer ilk şekillerde alaşımlı çelikler (takım çeliğinden)
Alaşımlı çelikten yassı hadde mamulü (sıcak haddeli (rulo) en=>600mm, takım çeliğinden)
Takım çeliğinden diğer çubuklar; sıcak haddelenmiş ve çekilmiş (sadece plakaj yapılmış)

Tablo 2.2. Son 10 yıl takım çelikleri ithalat bilgileri

Yıl	$	Ton	$/kg
2013	68.495.969	25.911	2,6
2014	76.547.875	31.624	2,4
2015	76.306.111	37.544	2,0
2016	68.550.157	36.461	1,9
2017	65.678.267	40.593	1,6
2018	80. 77.931	36.931	2,2
2019	70.554.394	43.050	1,6
2020	82.829.048	49.721	1,7
2021	122.390.701	52.448	2,3
2022	166.889.605	61.646	2,7







Soğuk İş Takım Çeliği olarak adlandırılabilecek sayıları 10'un üzerinde yuvarlak veya dikdörtgen kesitli farklı alaşım içeriklerinde çelik malzeme kullanıcılar tarafından piyasadan kolaylıkla temin edilebilmektedir. Bunlar, satıcı ve kullanıcı paydaşlar tarafından **"Geleneksel Takım Çelikleri"** ve **"Yeni Nesil Takım Çelikleri"** olarak gruplandırılmaktadır. Geleneksel Soğuk İş Takım Çelikleri kategorisinde 1.2379, 1.2550 gibi malzeme numaraları ile anılan 1.2XXX malzeme numaralı çelikler, temininde güçlük olmadan kullanılmaktadır. Piyasadan temin edilebilen ve ASTM A681 ile EN ISO 4957 standartlarında birlikte bulunan geleneksel (konvansiyonel) bazı SİTÇ aşağıdadır:

Tablo 2.3. Geleneksel soğuk iş takım çelikleri

AISI A681	EN 4957	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%V	%W
D6	1.2436	2,00-2,30	0,10-0,40	0,30-0,60	11,00-13,00	-	-	0,60-0,80
D3	1.2080	1,90-2,20	0,10-0,60	0,20-0,60	11,00-13,00	-	-	-
D2	**1.2379**	**1,45-1,60**	**0,10-0,60**	**0,20-0,60**	**11,00-13,00**	**0,70-1,00**	**0,70-1,00**	**-**
O2	1.2842	0,85-0,95	0,10-0,40	1,80-2,20	0,20-0,50	-	0,05-0,20	-
S1	1.2550	0,55-0,65	0,70-1,00	0,15-0,45	0,90-1,20	-	0,10-0,20	1,70-2,20

Geleneksel SİTÇ'ne alternatif olarak geliştirilen Yeni Nesil Soğuk İş Takım Çelikleri ise üretici firmaların kendi verdikleri isimlerle kullanıcılara sunulmaktadır. Bilindiği üzere salt kimyasal kompozisyon değil, ürün memnuniyetini etkileyen ısıl işlem, mekanik işleme, yüzey işlemleri gibi etmenler de bulunduğundan standartlarda yer almayan ve **patentli olan bu ürünlerle ilgili olumlu veya olumsuz bir algı oluşmaması için** firma ve ürün adı yerine S2, V2, **C2** ve **K2** olarak kodlar kullanılmıştır. Yeni Nesil bazı SİTÇ aşağıdadır:

Tablo 2.4. Yeni nesil soğuk iş takım çelikleri

KOD	% C	%Si	% Mn	% Cr	% Mo	% V	Diğer %
S2	0,90	0,90	0,50	7,80	2,50	0,50	-
V2	0,50	0,90	0,45	7,20	1,40	1,20	Ni 0,30
C2	**1,00**	**1,30**	**0,45**	**8,00**	**2,50**	**0,30**	**Ni 0,20**
K2	**1,10**	**1,00**	**0,50**	**8,00**	**2,10**	**0,50**	**Ni 0,20, Al 0,50, Nb 0,15**

Neye "geleneksel", neye "yeni nesil" deriz? Genel tanımıyla gelenekseli, uzun yıllardır kullanılmakta olan malzemeler temsil eder. Burada yıl kavramı, 10, 100, hatta katları da olabilir. İleri malzemeler ve/veya yeni nesil ise; halihazırda yapılagelmekte olan uygulamada kullanılan malzemede, daha üstün performans elde etmeye yönelik, o malzemede var olan kritik en az bir veya daha fazla bileşenin geliştirildiği tüm yeni malzemeleri ve olan malzeme/ler üzerinde değişiklik yapılan malzemeleri ifade eder [185].

SİTÇ yüksek gerilimlerle karşı karşıya kaldığından aşınmaya, darbeye ve eğilmeye karşı büyük dirençli olması gereklidir. Yeni nesil çelik kalitelerinin geliştirilmesi, temel olarak önceki tecrübelerden yararlanarak kullanılmakta olan konvansiyonel çeliklerin çeşitli işlemlerde karşılaşılmış olan hasarların iyi analiz edilmesi sayesinde olmuştur. Her yeni adımın gelişmesi ile, yıllar içerisinde gelişmiş olan kullanım deneyimlerindeki olumlu ve olumsuz yönlerin yorumlanarak kullanım alanında takımın çalışma ömrünü uzatacak özellikler aranır. İncelenen hasar ve aşınma tipolojileri temel alınarak o bilgilere göre çelik tasarlanır. Geleneksel takım çeliği kalitelerinin, geleneksel çelik üretim teknikleriyle üstesinden gelinmesi zor olabilecek çeşitli sınırlamaları vardır. Temel kimyasal elementlerin oranlarını değiştirerek çeliklerin aşınma direncini artırmaya çalışırken, atölyede imalat veya uygulamada kullanım sırasında örneğin çatlak benzeri birtakımyeni sorunların ortaya çıkabileceği hatırdan çıkarılmamalıdır [186].

Fiyatına rağmen, takım çeliği kullanılarak üretilen ürünün değerinin yüksek olması halinde kullanıcılar riski azaltma potansiyeli olan yeni nesil çelikleri kullanmaktadır. Şekil 2.1'de kuyumculukta madalyon basmakta kullanılan kalıp takımı görülmektedir.



Şekil 2.1. Madalyon baskı kalıbı (erkek), madalyon ve dişi kalıp

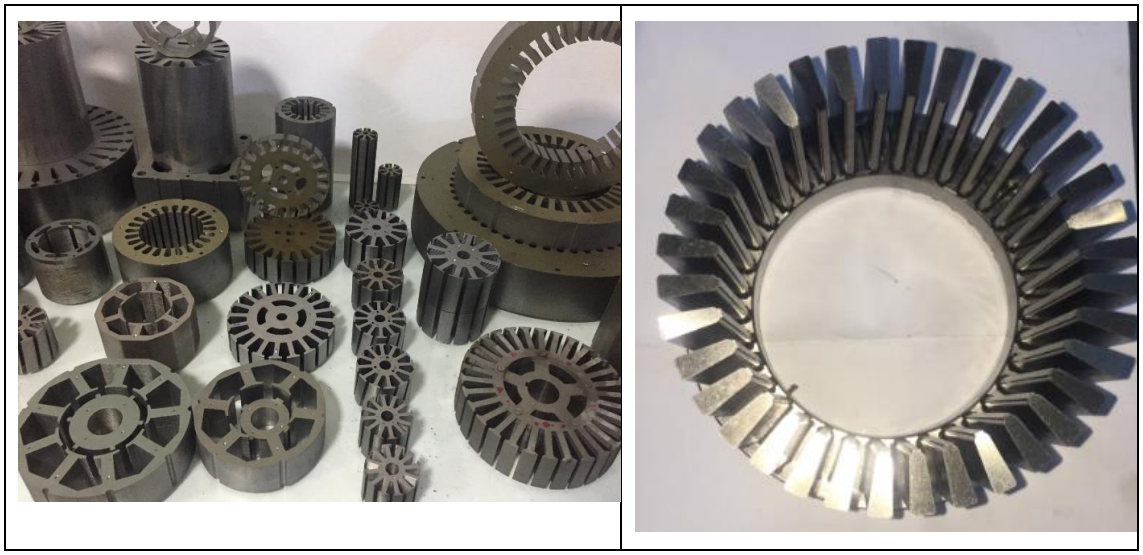
Pres Kalıpları İmalatında Malzeme Seçimi İçin Bir Karar Destek Sistem Tasarımı ve Uygulaması çalışmasında kesme kalıpları imalatında kullanılan çelikler arasından uygun çelik seçimi Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) metoduyla aşınma direnci, tokluk, yüksek sıcaklıkta çalışma sertliği, genel kullanım sertliği, bulunabilirlik, maliyet ve işlenebilirlik kriterleriyle araştırma konusu olarak irdelenmiş AISI D2, D3, D4, D5, D7 SİTÇ seçilmiştir. Seçeneklerin önem düzeyleri, aranan kriterler ve kimyasal bileşimleri esas alınarak karşılaştırılarak Expert

Choice (EC) programı yazılımı ile karar vericiler kolay ve hızlı bir şekilde problemin çözümü oluşturularak en uygun malzeme olarak D2 çeliği önerilmiştir [187].

Kalıp malzemesinin aşınma ve ürün geometrisi üzerinde kalıp aşınmasına bağlı boyutsal değişimlerin araştırıldığı bir çalışmada; Kalıp malzemesi olarak seçilen *geleneksel* 1.2767, 1.2379 ve bir yeni nesil Soğuk İş Takım Çelikleri kullanılarak üretim sürecinde ürünün yüzey kalitesi ve kalıp aşınmaları incelenmiştir. Kalıp malzemesi *yeni nesil* çelik kullanılarak üretilen sacların aşınma noktası sayılarının diğer malzemelere göre az olduğu, tolerans değeri üzerine çıkan basma değeri görülmediği belirtilmiştir. Çalışmalar sonunda hem ürünler hem de kalıp üzerindeki deformasyonlar incelendiğinde kalıp malzemesi olarak *yeni nesil* Çeliğin kullanılması ile örnek olarak kullanılan *geleneksel* takım çeliklerinden ikisine göre avantaj sağlandığı ve, daha uzun süreli kullanımının mümkün olacağı belirtilmiştir [188].

Genel bir kabul ile uzun yıllardır birçok uluslararası standartta yer alan AISI/ASTM A681: **"D2"**, TS BS EN ISO 4957: "1.2379"/X153CrMo$_{12}$, JIS G4404: "SKD11" uygun Soğuk İş Takım Çelikleri (SİTÇ) olarak kullanılmış ve halen yaygın olarak sürmektedir. Bazı firmalar tarafından "Uddeholm Sverker 21" ya da "Böhler K110" olarak da isimlendirilen aynı (D2) çeliğe alternatif olarak geliştirilen ve üreticisinin verdiği özel tanımlarla anılan yeni nesil SİTÇ ile daha başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir.

AISI D serisi takım çelikleri, mükemmel aşınma direnci ve deforme olmama özellikleri, onları soğuk iş kalıp çelikleri olarak çok kullanışlı hale getirir. Kesme ve soğuk şekillendirme kalıplarında yaygın olarak kullanılırlar. Çekme ve laminasyon kalıpları, vida ovalama ve diş açma kalıpları, kesme ve kesici bıçaklar, şekillendirme ruloları vb. Bunların arasında D2 Çeliği açık ara en popüler kalitedir [189].



Şekil 2.2. Ürünler ve zımba seti

Laminasyon Presi Çalışma Prensibi

Mebsan'da 32 kW elektrik motoru tarafından sağlanan enerji volan'a, oradan da krank'a aktarılan 200 ton kapasitede güç üreten H tipi, 2 x 4, toplam 8 kızaklı pres ile dakikada 120 vuruş (saniyede 2 vuruş) yapılmaktadır. Ayrıca; 1,2 kW kapasitede elektrik motoru ile sistemde soğutma ve sürtünmeyi azaltma amaçlı kapalı devre yağlama sistemi motoru bulunmaktadır.

Pres birimi bir işletmede kalıp setini mekanik, hidrolik ve/veya pnömatik yollarla çalıştıran makinedir. Öncelikle pres makinelerine takılı olan kalıp seti fonksiyon olarak 5 ana gruptan oluşur:

1- Taşıyıcı kolonlar, kalıbı merkezler, düşey hareketin ekseninde olmasını sağlar,

2- Üst raptiye, üst kalıp hamili, erkek zımba kalıbını taşır,

3- Erkek kesici bıçak grubu kalıp,

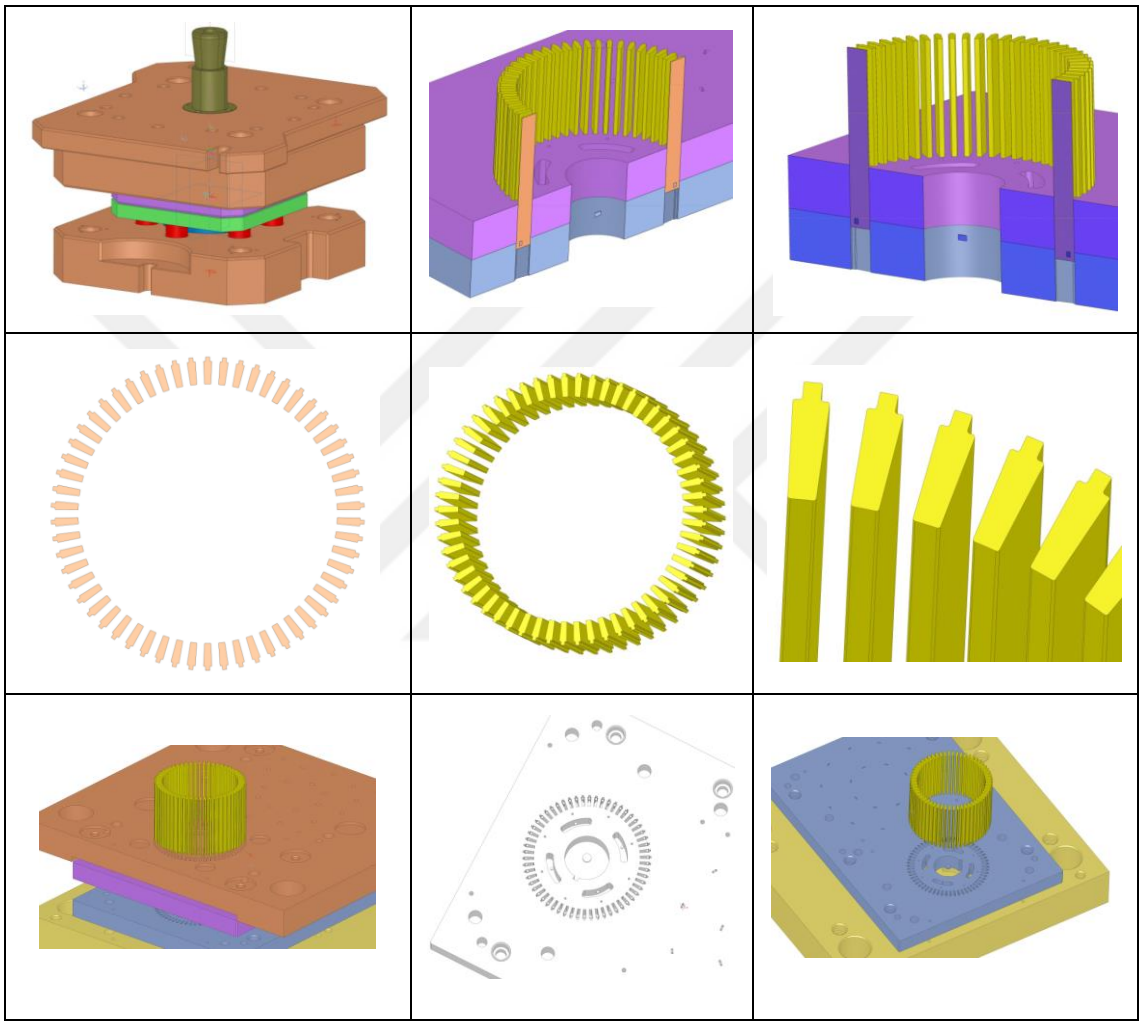
4- Alt sıyırıcı kayıt, dişi kalıp matris

5- Alt hamil, dişi kalıbı taşır.

Kurulumda zımba koça cıvata ile sabitlenir ve kalıp makine yatağına ikisi sabitlenir. Burada tam hizalama çok önemlidir. Aksi taktirde eksenel kaçıklık hem aleti, hem ürünü bozar. Zımba, presin koç olarak adlandırılan üst bölüm ile birlikte aşağı doğru hareket ettiğinde, zımba kalıbın ayarlanmış merkezinden geçer. Pres makinesi tarafından tahrik edilen üst kalıptaki erkek zımba hızla ve ayarlanan kuvvette düşey hareketle yatay 0,5

mm sac metal levhayı keserek zımba profiline uygun delikler açarak arzu edilen fiziksel özelliklerde rotor veya stator laminasyon sacını oluşturur. Zımbanın kestiği kısımlar ise hurda olarak atılır.

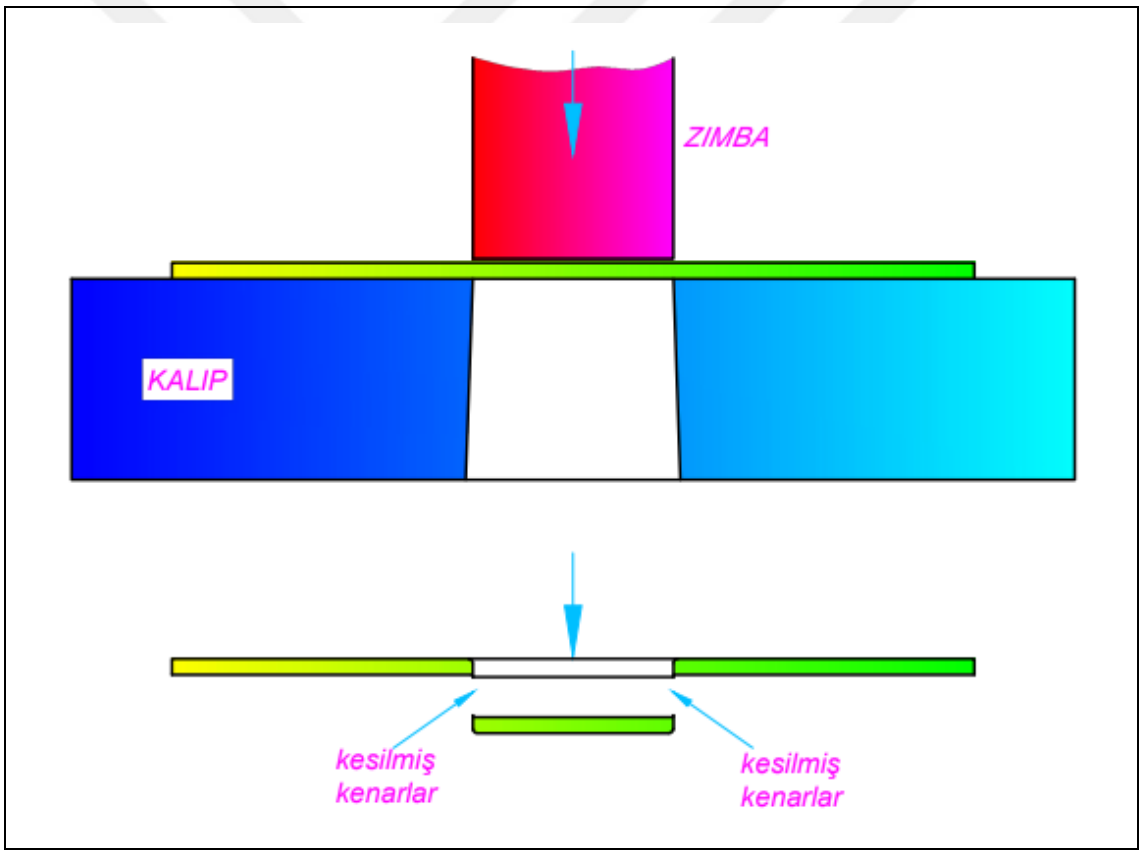
Sıyırma plakasının görevi ise; zımbanın işi bittikten sonra yukarı hareket ederken levhayı takımla birlikte hareket etmemesi, işi bulunduğu yerinde tutmaktır.



Şekil 2.3. Pres makinesinin genel görünümü ve zımba dizilimi

Laminasyon üretiminde tel erozyon gibi, lazer jet ile kesmek gibi başka imal usulleri olsa da çok sayıda laminasyona ihtiyaç olduğu durumlarda en ekonomik olanı, kalıp yapım maliyetinin yüksekliğine, kalıp imalat süresinin meşakkatli ve işçiliğinin kalifiye işgücü gerektiriyor olmasına rağmen yine de bu metod en çok tercih edilendir. Pres sonunda ortaya çıkan ürünlerde, kalıp ekipmanının çok yeni olduğunda olmayan ya da ihmal edilebilir düzeyde, kalıp çalıştığı sürece artan fiziksel büyüklüklerde çapak/lar oluşur. Tek tek mikro çapaklar az gibi düşünülse de üstüste geldiğinde bir yekün teşkil etme

potansiyeli taşıyan çapaklı laminasyonlar istiflenen paketlerde gözle görülür bir kusur oluşturur. Bu ise elektromanyetik özelliklerde geçirgenlik kayıplarına, motor veriminde azalmalara neden olur. Çapak oluşum düzeyi işlem için kullanılan sacın ve kalıpta kullanılan çelik malzemenin vasıflarına bağlıdır. Motor imalatçısının ne vasıfta bir motor üreteceğine bağlı olmak üzere kalıp yüksekliğine göre zımbada bir bileme gerekip gerekmediğine karar verilir. Bazı hassas motorlar için laminasyonlarda çapağın sıfıra yakın olması arzu edilir. Mebsan firmasının laminasyon kullanıcılarının çapak yüksekliği üst sınırı 0,08 mm'dir. Bu düzeylere ulaşıldığında zımba hemen bilemeye alınmalıdır. Çapağa rağmen üretim yapılmaya devam edilmesi zımbada fazla erozif aşınmaya ve ovalleşmeye sebep olmaktai bileme işçiliği güçleşmekte ve daha çok maliyetli olmaktadır [190].



Şekil 2.4. Delme presinin şematik gösterimi

Elektrik motorlarında kullanılan ve silisli sacdan yapılan aynı rotor parçalarının basımında kalıp malzemesi olarak AISI D2 (1.2379), C2 ve K2 takım çelikleri kullanılmıştır. Kimyasal bileşimler incelendiğinde Geleneksel ve Yeni Nesil arasında farklar olduğu gibi Yeni Nesil SİTÇ kendi aralarında farklı kimyasal bileşimlere sahiptir.

Bu çalışmada çok amaçlı ve yaygın kullanımı nedeniyle **Geleneksel D2** (1.2379) ile **Yeni Nesil C2 ve K2** SİTÇ seçilmiştir. Her birinden üçer adet örnek kalıp zımba malzemelerine ait kimyasal analizler Tablo 2.5'de gösterilmektedir. Kimyasal analizler, ÇİB (Çelik İhracatçıları Birliği) tarafından İTÜ (İstanbul Teknik Üniversitesi) Rektörlüğü işbirliğiyle İTÜ içerisinde çelik sektörünün ortak gücü olarak kurulan MATİL (Malzeme Test ve İnovasyon Lab. A.Ş.) Çelik Test ve Ar-Ge Merkezi'nin TÜRKAK tarafından akredite kimya laboratuvarında ASTM E415'e göre ARL 8860 Optik emisyon spektrometresinde yapılmıştır. Analizler sonunda üç farklı çelik türüne ait, her birinden 3'er adet olmak üzere toplam 9 adet zımbanın kimyasal kompozisyonu tespit edilmiştir. Yapılan analizlerde her bir zımbaya ait 32 element % 0,0001 hassasiyetle ölçülmüştür.

Aşağıda temel elementler verilmiş olup tamamı Deneysel Çalışmalar bölümünde FactSage TermoKimyasal simülasyon bölümünde verilmiştir.

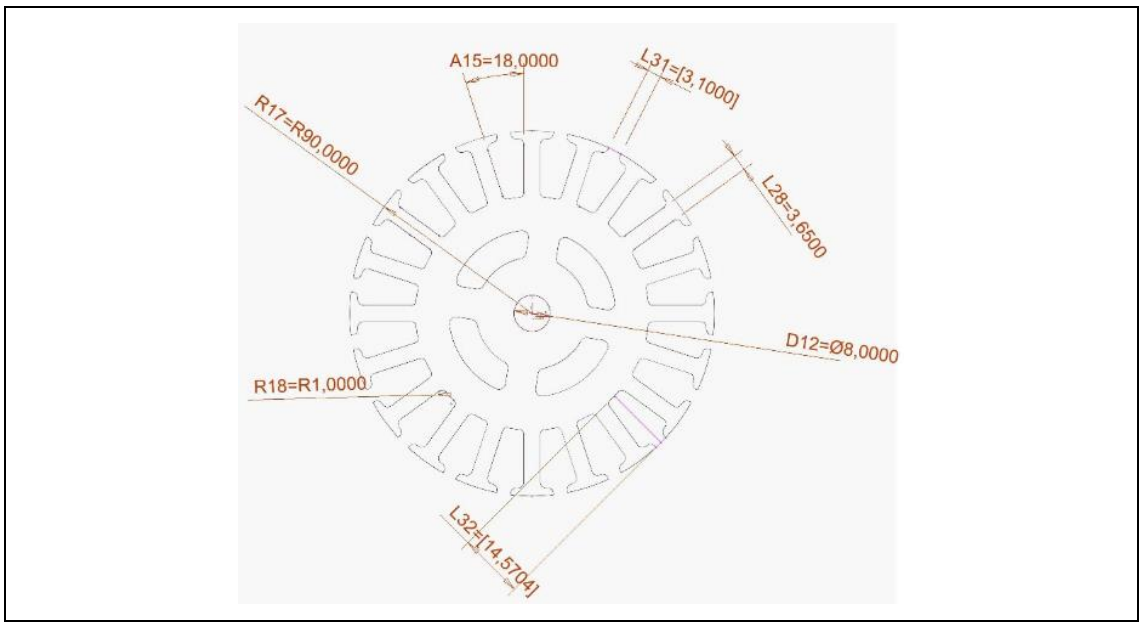
Tablo 2.5. Çalışmada kullanılan soğuk iş takım çeliklerine ait alaşım elementleri kimyasal analizleri

	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Mo	%Cr	%V	%Al	%Nb
D2 (1.2379)	**1.42**	**0.29**	**0.23**	**0.26**	**0.66**	**11.40**	**0.92**	**0.03**	**0.02**
	1.41	**0.44**	**0.23**	**0.39**	**0.62**	**10.86**	**0.63**	**0.02**	**0.03**
	1.33	**0.24**	**0.24**	**0.19**	**0.67**	**11.13**	**0.68**	**0.01**	**0.02**
C2	**0.79**	**0.25**	**0.93**	**0.17**	**1.86**	**7.30**	**0.21**	**0.02**	**0.01**
	0.89	**0.25**	**0.92**	**0.16**	**2.08**	**7.75**	**0.24**	**0.02**	**0.02**
	0.95	**0.26**	**0.95**	**0.15**	**2.31**	**7.97**	**0.27**	**0.02**	**0.02**
K2	**0.96**	**0.38**	**0.77**	**0.30**	**1.85**	**7.88**	**0.41**	**0.83**	**0.11**
	1.08	**0.41**	**0.86**	**0.18**	**2.07**	**8.28**	**0.46**	**0.30**	**0.11**
	1.02	**0.48**	**0.98**	**0.19**	**2.08**	**8.02**	**0.49**	**0.85**	**0.16**

Tümü birden incelendiğinde;

- Tümünde Mangan (Mn) ve Nikel (Ni) oranlarının benzer ve yakın olduğu görülmektedir.
- Yeni Nesil SİTÇ daha düşük oranlarda Karbon (C), Krom (Cr) ve Vanadyum (V) içermektedir.
- Yeni Nesil SİTÇ daha yüksek oranlarda Silisyum (Si) ve Molibden (Mo) içermektedir.
- Yeni Nesil K2 Çeliğinde Aluminyum (Al) ve Niobyum (Nb) ilaveleri bulunmaktadır.

Bu çalışmada elektrik motoru üretiminde kullanılmakta olan "rotor" ve "stator" laminasyon paketlerinin Sac Metal Şekillendirme yoluyla (TS EN 10341) silisli sac malzemeden üretimi için kullanılmakta olan kalıplara ait Soğuk İş Takım Çelikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kalıp malzemesi olarak çok amaçlı ve yaygın kullanımı nedeniyle geleneksel AISI D2/DIN 1.2379 ve yeni nesil iki farklı yeni nesil olan C2 ve K2 kodu verlen SİTÇ kullanılarak elde edilen veriler karşılaştırılmış, yeni nesil örneklerin hem 1.2379'a göre, hem de kendi aralarında daha fazla sayıda baskı rakamlarına ulaşılabildiği sonucu ile aşınma direnci ve performans üstünlüğünü getiren unsurlar incelenmiştir.



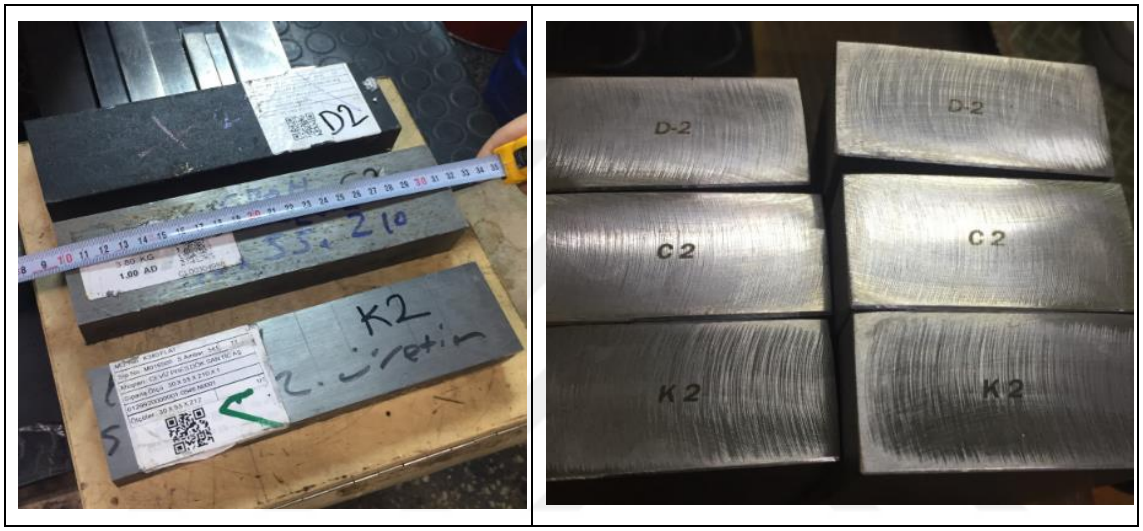
Şekil 2.5. Üretimi yapılan rotor laminasyon

Tamamen aynı vasıflarda, Geleneksel D2 (1.2379), C2 ve K2 kodlu kalite düzeyleri çok

yüksek çelik lamalar temin edilerek 4 x 50 mm YHB Sunta Vidası (diş boyu 46,5 mm) üç farklı ovalama seti imal edilmiştir. Kalıplar kaplamasız olarak denenmiştir;

Tablo 2.6. Deneme amaçlı özel imal edilen ovalama kalıp setleri

Kalıp Türü	**Boyutlar (mm x mm x mm)**
Sabit vida ovalama kalıbı (Uzun)	25,2 x 52 x 105
Hareketli vida ovalama kalıbı (Kısa)	25,2 x 52 x 90



Şekil 2.6. Ham ve taşlanmış D2, C2 ve K2 çelikleri

Yapılan çalışmalarda gerek zımba, gerek ovalama kalıbı ömründe, kalıpların formlarını bozarak istenmeyen, ürüne ve/veya işleve zarar (hasar) verme potansiyeli olan, kalıp fiziksel özelliklerini, boyutlarını ve dolayısıyla üretilen parçaların kalitesini etkileyen unsurun *"aşınma"* olduğu açıktır. Bilenmesi gereken bir zımbanın veya sık sık değiştirilmesi gereken bir ovalama setinin görülen aşınma davranışları, hasar analizi konusunu daha önemli hale getirdiğinden hareketle çalışmalara triboloji ile ilgili teorik ve pratik incelemeler de dahil edilmiştir.



Şekil 2.7. Ovalama kalıbının işlenmesi

Çalışılan zımba ve ovalama kalıpları özelinde, aşınma taşıyıcı ana sistem yüzeyinden, giderek büyüme potansiyeli olan küçük parçaların mekanik olarak ayrılması olarak açıklanabilecek istenmeyen form bozukluğudur. Morfolojik olarak incelendiğinde aşınma olayına yapışma gibi benzer fiziksel değişiklikler eşlik edebilir. Ovalama kalıplarında karşımıza çıkan ve kalıp ömrünü doğrudan etkileyen abrazif ve erozif aşınma kombinasyonu, kalıp setinde sürtünme sonucu ortaya çıkar.

Sürtünmeler, tribolojik olarak 5 kategoride incelenmektedir:

1- Kuru sürtünme: Doğrudan katı-katı sürtünmesidir. Arada katı, sıvı, gaz bir madde yoktur,

2- Sınır sürtünme: Katı-katı arasında sürtünen elemanlar arasında kayganlaştırıcı ince bir film tabakasının moleküler seviyede bulunması durumu. Kayganlaştırıcı, çoğunlukla yağdır.

3- Sıvı sürtünme: Hidro yağlayıcı tabakanın takımlar elemanları arasında hiç temas oluşmamasının hidrodinamik/hidrostatik durumudur,

4- Gaz sürtünmesi: Bir gaz marifetiyle aerodinamik/aerostatik olarak hacimsel olarak elemanlar ayrılmıştır,

Hibrit (melez) sürtünme: Yukarıdaki sürtünmelerin en az ikisinin bir arada bulunarak oluşan sürtünme modelidir [191].

Çalışmalar sadece sıvı orijinli çelik cinsleri ile yapılmış, ayrı bir konu olduğundan Toz Metalurji (T/M) dahil edilmemiştir. Özellikle nitrür kaplamalar kalıpçılık sektöründe çok

kullanılmaktadır. Çalışmalar malzeme seçimi temeline dayandığından deney numunelerinde kaplama kullanılmamıştır. Nihayet, kalıp yapımında kalıpçılık endüstrisinde neredeyse tüm uygulamaların kritik dönüm noktası uygulanan ısıl işlemdir. En iyi çeliğe yapılacak yetersiz ısıl işlem ile bu çeliğin karşılığı olan gerçek başarıyı yakalamak imkansızdır. Aynı şekilde, uygun olmayan çelik için de herhangi bir ısıl işlem protokolünün yararından söz edilemez. Seçilen çeliklerin, gerçek sertifikalara sahip piyasadan temin edilebilecek en iyi çelikler olduğu yapılan çok sayıda kimyasal analiz yoluyla kompozisyonları doğrulanmıştır. Tüm deney numunelerine standart ısıl işlemler uygulanmış, minimum 59 HRC hedeflenmiş, ortalama 60-61 HRC değerler tespit edilmiş olup hem sahanın endüstriyel pratiğine hem de çalışmalar için yol gösteren bilimsel teorilere uygundur.

Çelikler, tüm metallerde olduğu gibi ısıl işlem sürecinde doğal olarak iki tür temel değişikliğe uğrarlar: Mikroyapı ve fiziksel (boyutsal) değişiklikler. Her ikisinin de denetimi gerekliyse de boyut değişikliği, mikroyapısal değişikliklerden daha hassas değerlendirilirler. Isıl işlem öncesi malzemeye ödenen bedel, tasarıma harcanan zaman, mekanik işlemler masrafları ile birleştiğinde ısıl işlemlerde yapılacak geri dönüşsüz bir yanlışlık, zararı çarpan etkisi ile arttırır. Bu nedenle nedenler ve çözümlerle birlikte ısıl işlemler sırasında meydana gelen form bozukluklarını mümkün olduğu kadar sıfıra yaklaştırmak, diğer bir deyişle kabul edilebilir toleranslar dahilinde oluşumunu sağlamak gereklidir. Dikkate alınması gereken bir diğer önemli konu da sıcak veya soğuk, haddelenmiş ürünlerde hadde yönü gözönüne alınmalıdır. Takım oluşturacak şekilde birbirini tamamlayacak tüm özdeş parçalar ve birden fazla sayıda gerekli olan tüm parçaların hadde yönlerinin aynı eksende yönlendirilmesi zorunludur.

Tüm çeliklerde ısıl işlemler disiplini denince, malzemenin bir önceki imalat aşamasından kaynaklanan iç gerilimleri azaltan ve/veya sertlik (dayanım), süneklik ve tokluk gibi malzeme özelliklerini değiştiren zaman ve sıcaklık kontrollü işlemleri ilk akla gelen özet anlatımdır. En yaygın ısıl işlem temel işlemler ise tavlama, su verme, menevişleme (temperleme) ve yüzey sertleştirme olarak üst başlık kategorilere ayrılır.

Tavlama: Bir malzeme soğuk veya sıcak herhangi bit termomekanik işleme tabi tutulduğuna malzeme içerisinde gerilmeler oluşur ve ek olarak, malzeme genellikle bu çalışma işlemlerinin bir sonucu olarak kimi zaman da arzu edilmeyen eski halinden daha

yüksek bir sertliğe ulaşır. Bu işlemler, malzemenin yapısını, denge diyagramında temsil edilmeyecek şekilde değiştirir. Tam tavlama ve normalleştirme, malzemenin denge diyagramına göre dönüşmesine izin veren bir ısıtma işlemidir. Tavlanacak malzeme, kritik sıcaklığın yaklaşık 30-40°C üzerinde bir sıcaklığa ısıtılır. Bu sıcaklıkta, karbonun malzeme içerisinde tam çözünebilmesi ve dağılması için yeterli bir süre tanınır.

İş parçası olan çelik daha sonra, genellikle ısıtma işleminin yapıldığı fırında yavaş yavaş soğumaya bırakılır. Burada kriter beklenen dönüşümün tamamlanmış olmasıdır. Tamamlandıysa, tam tavlama olarak adlandırılır. Tavlama, bir malzemeyi yumuşatmak, artık gerilimleri azaltmak ve tane yapısını iyileştirmek ve daha sünek hale getirmek için yapılan zorunlu bir işlemdir.

Normalizasyon: Tam tavlamadan (fırın içinde soğumaya bırakmaktan) farklı olarak normalleştirme de tavlamanın devamı bir işlem olarak kabul edilir. Normalize edilecek parçalar, tam tavlamadan biraz daha yüksek bir sıcaklığa kadar ısıtılabilir. Böylelikle eğer düşük karbonlu bir çelik ise daha kolay işlenen daha iri taneli bir yapı elde edilmesini sağlamayı amaçlayan bir süreçdir. Normalleştirme işlemininin tam tavlamadan yegâne farkı; fırında ısıtılan iş parçası, fırından çıkarıldıktan sonra oda sıcaklığında durgun havada soğutulur. Soğuma süresi parçanın boyutlarına ve fiziksel şekline bağlıdır. Bu soğutma tam tavlamada kullanılan yavaş soğutmadan daha hızlı olduğundan, denge için daha az zaman kalır, bu nedenle de malzeme tam tavlanmış çelikten daha sert olur. Normalleştirme, genellikle çelik için son işlem işlem olarak kullanılan yaygın bir işlemdir.

Su Verme: Tam tavlanmış veya normalize edilmiş çeliklerde mikroyapı içerdiği karbon oranına göre değişebilecek belirli oranlarda ferrit, sementit ve/veya perlitten oluşur. Soğuma hızına göre çeliğin sertliği, tam tavlama yapılmadığında perlitin yerini alan yapıya bağlıdır. Tam tavlamanın olmaması, daha hızlı bir soğutma hızını gösterir. Soğuma hızı sertliği belirleyen faktördür. Ani/hızlı soğutma işlemine su verme denir. Su verme için en yaygın kullanılan iki ortam su ve yağdır. Yağda su verme suya göre daha yavaştır ancak soğutulan parçanın nesnenin hızlı genişlemesinden kaynaklanabilmesi olası çatlakları önler. Suda ani soğutma genellikle karbon çelikleri ve orta karbonlu-düşük alaşımlı çelikler için kullanılır

Su vermek ile hedeflenen amaç, östenitin soğutulduğu zaman anında perlite

dönüşmemesidir. 500°C'nin altında dönüşüm durduğundan, malzemeyi daha düşük bir sıcaklığa hızla soğutmak suretiyle önlenebilir. Malzeme 1000°C üstü sıcaklıklarda östenit fazında iken (akkor hali) hızla 200°C veya altına soğutulduğunda östenit, martensit adı verilen bir yapıya dönüşür. Martensit, ferrit içinde aşırı doymuş katı bir karbon çözeltisidir ve çeliğin en sert ve en güçlü şeklidir. Çelik hızla 300 ile 500°C arasındaki bir sıcaklığa soğutulur ve orada yeterli bir süre tutulursa, ostenit, genellikle beynit (bainite) olarak adlandırılan bir malzemeye dönüşür. Beynit, perlit ve martensit arasında bir ara yapıdır [Martensit ve beynit birer faz değil, yapıdır, östenit bir fazdır/AÜ] Kullanılan sıcaklığa bağlı olarak verilen sıcaklıklar arasında tanımlanabilecek birkaç yapı olmasına rağmen, bunlar toplu olarak beynit olarak bilinir. Bu dönüşüm sıcaklığının seçilmesiyle, hemen hemen her türlü yapı varyasyonu elde edilebilir. Bunlar kaba perlitten ince martenzite kadar değişir [192].

Menevişleme (Temperleme): Sertleştirmeden sonra oluşan iç gerilmeler ve tokluk özelliği arzu edilen seviyelerde olmadığından kalıp çeliklerini doğrudan kullanmak mümkün değildir. Bu nedenle, takım çelikleri sertleştirilmiş koşullarda nadiren kullanılır. Sertliği ve tokluğu optimum değerlere getirmek için en az bir, bazen birden çok kez yapılan bu işleme Menevişleme (Temperleme) denir.

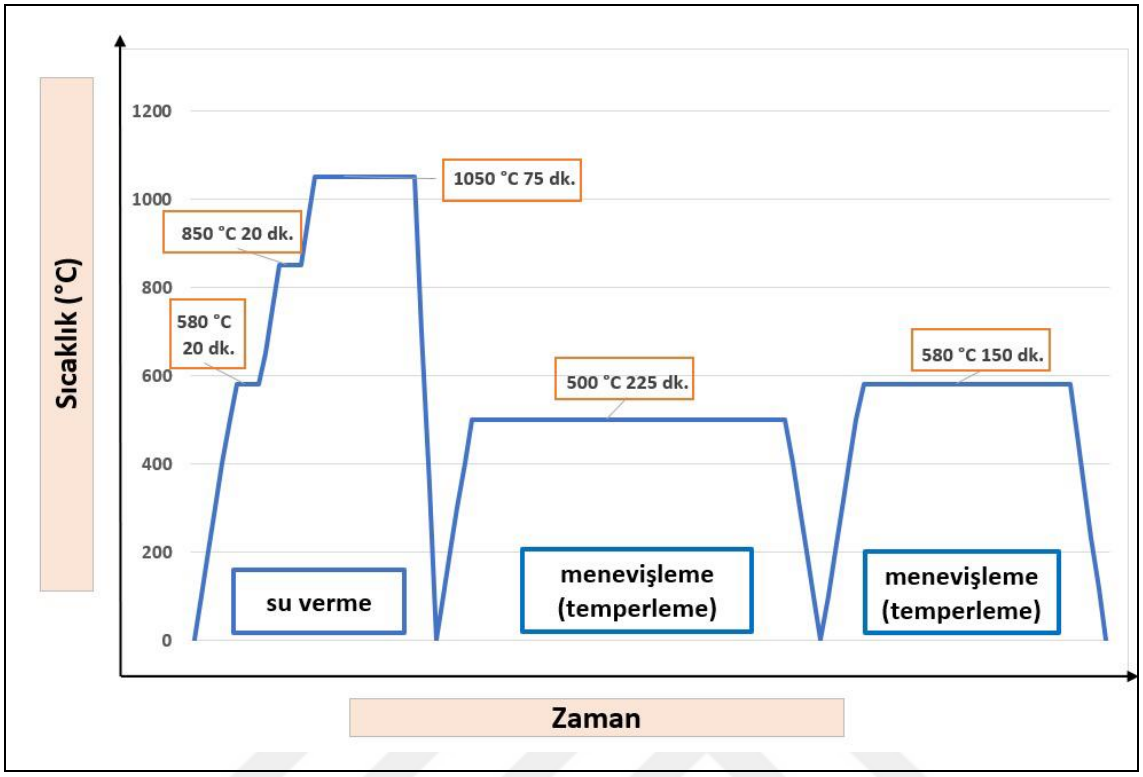
Sertliği ayarlamak ve özellikle tokluğu artırmak için tipik olarak 200°C ile 650°C arasında gerçekleştirilen bu işlemde sertlik beklenildiği üzere düşer, kırılganlık azalır, darbe dayanımı, aşınma direnci ile tokluk artar.

Menevişleme, genellikle yüzeyde tufal oluşmaması için vakum fırınlarında o çelik cinsi için gerekli işlem sıcaklığına kadar ısıtmayı ve ardından havayla soğutmayı içeren aslında oldukça basit gibi görünen bir işlemdir. Tufal oluşumuna ayrıca değinilecektir. Bu işlem ya da işlemler dizisi sürecinde herhangi bir karmaşıklık bulunmamakla birlikte, takım çeliklerinde hedeflenen son iç mikroyapısal dönüşümleri de beraberinde getirdiği için menevişleme çok önemlidir. Bu nedenle de bu adımdaki olabilecek kusurlar takım devreye alınmadan önce giderilmelidir.

İşlemlerin usulüne uygun şekilde yapılabilmesini teminen nihai kalite ile yakından ilgili olan şu konular çok önemlidir: (1) sertlikteki azalma ve ikincil sertleşme mekanizması,

(2) İmalatı yapılacak kalıp tasarımı perspektifi ile takım çelikleri üzerindeki etkileri, (3)

kalıntı östenit düzeyi, ve (4) çoklu menevişleme işlemlerine duyulan gereksinim [193].

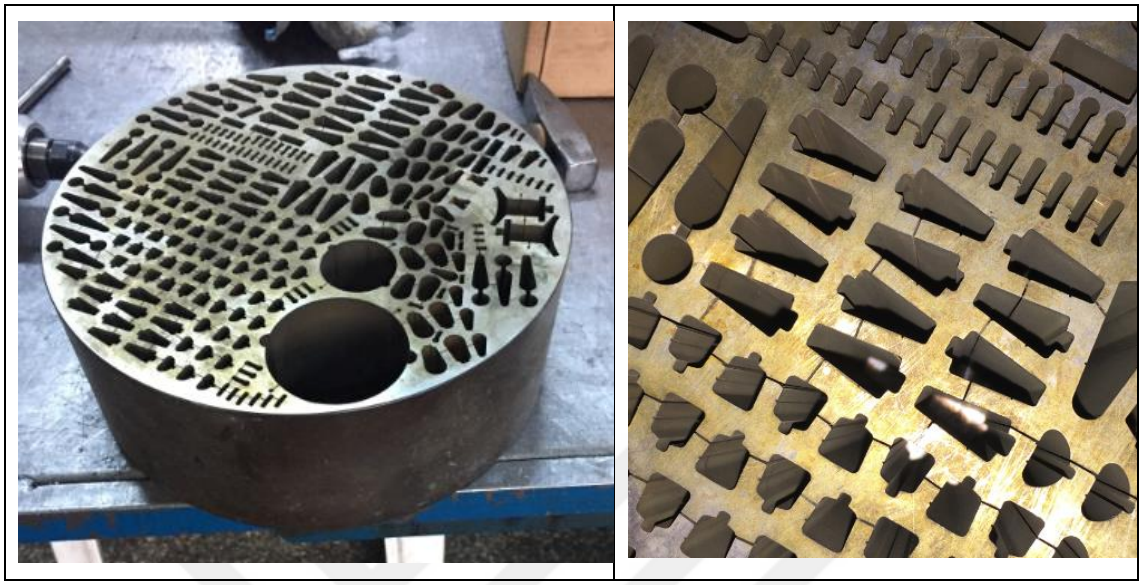


Şekil 2.8. Isıl işlem uygulaması protokolü grafiği

Her ne kadar menevişleme, hızlı soğutma ile sertleştirilmiş çeliklerde sertlikte azalma, süneklik ve toklukta artış sağlamak için yapılan bir işlem olarak tanımlanabilirse ve bu yanlış olmamakla birlikte, bu işlemin kendine özgü özel hassas yönleri olduğu dikkate alınmalıdır. Başlangıçtaki martensit oluşumunun karbon difüzyon transformasyon kinetiği, yeni yapıda sementit (demir karbür) ve en az bu kadar önem taşıyan alaşımlı takım çeliklerine özgü ikincil karbürlerin çökelmesi menevişlemenin en temel amaçlarından biridir. Her şeyden önce, martensitin kararlı bir yapı olmadığı, metastabil bir yapı olduğu dikkate alındığında, dönüşüm için yeterli süre ve gerekli minimum sıcaklık sağlandığında karbon martensitten uzaklaşacak ve yeni yapıya dönüşme eğilimi göstererek kararlı yapıda karbürler oluşturacaktır. Su verilmiş çelikte sertliği sağlayan ana sistem, martensisit içerisinde bulunan karbon olduğundan ve bunlar da menevişleme sırasında yapıyı terkedeceğinden aşırı sertlik durumu ortadan kalkar. Burada en temel iki parametre yeterli zaman ve sıcaklıktır. Bizim uygulamamızda, zımba yapımında kullanılan 100 mm kalınlığında ø300 mm yuvarlak takoz için aşağıdaki süre ve sıcaklık uygulanmış ve minimum 60 HRC sertlik elde edilmiştir.

Birinci menevişleme: 3 saat 45 dakika 500°C

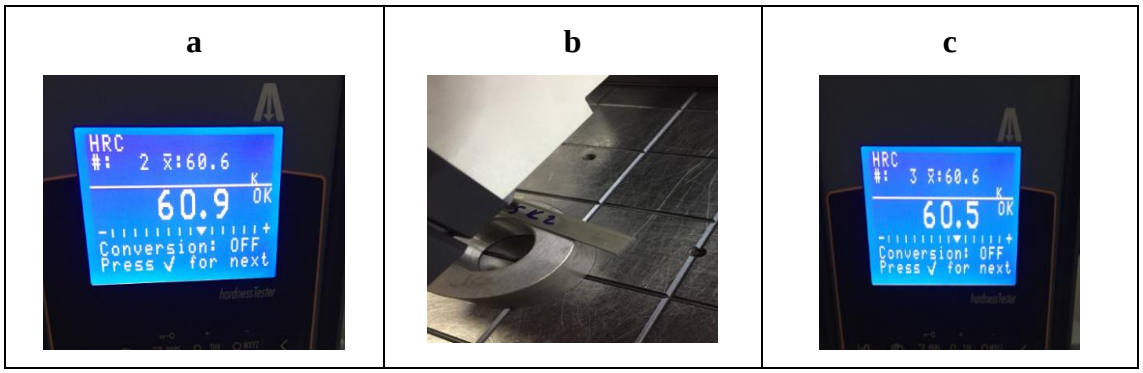
İkinci menevişleme: 2 saat 30 dakika 580°C



Şekil 2.9. Tel erozyon ile zımba çıkartılan ısıl işlemli ø300x100 mm takoz

Menevişlemede sıcaklık ve süre, malzemeye ve yapılacak iş için öngörülen mekanik özelliklere göre kritik önem taşıyan iki temel parametredir. Bir çalışmada, bir tam gün (24 saat) 560 ºC'de uygulaması yapılan menevişlemede makul bir mikroyapı değişikliği görülmeyen parça için 5 dakika gibi kısa bir sürede 700 ºC'de karbürlerin çökeldiği ifade edilmiştir [194].

Isıl işlemler takım çeliklerinde hassasiyetle üzerinde durulması gereken belki de en önemli aşamadır. Menevişlemede karbürlerin hacimsel oranları artarken işlevsel farklılıkları da avantaj olarak görünür olmaktadır. Su verme sonrası takım çeliği en yüksek sertlik değerine ulaşır. İlk menevişlemede ise sertlikte küçük bir azalma görülürken karbürler çökelmekte ve matris içinde yerlerini almaktadır. İkinci menevişlemede ise, ikincil sertleşme sağlanır. Su verme + çift menevişleme ise aşınma direncinde artış olarak yansır [195].



Şekil 2.10. Sertlik ölçümleri (a) Takoz değeri (b) Zımba ölçümü (c) Zımba değeri

Kalıp yapımında kullanılan tüm takım çeliklerinin en can alıcı imalat aşamaları parametrelerinden biri kullanılacak malzemelere uygulanan ısıl işlemlerdir. Genel olarak sahada karar vericiler, malzemenin sadece "sertlik" özelliği ile tercihlerine yön vermektedir. "Sertlik" veya maksimum sertlik zaman zaman "sertleşebilirlik" kavramı ile karıştırılmaktadır. Sertlik, bir metalin, içine işlemeye (penetration, nüfuz etmeye) karşı direnme kabiliyetini gösteren ve sayısal değeri olan bir ölçüdür. Bir çelikte elde edilebilecek sertlik değeri içerdiği karbon miktarı ve soğuma hızı ile doğrudan ilgilidir. Sıcaklık ölçmede Celcius, Fahrenheit, Kelvin dereceler örneğinde olduğu gibi, birbirlerine hesaplama yoluyla çevrilebilen Brinell, Rockwell, Vickers olarak adlandırılan bir dizi standart testten herhangi birinin sonucu ile ifade edilir. Sertleşebilirlik ise, tavlama sıcaklığından su verme ile metalin sertlik seviyesinin dağılımını belirleyen bir özelliktir. Ani soğutma koşullarında belirli bir sertlik seviyesinin korunduğu derinlik, karbon başta olmak üzere kimyasal kompozisyonu oluşturan tüm alaşım elementlerinin ve soğuma hızının bir fonksiyonudur. Bu özellik, bizim SİTÇ analiz çalışmalarımız perspektifi ile bakıldığında; incelemeleri yapılan çeliklerin geleneksel D2'ye göre yeni nesil C2 ve K2 çeliklerinde; azalan krom ve vanadyum, artan molibden ve silisyum ile ayrıca eklenen niobyum ve alüminyum olmak üzere değişik kimyasal alaşımlama elementlerindeki farklılıklar yardımıyla sertleşebilirlik ögesinin performansa yaptığı katkı açıklanabilir. Gerekenden daha fazla oranda herhangi bir alaşım elemanı kullanmak aynı oranda olumlu katkı sağlamayacağı gibi ısıl işlemler sırasında hedeflenen mikroyapı tutturulamaz, giderek çatlaklar bile olabileceği için faydalı değil zararlı bir uygulama bile olabilir.

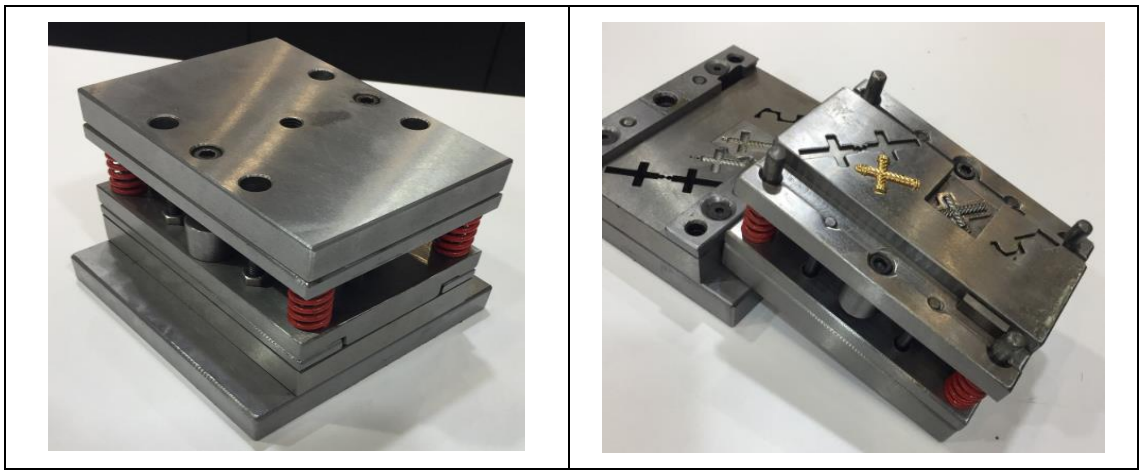
Günümüzde birçok patlatma zımbası hazır olarak bulunabilmekteyse de özel tasarım profil geometrisi gerektiren bizim çalışmalarımız için uygun değildir. Standart zımbalar için Alman DIN 9861-1 (1992) 20 mm'ye kadar düz/yuvarlak, DIN 9861-2 (1992) 5,5

mm'ye kadar kademeli/yuvarlak) ve Uluslararası ISO 8020 (2002), ISO 6752 (2008), ISO 9181 (2007), ISO 8977 (2003) muhtelif standartlar ve bunlara göre üretilmiş kalıp elemanları piyasada satılmaktadır. Konu ile ilgili Alman standartları ise DIN 5118 (2017) ve DIN 9845 (2013) gibi başka örnekler de bulunmaktadır.



Şekil 2.11. Ø4,0 mm DIN 1.3343 HSS Havşa Başlı Patlama Zımbası ve Tel Erozyon ile işleme sonrası 1,2 mm Kesici Zımba

Soğuk iş takım çeliklerinin önemli kullanımm alanlarından biri de kuyumculuk sektörüdür. Şekil 2.12 İmalatların küçük atölyelerde yapıldığı ve ağırlıklı olarak D2 çeliğinin kullanıldığı gözlenmiştir.



Şekil 2.12. Kuyumculukta yapılan mücevherat kalıbı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Elektrik Sacı Laminasyon İmalatı

Karmaşık geometrik şekillerin oluşturduğu ve çok sayıda seri üretilmesi gereken metal sacların kesilmesi, delinmesi gibi sıcak veya soğuk şekillendirme işlemleri takım çelikleri kullanılarak imal edilmiş metal kalıplar yardımıyla, yüksek tonajlı baskı makinelerinde yapılmaktadır. Delme, kesme, bükme gibi şekillendirmeler için basınç kullanarak özdeş makine elemanlarını en az işgücü ile çok sayıda, hızlı ve ölçü toleransları tam olarak imal eden makinelere pres kalıpları denir.

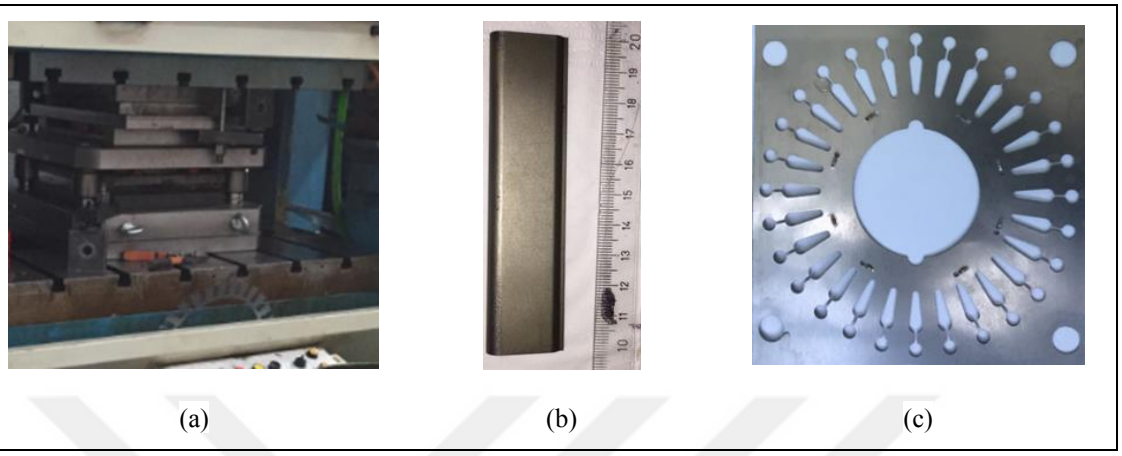
Kalıpların takıldığı baskı makineleri ile ayrıca biçimlendirme, dilimleme, kabartma, basma, çentik açma, tıraşlama, düzeltme, kıvırma gibi farklı işlemler, imalat sanayi dışında da, gıda sektörü, paketleme, tekstil, savunma, otomotiv, havacılık gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışma sistemleri, elektro-mekanik, pnömatik, hidrolik veya bunların kombinasyonudur.

Elektrik-Elektronik, beyaz eşya, otomotiv vb. endüstrilerde yaygın olarak kullanılmakta olan özdeş parçaların çeşitli farklı profillerde imalatı sırasında kesme/delme işlemleri için "zımba" kullanılmaktadır. Kalıp düzeneklerinin kurulması ve sökülmesi ile işlevselliğini yitirmiş bir zımbanın takılı bulunduğu erkek/dişi kalıp setinin bağlı olduğu baskı makinesinden ayrılması sürelerinin makul sıklıklarda olması istenir. Bu nedenle, bir saniyede birden çok kez "tekrar eden yük" altında seri olarak çalışan bu kalıp bileşeninin aşınmasının öngörülmesi, azaltılması kısaca denetlenmesi ve maliyet açısından kalıp takım çeliğinin malzeme seçimi çok önemlidir. Fire ve hasar oranları da maliyeti arttıran en önemli unsurların başında gelmektedir.

İstanbul Ümraniye Dudullu İMES Organize Sanayi Bölgesinde 35 yıldan bu yana kalıp imalatı yapan Mebsan Kalıp ve Tel Erozyon firması özellikle Sac Metal İşleme (Sheet Metal Forming) kalıpçılığı konusunda çalışmaktadır. Baskı kalitesinin ön planda olduğu, elektrik motorlarının ana elemanlarından rotor ve statoru çoklu katmanlar halinde oluşturan laminasyon saclarının kalıpları üretiminde uzmanlaşmıştır.

Üretimi yapılan "rotor" ve "stator" parçaların kalıp, zımba ve numune örneklerine ait gerçek parçalar Şekil 2.13'de verilmiştir. Zımba malzemesi olarak kullanılan 3 farklı SİTÇ'nin çapak oluşumuna yol açmadan üretebildikleri maksimum parça sayısı

ömürlerini belirlemede kullanılmıştır. Bununla birlikte söz konusu zımba malzemelerinden Rockwell (HRC) sertlik ölçümleri alınıp karşılaştırılmıştır. Değerler 3 ölçümün ortalamasıdır.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan (a) Sac metal kesme kalıbı, (b) Kullanılan zımba ve (c) Basılan örnek parça

Bunlara ek olarak zımba malzemelerinin mikroyapıları da standart metalografik numune hazırlama prosedürlerinden geçirilerek Borusan ve ArcelorMittal ortak kuruluşu Borçelik Çelik Sanayii Ticaret A.Ş'nin Gemlik/Bursa'daki görüntüleme merkezinde taramalı elektron mikroskopu (SEM)/ enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDS) (Zeiss Sigma 300 Gemini FEG SEM) yardımıyla incelenmiştir. SİTÇ'nde oluşabilecek karbür yapıları FactSage 8.2 termodinamik analiz programı ile incelenmiştir.

Zımba ömrünü belirleyen en önemli bulgu belli bir basım sayısından sonra zımbada meydana gelen bozulma ve bunun neticesinde üretilen parçalarda çapaklanma başlamasıdır [196].

Çapak oluştuğu düşünüldüğünde elektrik çeliklerinin şekillendirilmesinde zımbanın kendi dahil kalıp ekipmanları kadar, belki de onlardan daha fazla sacın karakteristiklerinin önemi vardır; zira nihai ürün odur. Genel olarak 'işlenebilme' olarak adlandırabileceğimiz fiziksel özellikler ile elektromanyetik ve kimyasal özellikler, tasarımcının optimumu arayacağı birincil unsurlardır. Ayrıca, sacta herhangi bir eğrilik veya kirlilik oluşturabilecek cisimler basma verimini olumsuz yönde etkiler.

Kullanılan zımba malzemelerine göre çapak problemi yaşamadan basılabilen parça sayıları yaklaşık olarak Tablo 3.1'de verilmiştir. En kısa kullanım ömrüne sahip olan

geleneksel takım çeliği D2'dir. Bununla birlikte en uzun süreli kullanım ömrü sunan ise yeni nesil K2 takım çeliğidir.

Tablo 3.1. Zımba malzemesine göre basılabilen ürün sayısı

Zımba Malzemesi	Basılabilen ürün sayısı
D2 (1.2379)	112 500
C2	203 000
K2	224 000

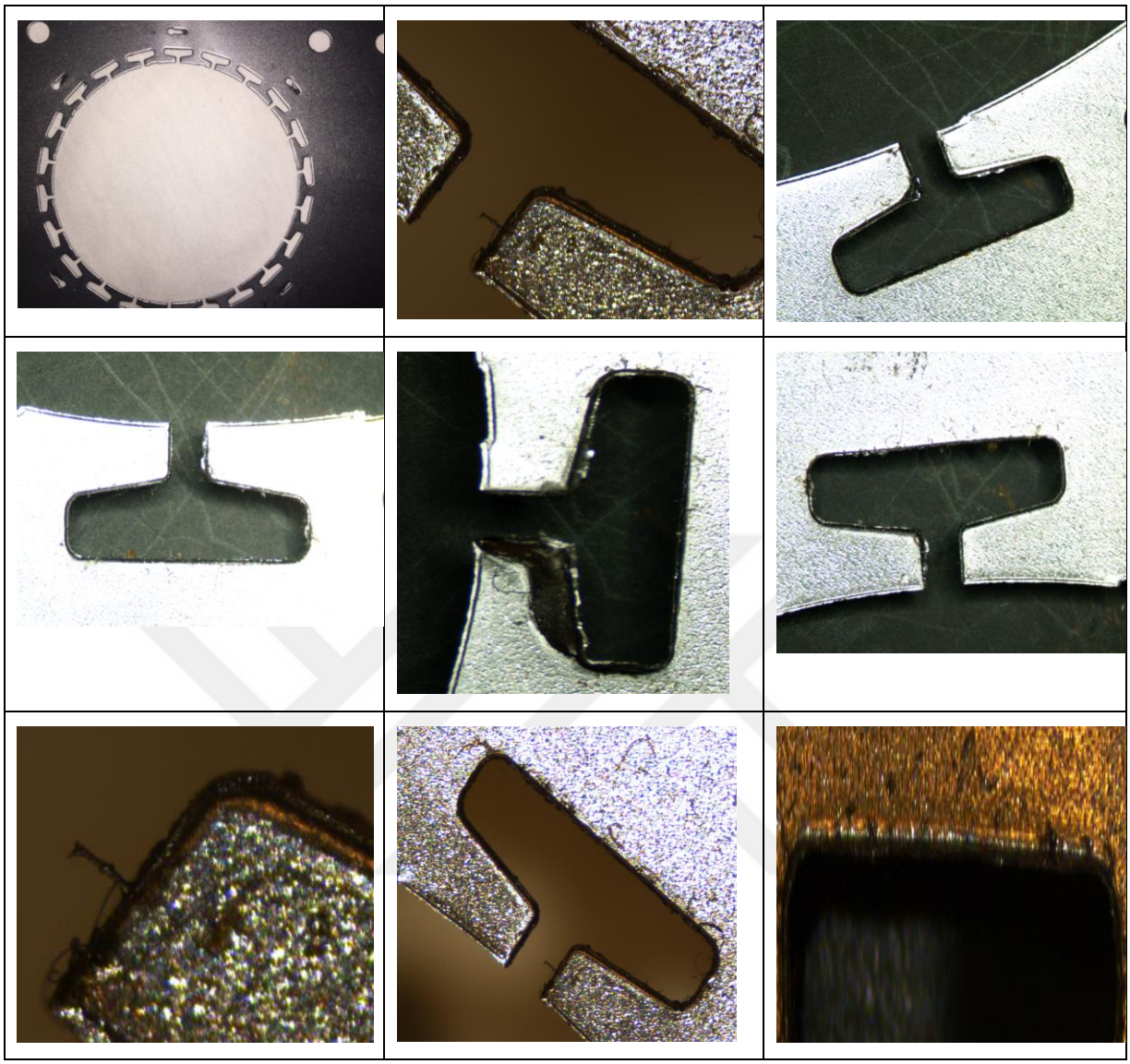
Şekil 3.2'de maksimum basım sayısına ulaştıktan sonra kullanılmaya devam eden zımbalar ile elde edilen parçanın makro görüntüsü verilmektedir. Zımbalar bu noktadan sonra kullanıldığında üründe çapak oluşumu başlamaktadır ve ürün kalitesi bozulmaktadır. Bu durum, sürtünme yapışması ya da yapışma aşınması olarak da adlandırılmaktadır [197].

Zımba malzemelerinin sertlik değerleri ortalama olarak Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Zımba malzemesine göre ölçülen sertlik değerleri

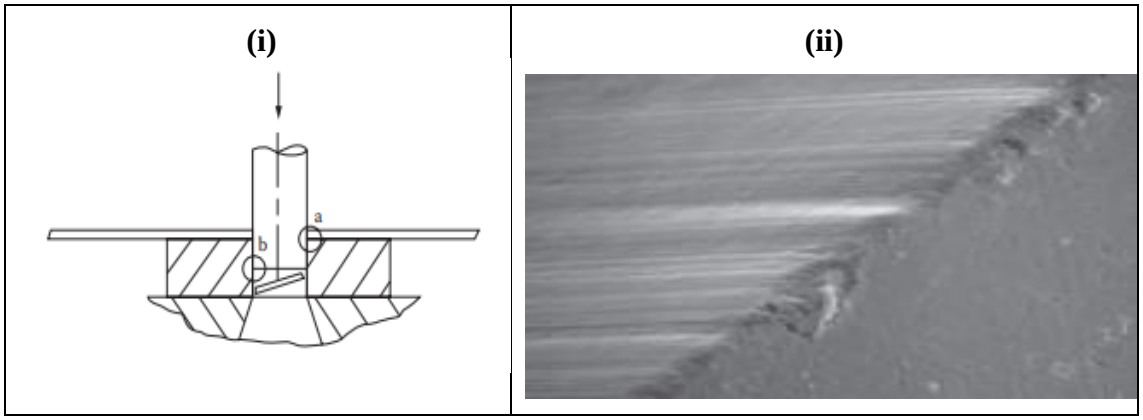
Zımba Malzemesi	Sertlik (HRC)
D2 (1.2379)	60.4
C2	61.2
K2	61.7

Laminasyon imalatında 'ürün odaklı' çalışma olduğundan, yapılan ölçümlerde pres makinesinden çıkan ürünlerde oluşan çapak yüksekliği kabul edilebilir sınırları aşmaya başlama ihtimali belirdiğinde zımba keskinliğini kaybetmiş, kenarlar mikro kırılma(lar) şeklinde (şekil) yuvarlanmaya başlamış olduğundan üretim durdurularak zımba bilemeye gönderilir.



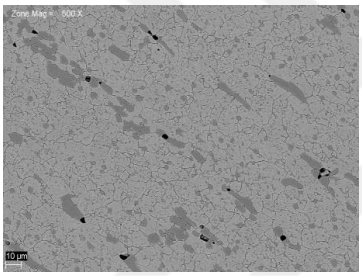
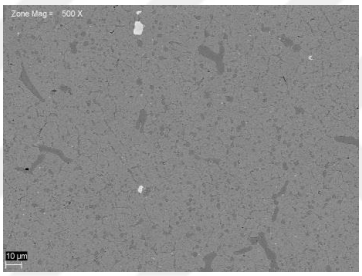
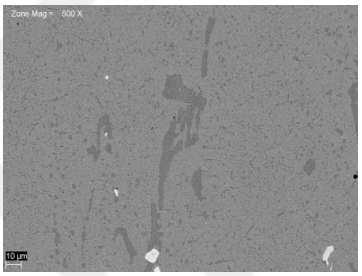
Şekil 3.2. Kullanım ömrü dolan zımba ile basılan hasarlı ürünlerde çapak stereo mikroskop görüntüsüleri

Saç metal şekillendirmede üç tür aşınmanın bileşkesi görülür: Yapışma aşınması, darbe aşınması ve yenme aşınması, genel olarak bir "kesme" işlemi yapılan tüm metal işleme aletlerinde geçerlidir. Darbe aşınması, zımba keskin kenarlarındaki yenme ve mikro kırılma potansiyelinin zor öngörülebilir olması nedeniyle denetimi en zor olandır. Yapışma aşınması laminasyonda, erozif aşınma kesici zımbada etkindir. Bunun dışında ortamdaki yağlayıcıların taşıdığı kirlilikler de bir aşındırma ajanı gibi davranabilir. Şekil 3.3 (i)'de aşınmanın kaynakları olan bölgeler: (a) kalıp üzerinde, (b) zımba üzerinde ve (ii)'de aşınmış zımba kenarı gösterilmektedir [198]**.**

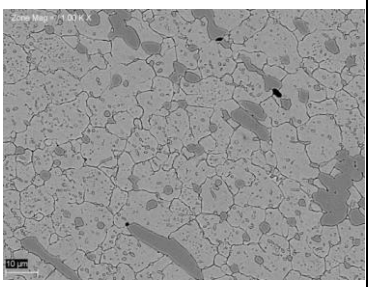
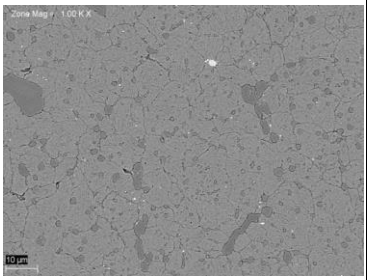
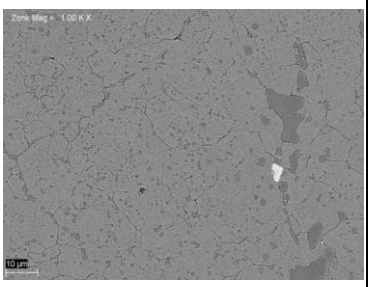
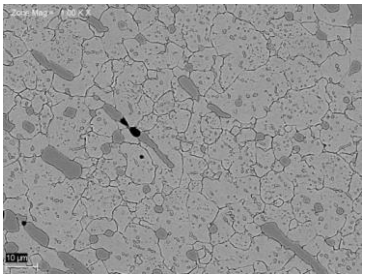
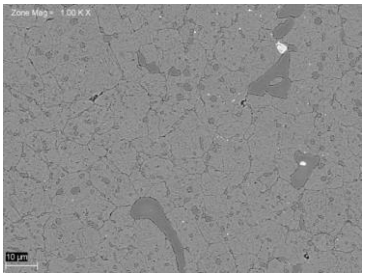
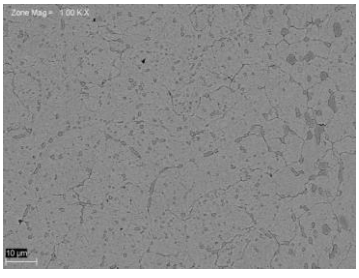


Şekil 3.3. (i) Aşınmanın kaynakları olan bölgeler, (ii) aşınmış zımba kenarı [198]

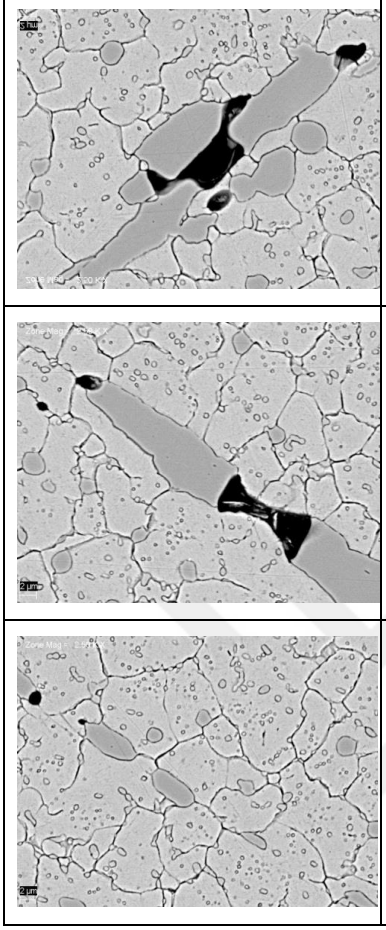
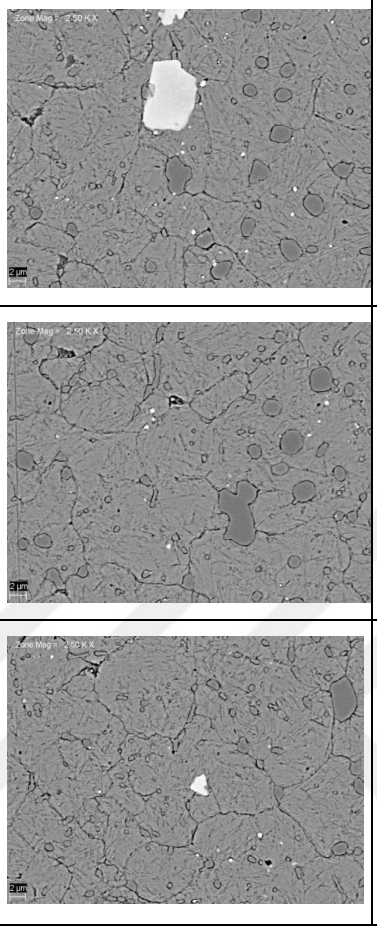
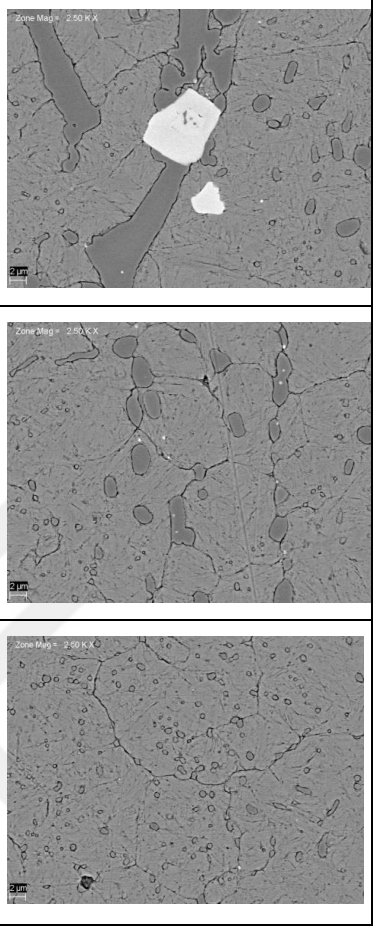
3.2. Görüntüleme Çalışmaları

D2	C2	K2
		

Şekil 3.4. 500 büyütme görüntüler

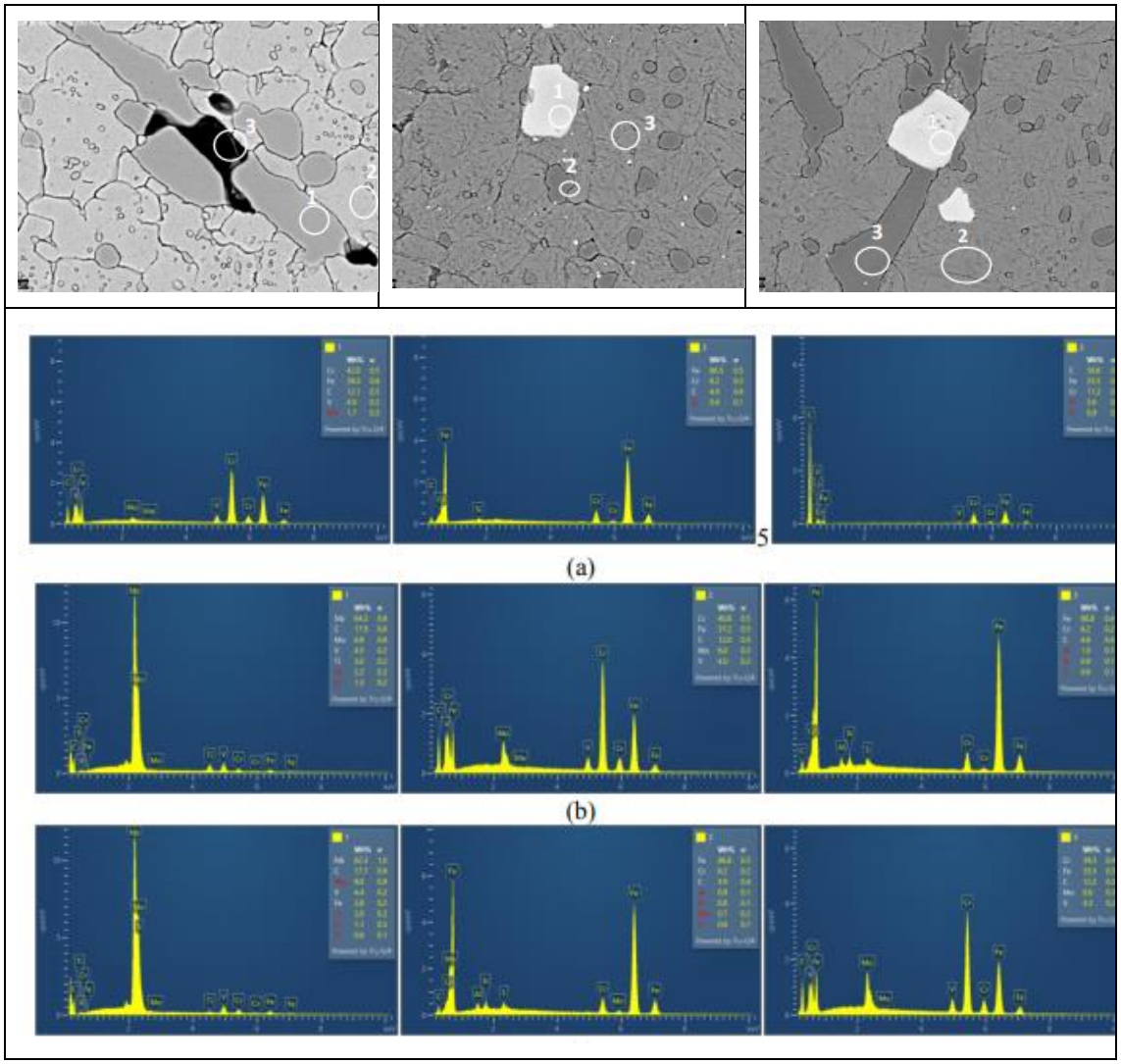
D2	C2	K2
		
		

Şekil 3.5. 1000 büyütme görüntüler

D2	C2	K2
		

Şekil 3.6. 2500 büyütme görüntüler

SİTÇ'ne ait SEM mikroyapı 500, 1000 ve 2500 büyütme görüntüleri **Şekil 3.5 Şekil Şekil** 3.6'larda verilmiştir. D2 geleneksel çeliğinin sahip olduğu ana karbür yapılarının iri taneli ve daha az homojen dağılım gösterdiği gözlemlenirken, yeni nesil SİTÇ olan C2 ve K2 çeliklerinde karbür yapılarının daha ince olduğu ve homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Karbür yapılarının daha ince ve homojen dağılım göstermesi mekanik özellikler, aşınma direnci gibi konulara olumlu yönde etki etmektedir. İnce ve eş aralıklarla dağılmış karbür yapıları tokluk direncini de artırmaktadır [209, 210]. Bu bağlamda düşünüldüğünde C2 ve K2 çeliklerinin D2'ye göre daha uzun kullanım ömrü sunması karbürlerin daha ince ve homojen dağılımı ile ilişkilendirilebilir.



Şekil 3.7. SİTÇ'e ait SEM mikro yapılarından alınan 1,2,3 numaralı alanların EDS analiz sonuçları (a) D2, (b) C2, (c) K2

Şekil 3.7'de EDS elemental analiz için seçilen bölgeler beyaz yuvarlak içerisine alınarak gösterilmiştir. Geleneksel D2 çeliğinde ana karbür yapıları M_7C_3 sisteminden oluşmaktadır. Bunlar krom ağırlıklı, vanadyum destekli karbür yapıları olabilmektedir. Şekil 3.7 (a) 1 numaralı elementel analiz sonuçları da bu durumu desteklemektedir. Geleneksel SİTÇ olan D2'den farklı olarak, yeni nesil SİTÇ'den olan C2 ve K2'de Şekil 3.7 (b) ve (c) 'de 1 numara ile gösterilen parlak yapılı iri taneli karbürlerin Şekil 3.7 (b) ve (c)'de görüleceği üzere Niobyum katkılı karbür yapıları olduğu görülmektedir ve bu tür sert karbür yapıları aşınma direnci gibi mekanik özelliklere olumlu yönde katkı yapmaktadır [211]. Bununla birlikte ana karbür yapıları incelendiğinde (Şekil 3.7 (a) 1 numara, Şekil 3.7 (b) 2 numara ve Şekil 3.7 (c) 3 numara), verilen elemental analizlerden

yeni nesil SİTÇ karbürlerinin Molibden açısından zenginleşmiş oldukları görülmektedir.

Polonya Bilim Akademisi Malzeme Enstitüsü'nde (% 0,79 C, % 24,5 Cr) kullanılarak Fe-Cr –C alaşımının karakterizasyonu üzerine yapılan bir çalışmada Cr/C oranına göre $M_{23}C_6$ ve daha sert M_7C_3 tip çokgen (poligonal) morfolojilerde karbürler oluştuğu ifade edilmiştir [199].

ABD'nde Fe-Cr-Ni ve Fe-Cr-Mo faz diyagramları üzerine yapılan bir çalışmada Molibden yönünden zengin kompozisyonların Nikel yönünden zengin kompozisyonlarla kinetiklerinin karşılaştırmasında Nikelin daha hızlı, Molibdenin ise çok daha yavaş çökeldiği anlatılmaktadır. Faz diyagramları ile ilgili sınırlı sayıda çalışma olduğu ve yeni nesil çeliklerin tasarlanabilmesi için halihazırda kullanılmakta olan çeliklerin çalışma davranışları bilgisinin gelişmelere katkı sağlayacağı vurgulanmıştır [200].

Edgar Collins Bain (Ohio 1891-Pensilvanya 1971), Amerikan Ulusal Çelik Akademisi üyesi, çelikteki Beynit (Bainite) fazı onun tarafından bulunmuş ve adı verilmiştir. Krom ve Molibden'in takım çeliklerindeki katkısı 1950'li yıllardan beri bilinmektedir: [201].

İlk baskısı 1961'de Edgar Collins Bain yazılan esere göre; Krom, karbür oluşturan bir alaşım elementi olarak urta ve yüksek karbonlu çeliklerde sertleşebilirliği ve aşınma direncini arttırır, korozyona ve oksidasyona karşı dayanım ve bir dereceye kadar yüksek sıcaklığa mukavemete olumlu katkıda bulunur. Molibden ayrıca kromdan daha etkili güçlü karbür oluşturan elementtir. Artan molibden içeriği, takım çeliklerinin yumuşamaya karşı dayanıklılığını, ayrıca tokluğu ve sertleşebilirliği artırır [202].

3.3. Vida İmalatı

M 4x50 mm sunta vidası için D2, C2 ve K2 çeliklerinden birer takım Ovalama kalıbı seti yapılmıştır. Yurt içinde yerleşik kuruluşlardan temin edilen bu malzemelere ait sertifikalar kontrol edilmiş, kimyasal analizleri doğrulanmıştır.

Bu çeliklere sırasıyla aşağıdaki işlemler uygulanır:

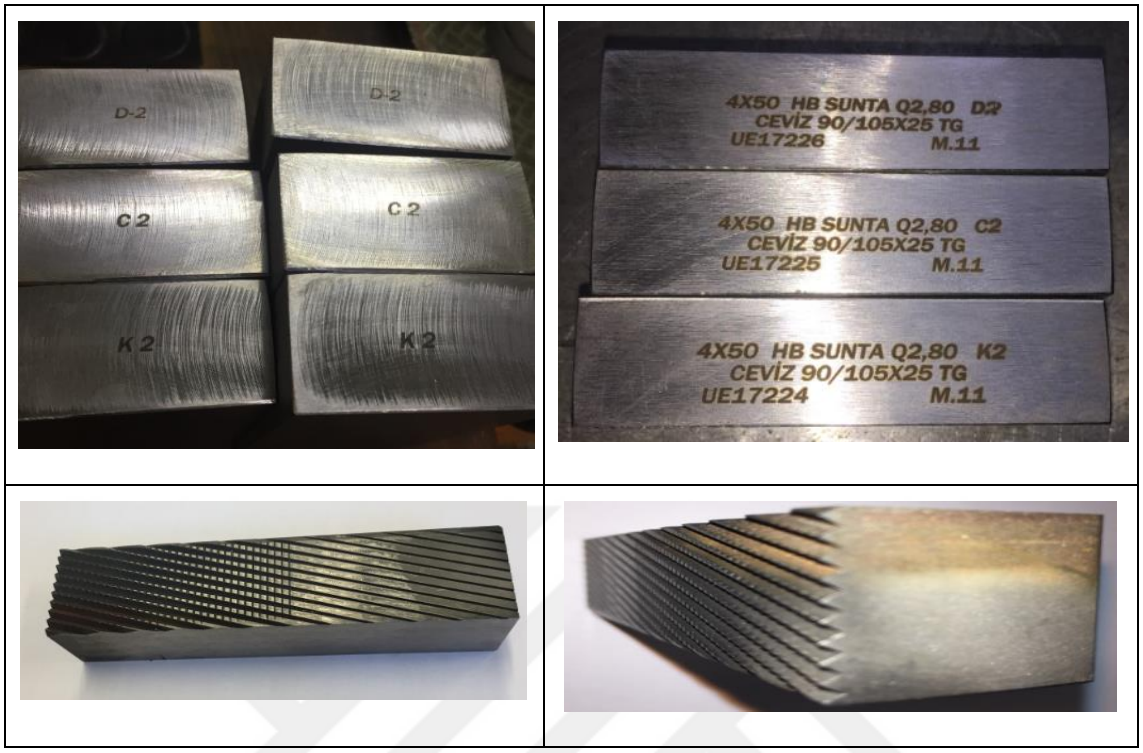
1- Frezeleme

2- Taşlama

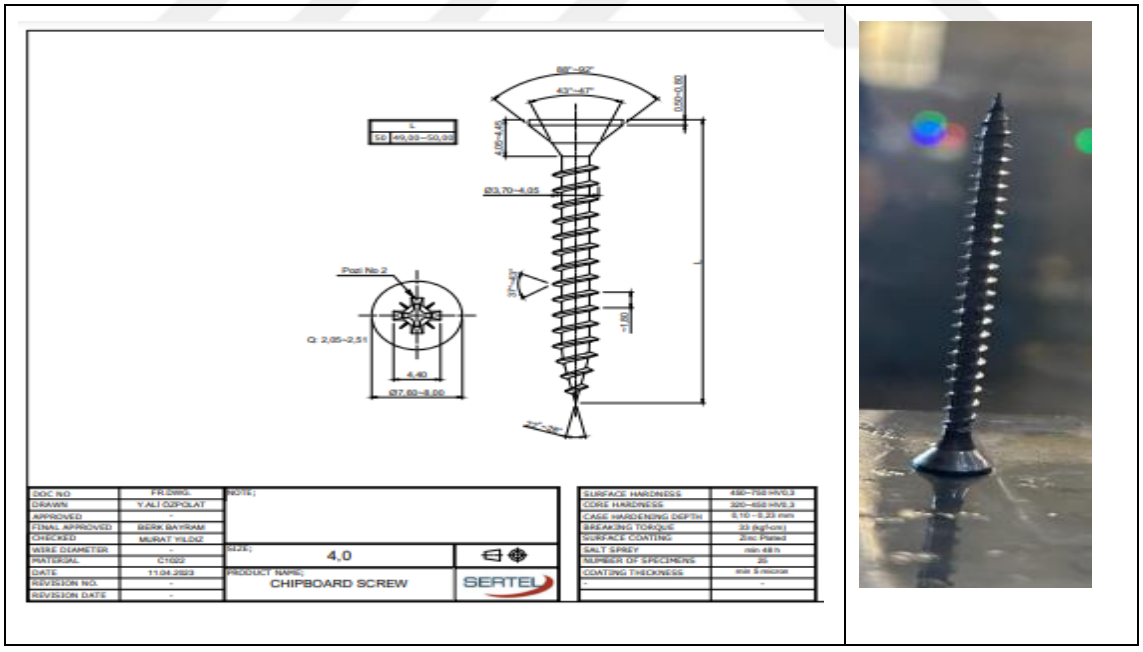
3- Profil dişler işleme

4- Tırtık (diyagonal)dişler işleme

5- Isıl işlemler, su verme ve menevişleme



Şekil 3.8. İmalatı yapılan D2, C2 ve K2 ovalama kalıp takımları



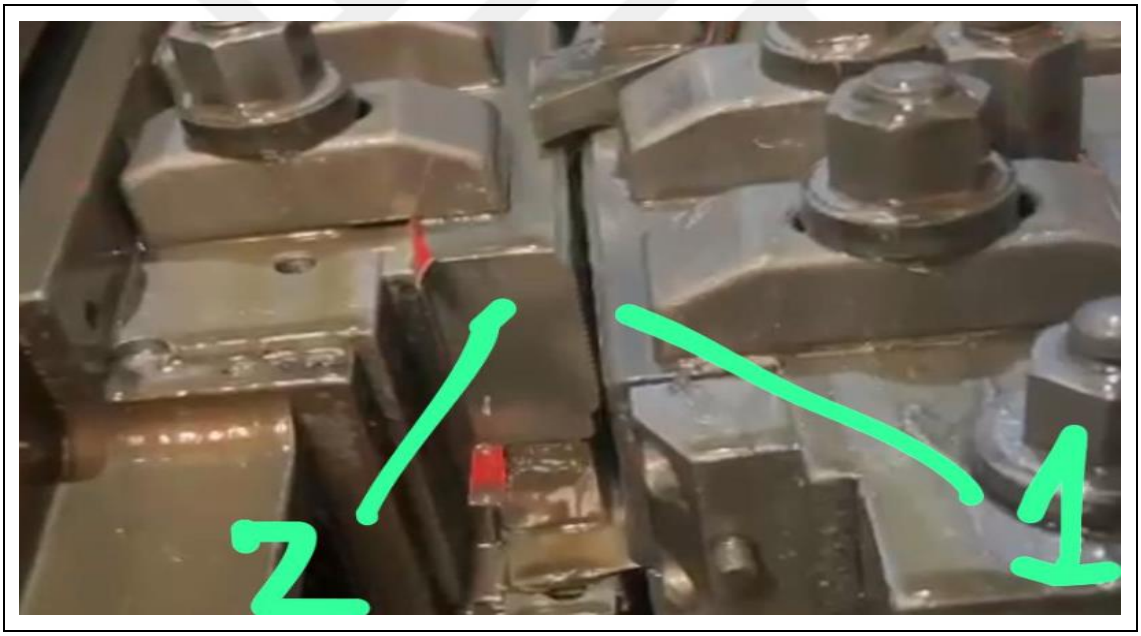
Şekil 3.9. İmalatı yapılan Ø4x50 mm sunta vidası

Vidalar Top Stability (Tayvan) marka SW5S-56 model, biri (uzun, 105 mm) sabit diğeri (kısa, 90 mm) hareketli, paralel bağlanan taraklar olmak kaydıyla yağlama sistemi ile soğutulan ve vibratör aracılığıyla beslenen, vidanın perçinleri hareketli ve hareketsiz

taraklar arasında ezilerek diş ve uç formunun oluşumunu sağlayan 4 kW elektrik motorlu makinada üretilmiştir.



Şekil 3.10. Diş açma makinası



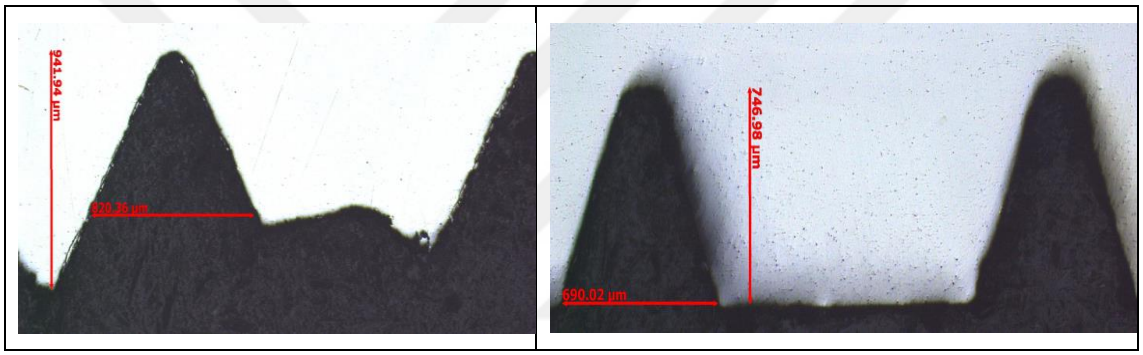
Şekil 3.11. Tezgahta kalıp takımı, sabit (1) ve hareketli (2) kalıp

Tablo 3.3. Kalıp malzemesine göre üretilebilen vida sayısı

Kalıp Malzemesi	Üretilebilen vida sayısı
D2 (1.2379)	983.800
C2	1.406.000
K2	1.861.100

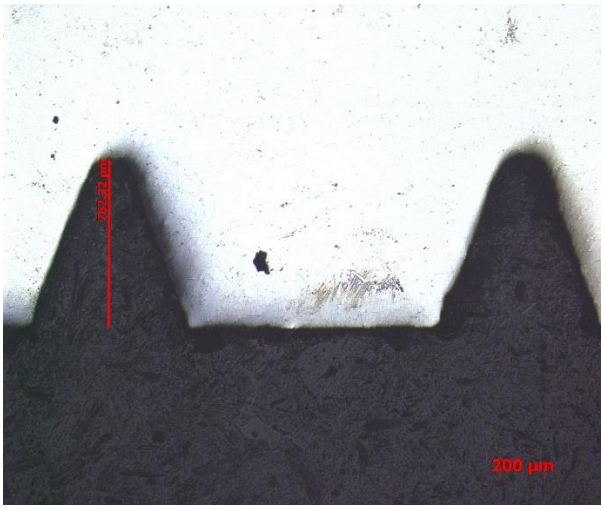
Ovalama kalıbında karakterizasyon işlemleri

Kullanım ömrünü tamamlamış ovalama kalıplarının aşınma görüntülerinde ise dişüstünün aşınmış olduğu görülmektedir. Dişin bulunduğu bölgeye bağlı olarak vida ile temas konumuna göre dişlerin farklı aşınabildiği görünmektedir.



Şekil 3.12. Kullanılmış kalıpta dişlerde farklı aşınmalar, h=942, L=820 ve h=747, L= 690 µ

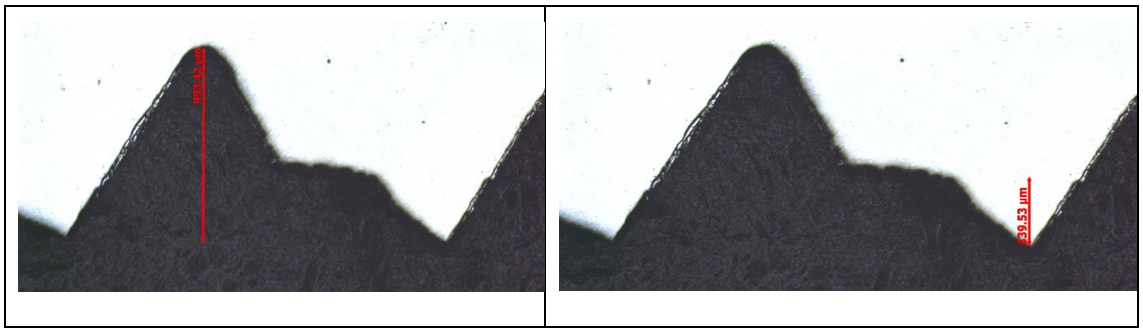
Aşınmamış bölgede dişleri halen sivri bir şekilde kendisini muhafaza ettiği görülmektedir. Aşınmış bölgede ise sivri olan dişlerin tamamen düzleştiği ve bir yüzey meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 3.13'te mikroyapı resimlerinde dişlerde meydana gelen aşınmalara bağlı yapılan ölçümler verilmiştir.



Şekil 3.13. Dişüstü 50x büyütme

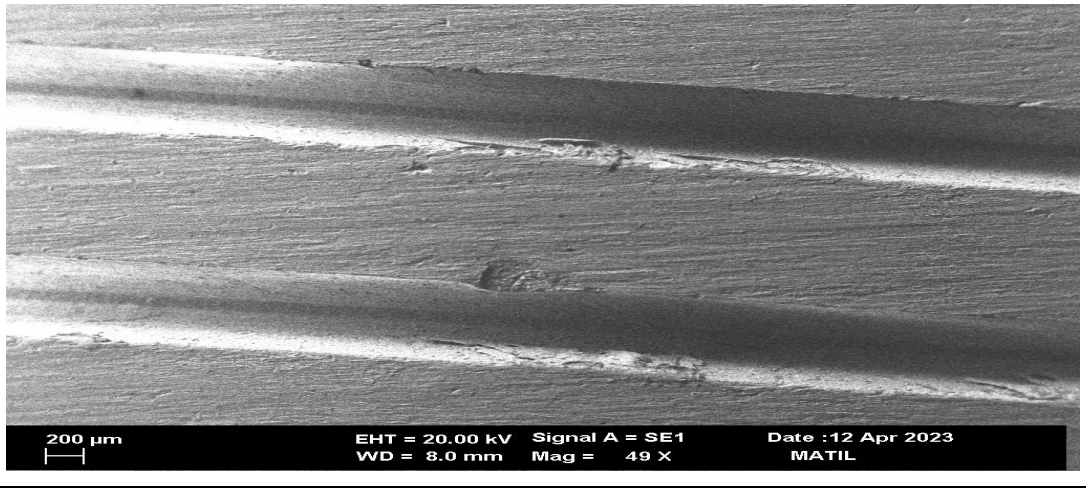
Az Aşınmış bölge toplam derinlik (µ)	Aşınmamış bölge diş boyu (µ)	Çok Aşınmış Bölge (µ)	Aşınma Miktarı (µ)
993,42	339,53	762,32	231,1

Mikroyapı resimlerinden alınan diş ölçümleri incelendiği zaman dişte meydana gelen toplam aşınma miktarının 231,1 mikron diş boyunda aşınma kaybının olduğu tespit edilmiştir.



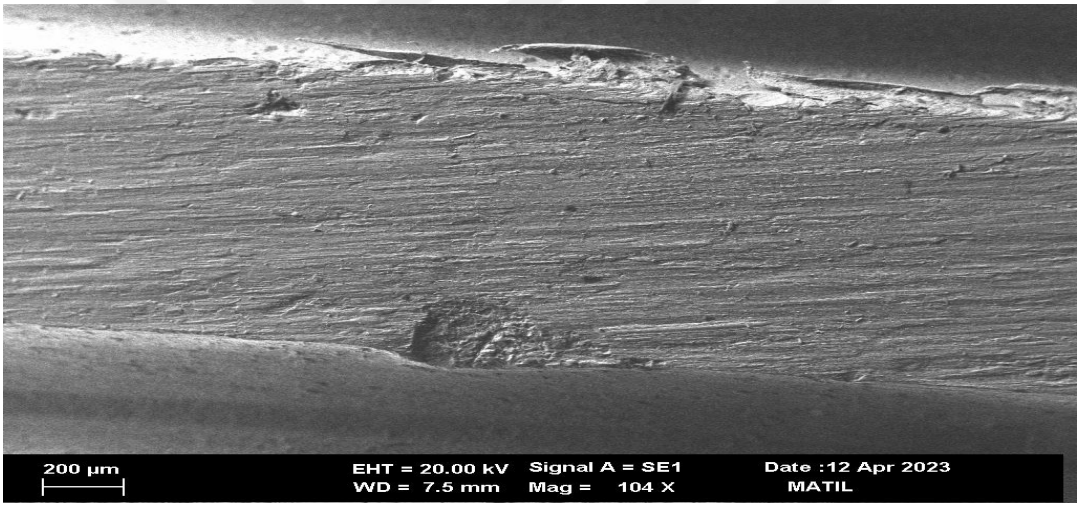
Şekil 3.14. Kullanılmış kalıpta az aşınmış bölgede dişlerde ve dişdibinde form değişiklikliği, h=993 ve h=339 µ

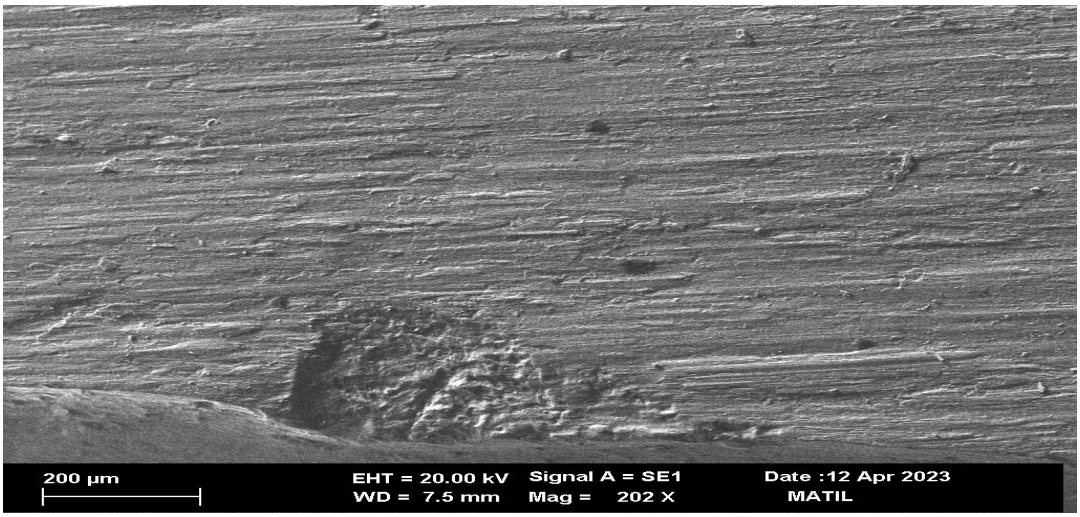
Dişüstünün üstten görünüşünde dişüstünün sivriliğinin düzleştiği, bu nedenle de diş açma özelliğini önemli ölçüde yitirdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.15. Dişüstü 49x büyütme

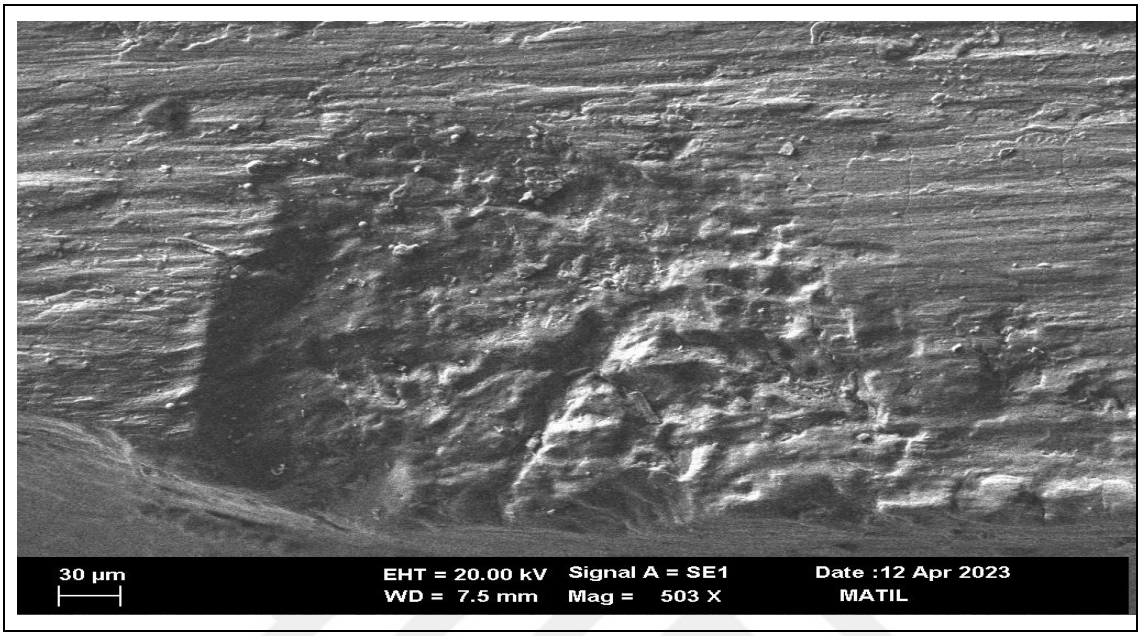
Dişüstünde düzleşme eğilimindeki bölgede kırıklar da olduğu belirlenmiştir





Şekil 3.16. Dişüstü 104x ve 202 büyütme

Hasar bölgesinin genel incelenmesinde sürtünme aşınmasının rolü açıktır. Kırık bölgenin incelenmesinde ise lokal aşınma; darbe aşınması ile yenmiş pürüzlü bir yüzey görülmektedir.

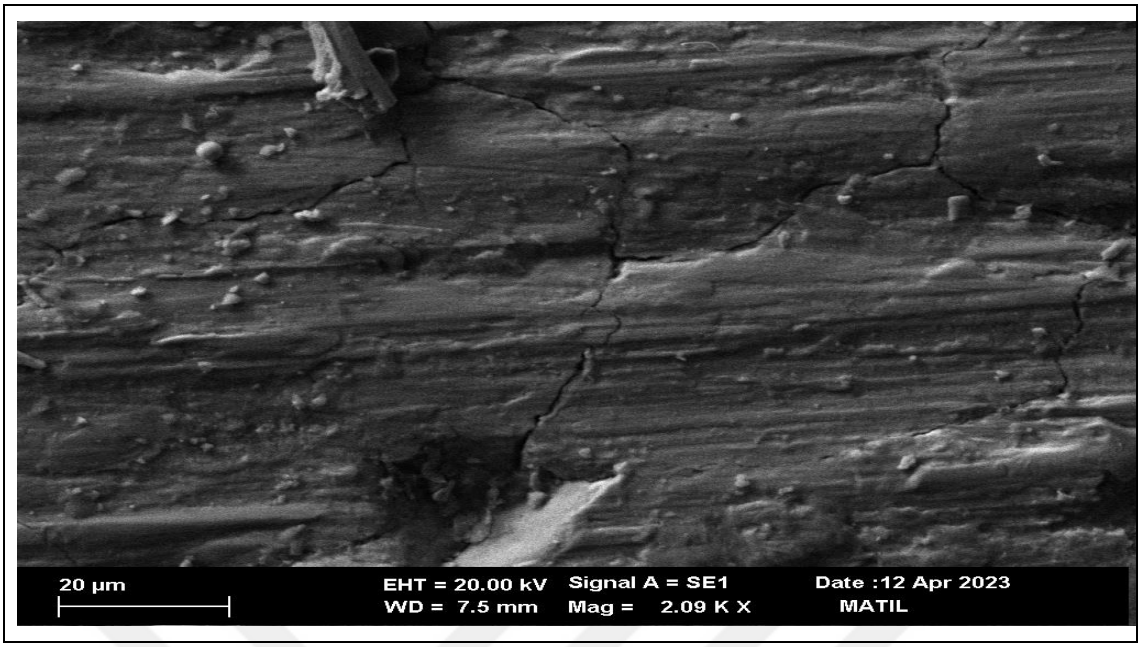


Şekil 3.17. Dişüstünde oluşan kırık görüntüsü 503x büyütme

Aşınma bölgelerinde yüzeyde çeliğin çalışma esnasında bir çatlama olup olmadığı kontrol edilmiştir. Sağlam ve aşınmış bölgelerden elektron mikroskoptan alınan yüksek çözünürlükteki büyütmelerde çatlak oluşumları kontrol edilmiş ve çalışma esnasında yüzeylerin etkileşimi sonucunda yüzeyde kirlilik kontrolleri yapılmıştır. Çalışmada Zeiss marka Evo 10 Model elektron mikroskop kullanılmıştır.

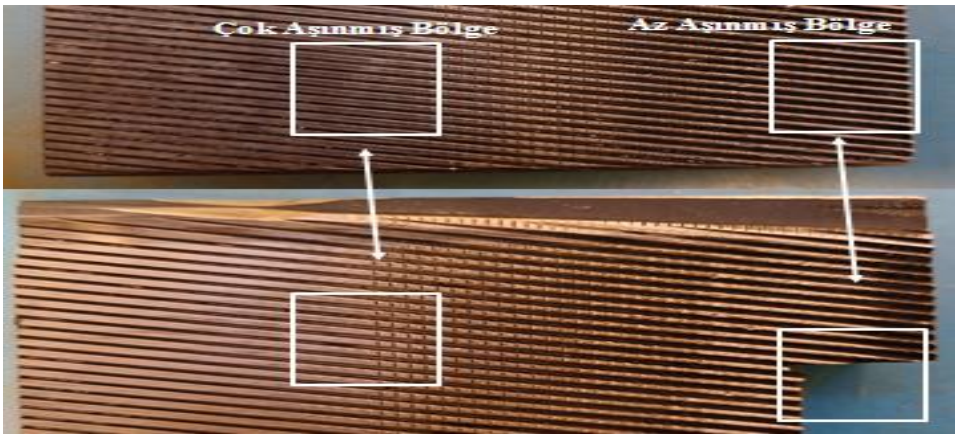
Şekil 3.18'te diş yüzeyinde 2090x büyütmede tespit edilen çatlak meydana geldiği görülmektedir. Çelik malzemenin gevrek olmasına bağlı olarak çatlağın kollarının diş yüzeyinde tane sınırlarına benzer ilerlemeler gösterdiği tespit edilmiştir. Resimde çalışma esnasında aşınmadan meydana gelen çukurlaşma olduğu görülmektedir. Çatlağın başlangıç noktasının çukurlaşma içinde meydana gelen çentikler etkisinde olduğu ve tetiklenerek ilerleme gösterdiği düşünülmektedir. Aşınma sonucu meydana gelen çukurun çapının yaklaşık 30 mikron mertebesinde olduğu görülmektedir.

Kalıp ömrünü etkileyen bir diğer oluşum da yorulma kaynaklı çatlaklardır.



Şekil 3.18. Dişüstünde oluşan yorulma çatlağı yüksek büyütme (2090x) çatlak görüntüsü.

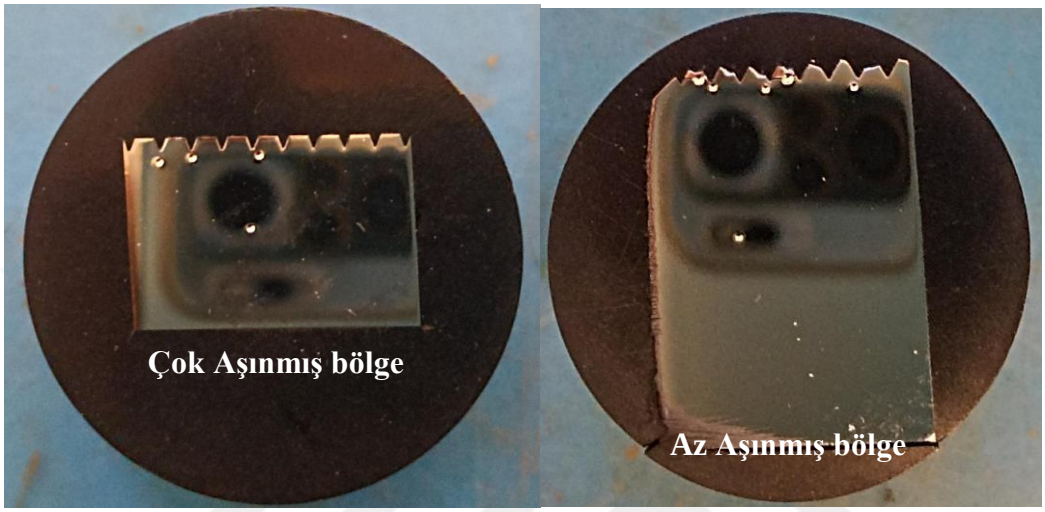
Az aşınmış ve çok aşınmış bölgelerden makro sertlik ölçümleri ile mikroyapı incelemeleri yapılmış, çalışma sırasında bu bölgelerdeki değişimler incelenmiştir. Tarama Elektron Mikroskoskobu (SEM) analizleri ile yüzeylere EDAX analizleri yapılmıştır. SEM görüntüleme metodu ile yüzeylerde oluşan deformasyonlar, hasarlar, çatlaklar, kimyasal aşınma (korozyon) olayları yüksek çözünürlükte yapılabilmektedir. Ayrıca çalışma ortamından gelen kirlilik vb. etkiler incelenmiştir.



Şekil 3.19. Ovalama kalıpları

Takım çeliklerinde Mo, Cr, V gibi alaşım elementlerinin C ile yaptıkları kararlı karbür bileşikleri ile aşınma dayanımı artırıcı özellik gösterirler. Bu çeliklerin yüksek sertliğe

sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle farklı bölgelerden hazırlanan numunelere diş diplerine ve gövde bölgelerine makro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Takım çeliğinin aşınmanın fazla olduğu bölgelerde sürtünme ile meydana gelen sıcaklık artışlarının çelik sertliği üzerindeki değişimleri incelenmiştir. Hazırlanan çelik numuneleri bakalitli numuneleri Şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.20. Makro sertlik ölçümü alınan bakalitli numune genel görüntüleri

İncelemelerde çok aşınmış bölgede dişüstlerinde çalışma esnasında aşınmaya bağlı olarak düzleşmeler tespit edilmiştir. Az aşınan bölgeyi incelediğimizde ise dişlerde aşınmadan çok kırılmaların meydana geldiği görülmektedir. Sertlik ölçümleri dişlerin üzerinden alınmak istenilmiş fakat malzeme çok gevrek olduğu için diş üzerinde çatlak meydana gelmiş ve diş üzerinden ölçüm yapılamamıştır. Bakalite alınan kesit yüzeylerde az ve çok aşınmış yüzeylerde dişlerdeki değişimler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Aşınma sırasında önemli bir değişiklik de sertliklerde olmaktadır. Başlangıçta 61±1 HRC olan sertlik değerleri çalışma sırasında ciddi artışlar göstermektedir. Sertlikte görülen bu artışlar aşınan bölgelerin aşınma oranına göre de farklılıklar göstermektedir. Çok aşınan bölgelerde sertliklerdeki artış oranları, az aşınan bölgelerdeki artış oranlarından fazladır. Her iki numuneden de ISO 6508 standartına göre yapılan HRC makro sertlik test sonuçları Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4. Aşınma bölgelerine göre sertlik ölçümleri

Bölge	Az Aşınmış	Çok Aşınmış
Gövde	63,02 HRC	64,63 HRC
Dişdibi	63,60 HRC	65,05 HRC
Dişüstü	64,41 HRC	65,51 HRC

3.4. FactSage 8.2

FactSage, Demir-Çelik veritabanlarını da içeren, metaller başta olmak üzere malzeme bilimi, korozyon, cam teknolojisi, seramik vb. alanlarında işlem modüllerinden oluşan ve sıcaklığa göre faz oluşumlarını detaylı olarak incelemeye olanak tanıyan, tam entegre bir **termokimyasal optimizasyon ve modelleme** bilgi işlem sistemidir.

Kullanılan zımbaların MATİL Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarları A.Ş.'nin İstanbul Teknik Üniversitesi'nde (İTÜ) kurulu Ar-Ge Merkezinde ARL 8860 Optik Emisyon Spektrometresinde yapılan kimyasal analizlerinde geleneksel AISI **D2** (1.2379) ve yeni nesil **C2 ve K2** çeliklerinde ölçülen 32 elementin % dağılımı aşağıdadır:

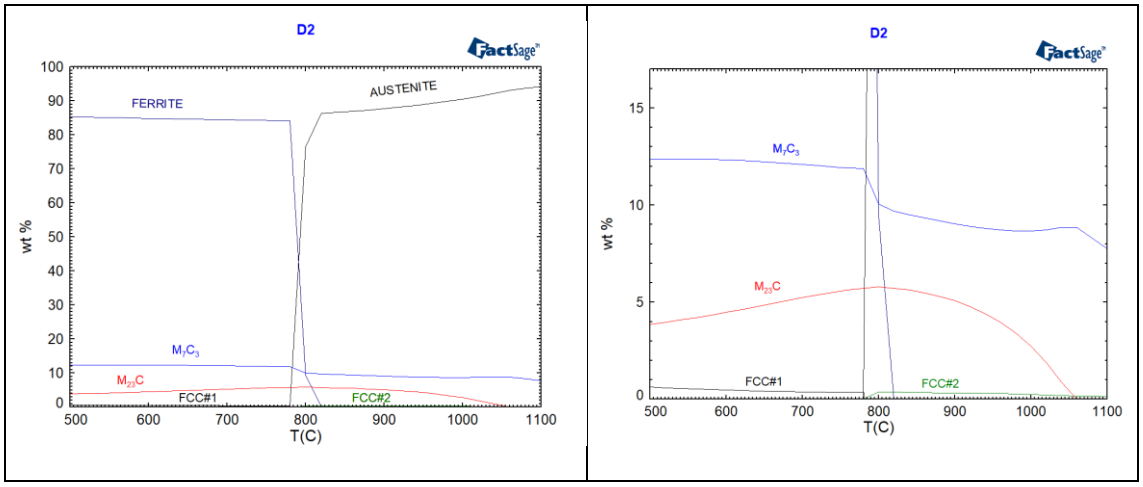
D2															
C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Mo	Cr	V	Co	B	N	Al	Ti	W
1,4194	0,2916	0,234	0,004	0,023	0,133	0,255	0,658	11,396	0,918	0,017	0,00021	0,0177	0,026	0,002	0,028
As	Sn	Pb	Sb	Ta	Zr	Bi	Ca	Mg	Te	Zn	Ce	La	Nb	O	Fe%
0,0068	0,0065	0,002	0,007	1E-04	0,004	0,002	0,015	0,0101	0,002	0,0044	0,0001	0,0002	0,023	0,005	84,5

C2															
C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Mo	Cr	V	Co	B	N	Al	Ti	W
0,7912	0,2468	0,927	0,002	0,008	0,146	0,166	1,862	7,2964	0,211	0,0167	0,00032	0,0102	0,019	0,002	0,01
As	Sn	Pb	Sb	Ta	Zr	Bi	Ca	Mg	Te	Zn	Ce	La	Nb	O	Fe%
0,0081	0,0085	0,002	0,007	1E-04	0,003	0,003	0,054	0,0096	0,001	0,0026	0,0041	0,0001	0,015	0,001	88,18

K2															
C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Mo	Cr	V	Co	B	N	Al	Ti	W
0,9641	0,3802	0,775	6E-04	0,01	0,079	0,3	1,853	7,8788	0,409	0,0449	0,00045	0,0141	0,834	0,002	0,07
As	Sn	Pb	Sb	Ta	Zr	Bi	Ca	Mg	Te	Zn	Ce	La	Nb	O	Fe%
0,004	0,0059	0,002	0,009	1E-04	0,004	0,003	0,019	0,0112	0,002	0,0028	0,0043	0,0001	0,111	0,006	86,22

FactSage 8.2 yazılım programına bu değerler girilerek faz diyagramı çizilerek oluşan fazlar teorik olarak tespit edilmiştir. Üzerinde çalışma yapılan D2, C2 ve K2 SİTÇ'ne ait menevişleme (temperleme) sıcaklıklarında oluşan karbür miktarları hesaplanmıştır.

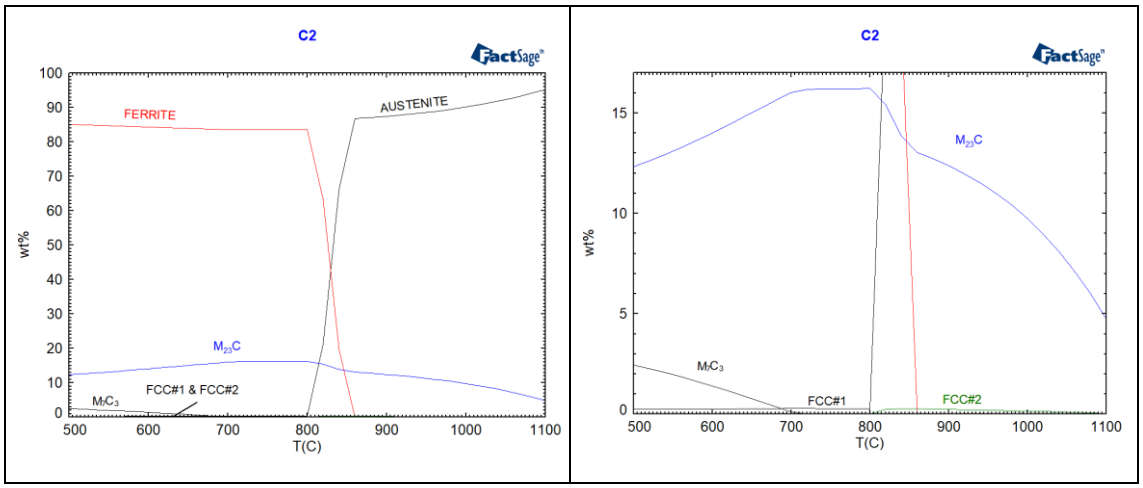
Genel olarak takım çeliklernde, özel olarak bu grupta sayıları onu bulan farklı karbür kombinasyonları bulunmakta, bunlar başta mekanik olmak üzere tüm özelliklerin belirleyicisi olmaktadır. Ağırlıklı olarak M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ tip yapıları oluşturan farklı metal kombinezonlarda karbürler esas alınmıştır.



Şekil 3.21. D2 çeliğine ait faz diyagramı

M_7C_3	$M_{23}C_6$
+ 12.349 gram M7C3 (12.349 gram, 3.0506E-02 mol) (560 C, 1 atm, a=1.0000) (77.125 wt.% Cr7C3 + 18.588 wt.% Fe7C3 + 1.3461 wt.% Mn7C3 + 9.1960E-03 wt.% Mo7C3 + 8.0162E-03 wt.% Ni7C3 + 2.9235 wt.% V7C3)	+ 4.1954 gram M23C6 (4.1954 gram, 2.9891E-03 mol) (560 C, 1 atm, a=1.0000) (5.9326 wt.% Cr20Cr3C6 + 5.1937 wt.% Fe20Cr3C6 + 2.0868E-04 wt.% Mn20Cr3C6 + 1.0228E-04 wt.% Ni20Cr3C6 + 1.1534E-06 wt.% V20Cr3C6 + 5.8259 wt.% Cr20Fe3C6 + 5.0976 wt.% Fe20Fe3C6 + 2.0485E-04 wt.% Mn20Fe3C6 + 1.0035E-04 wt.% Ni20Fe3C6 + 1.1329E-06 wt.% V20Fe3C6 + 0.48454 wt.% Cr20Mn3C6 + 0.42401 wt.% Fe20Mn3C6 + 1.7039E-05 wt.% Mn20Mn3C6 + 8.3478E-06 wt.% Ni20Mn3C6 + 9.4215E-08 wt.% V20Mn3C6 + 41.154 wt.% Cr20Mo3C6 + 35.833 wt.% Fe20Mo3C6 + 1.4416E-03 wt.% Mn20Mo3C6 + 7.0310E-04 wt.% Ni20Mo3C6 + 8.0139E-06 wt.% V20Mo3C6 + 2.3963E-02 wt.% Cr20Ni3C6 + 2.0960E-02 wt.% Fe20Ni3C6 + 8.4234E-07 wt.% Mn20Ni3C6 + 4.1251E-07 wt.% Ni20Ni3C6 + 4.6602E-09 wt.% V20Ni3C6 + 3.6402E-03 wt.% Cr20V3C6 + 3.1872E-03 wt.% Fe20V3C6 + 1.2806E-07 wt.% Mn20V3C6 + 6.2771E-08 wt.% Ni20V3C6 + 7.0770E-10 wt.% V20V3C6)

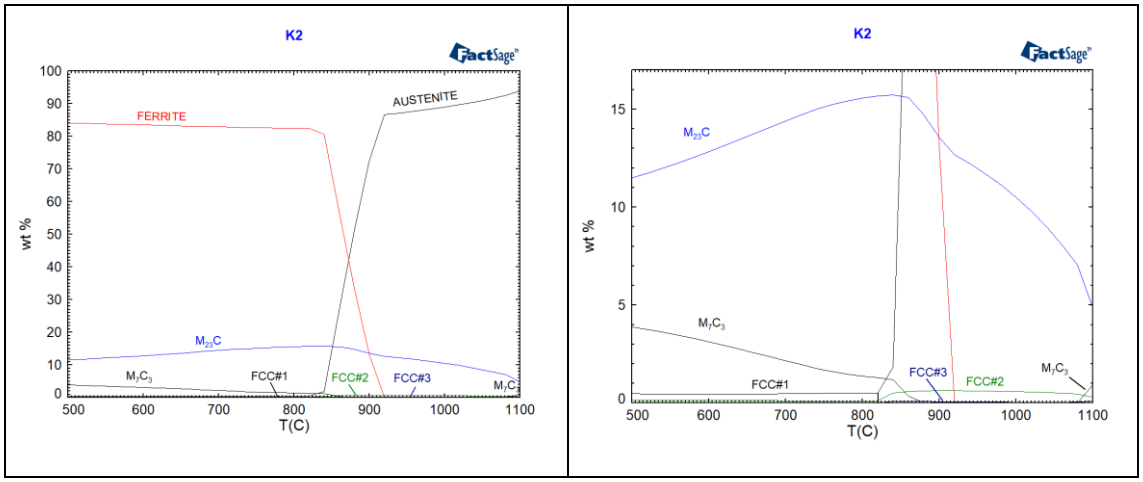
Şekil 3.22. D2 çeliğine ait M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ tip fazların oranı



Şekil 3.23. C2 çeliğine ait faz diyagramı

$M_{23}C_6$	M_7C_3
+ 14.002 gram M23C6 (14.002 gram, 9.9995E-03 mol) (600 C, 1 atm, a=1.0000) (6.5082 wt.% Cr20Cr3C6 + 5.7428 wt.% Fe20Cr3C6 + 3.6102E-04 wt.% Mn20Cr3C6 + 5.6208E-05 wt.% Ni20Cr3C6 + 3.4344E-06 wt.% V20Cr3C6 + 6.5145 wt.% Cr20Fe3C6 + 5.7453 wt.% Fe20Fe3C6 + 3.6122E-04 wt.% Mn20Fe3C6 + 5.6214E-05 wt.% Ni20Fe3C6 + 3.4382E-06 wt.% V20Fe3C6 + 0.59451 wt.% Cr20Mn3C6 + 0.52438 wt.% Fe20Mn3C6 + 3.2968E-05 wt.% Mn20Mn3C6 + 5.1310E-06 wt.% Ni20Mn3C6 + 3.1375E-07 wt.% V20Mn3C6 + 39.589 wt.% Cr20Mo3C6 + 34.744 wt.% Fe20Mo3C6 + 2.1869E-03 wt.% Mn20Mo3C6 + 3.3883E-04 wt.% Ni20Mo3C6 + 2.0924E-05 wt.% V20Mo3C6 + 1.1793E-02 wt.% Cr20Ni3C6 + 1.0396E-02 wt.% Fe20Ni3C6 + 6.5370E-07 wt.% Mn20Ni3C6 + 1.0169E-07 wt.% Ni20Ni3C6 + 6.2245E-09 wt.% V20Ni3C6 + 6.3722E-03 wt.% Cr20V3C6 + 5.6236E-03 wt.% Fe20V3C6 + 3.5352E-07 wt.% Mn20V3C6 + 5.5047E-08 wt.% Ni20V3C6 + 3.3625E-09 wt.% V20V3C6)	+ 1.3944 gram M7C3 (1.3944 gram, 3.4419E-03 mol) (600 C, 1 atm, a=1.0000) (75.058 wt.% Cr7C3 + 19.752 wt.% Fe7C3 + 1.6336 wt.% Mn7C3 + 1.6331E-02 wt.% Mo7C3 + 4.1250E-03 wt.% Ni7C3 + 3.5357 wt.% V7C3)

Şekil 3.24. C2 çeliğine ait M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ tip fazların oranı

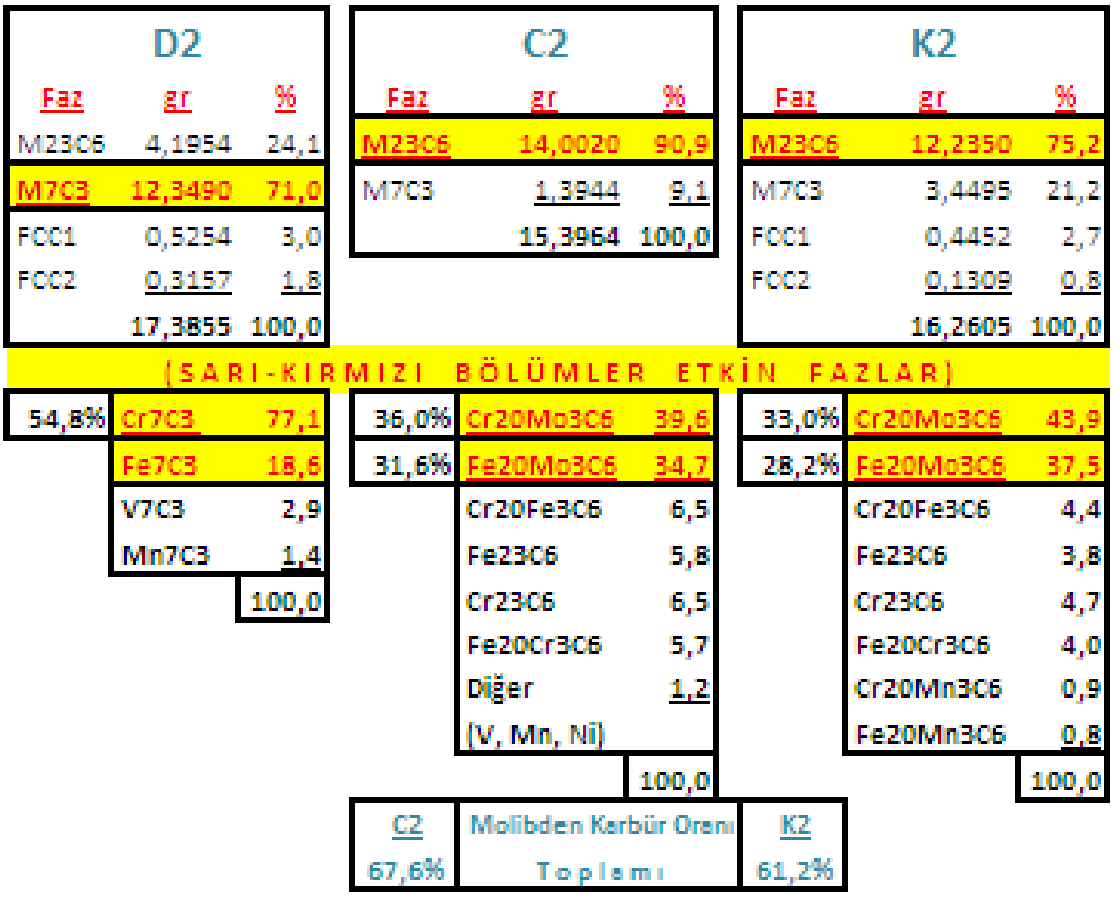


Şekil 3.25. K2 çeliğine ait faz diyagramı

$M_{23}C_6$	M_7C_3
+ 12.235 gram M23C6 (12.235 gram, 8.6835E-03 mol) (560 C, 1 atm, a=1.0000) (4.6651 wt.% Cr20Cr3C6 + 3.9985 wt.% Fe20Cr3C6 + 2.5584E-04 wt.% Mn20Cr3C6 + 3.3358E-05 wt.% Ni20Cr3C6 + 4.9054E-07 wt.% V20Cr3C6 + 4.4261 wt.% Cr20Fe3C6 + 3.7917 wt.% Fe20Fe3C6 + 2.4263E-04 wt.% Mn20Fe3C6 + 3.1621E-05 wt.% Ni20Fe3C6 + 4.6548E-07 wt.% V20Fe3C6 + 0.92045 wt.% Cr20Mn3C6 + 0.78862 wt.% Fe20Mn3C6 + 5.0463E-05 wt.% Mn20Mn3C6 + 6.5773E-06 wt.% Ni20Mn3C6 + 9.6797E-08 wt.% V20Mn3C6 + 43.930 wt.% Cr20Mo3C6 + 37.450 wt.% Fe20Mo3C6 + 2.3991E-03 wt.% Mn20Mo3C6 + 3.1129E-04 wt.% Ni20Mo3C6 + 4.6266E-06 wt.% V20Mo3C6 + 1.1000E-02 wt.% Cr20Ni3C6 + 9.4196E-03 wt.% Fe20Ni3C6 + 6.0282E-07 wt.% Mn20Ni3C6 + 7.8536E-08 wt.% Ni20Ni3C6 + 1.1569E-09 wt.% V20Ni3C6 + 3.2903E-03 wt.% Cr20V3C6 + 2.8206E-03 wt.% Fe20V3C6 + 1.8047E-07 wt.% Mn20V3C6 + 2.3533E-08 wt.% Ni20V3C6 + 3.4597E-10 wt.% V20V3C6)	+ 3.4495 gram M7C3 (3.4495 gram, 8.5177E-03 mol) (560 C, 1 atm, a=1.0000) (75.822 wt.% Cr7C3 + 17.767 wt.% Fe7C3 + 3.2848 wt.% Mn7C3 + 1.2920E-02 wt.% Mo7C3 + 4.8303E-03 wt.% Ni7C3 + 3.1084 wt.% V7C3)

Şekil 3.26. K2 çeliğine ait M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ tip fazların oranı

Tablo 3.5. D2, 2 ve K2 çeliğinde ağırlıklı karbür oranları



Buna göre temper sıcaklıklarında etkin faz geleneksel D2 çeliğinde %71 ile M_7C_3, yeni nesil C2 ve K2 çeliklerinde ise sırasıyla %90,9 ve %75,2 oranları ile $M_{23}C_6$'dır.

D2 çeliğinde Krom Karbürün (Cr_7C_3) oranı %54,8 ile diğer tüm karbür oluşumlarının toplamından fazladır. Bu çelikte ayrıca Fe_7C_3 de oluşmaktadır, oranı kendi grubu içerisinde %18,6, tüm çelik içinde %13,2'dir. Burada ağırlık ve etki sırayla Krom Karbür (%77), Demir Karbür (%11) ve Vanadyum Karbür (%3) oluşmaktadır. Ağırlık bu grupta olmasına rağmen D2 çeliğinde oluşan her 4 karbürden 3'ü (%24,1) $M_{23}C_6$'dır. Molibdenin etkisi burada görülmektedir: Toplam %76 oranda molibdenin krom (%41) ve demirle (%35) oluşturduğu üçlü karbür kümeleridir.

Yeni Nesil SİTÇ'nde ise etkin fazlar C2'de %67,6 ve K2'de %61,2 olarak Demir ve Krom'un Molibden ile oluşturduğu fazlardır. Burada da Molibden'in etkisi açıkça görülmektedir. Molibdenin krom ve demirle oluşturduğu üçlü karbür kümeleri diğer tüm toplam karbürlerden fazladır.

$M_{23}C_6$ tip karbür, M farklı metaller tarafından oluşturulan [örneğimizde Fe, Cr, Mo, Mn ve Nb/AÜ] toplam 92 metal ve 24 karbon atomu içeren karmaşık kübik yapıya sahip, uzun süreli ısıl işlemlerden sonra östenit tane sınırları boyunca oluşan bir çökeltidir. Farklı metal türlerinden biri kolaylıkla diğerinin yerini alabilir. Cr atomlarının %30'unun Fe ile yer değiştirmesi de mümkündür. Deneysel sonuçlar ayrıca Mo ve Mn'nin bu fazda kolaylıkla çözündüğünü göstermektedir [203].

Takım çeliklerinin tümünde, yukarıda bahsedildiği üzere, çeliği içinde bulunduğu mikroyapısı ile özgün kılan, içerdiği metalik element miktarı ve morfolojisi birbirinden farklı çok sayıda karbürler oluşmaktadır. SİTÇ'de ergitme ve döküm aşamalarında en çok karşılaşılan karbür tipleri M_2C, M_3C, M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ tip karbürlerdir. Bu karbürler ısıl işlemler sırasında;

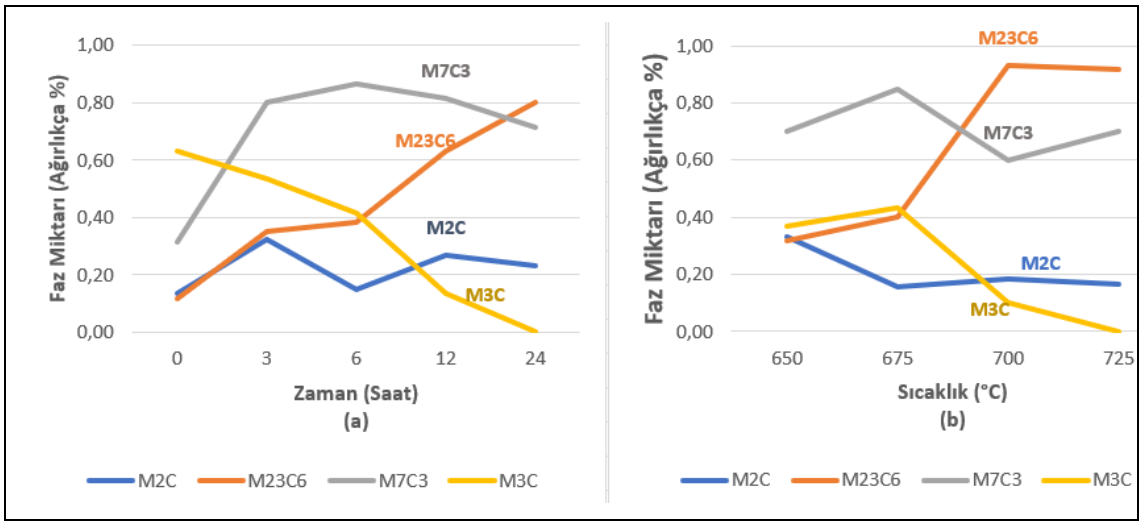
1- Isıtma hızına,

2- Ulaşılan sıcaklığa

3- O sıcaklıkta süresine,

4- Soğutma hızına

göre çözünerek matris içerisinde son haline dönüşür ve dokuda yerini alır. Menevişleme sırasında önce M_2C ve M_3C azalırken M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ oranları artar. Karbürlerdeki bu dönüşümler mekanik özelliklerde gelişmeler sağlar. Mikrokarbür adacıkları performansı iyileştirmektedir [204].



Şekil 3.27. Menevişleme sırasında karbür oranlarının (a) zamana, (b) sıcaklığa göre değişimi [204]

4. SONUÇLAR VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

Tasarımda Malzeme Seçimi, özellikle küçük ve orta ölçek sanayi için bilmek, bulmak, karar vermek gibi bir seri bileşenin ve bunların geçişlerinin olduğu çok önemli bir disiplindir. Öncelikle malzemeyi bulmak, bunun için de bilmek, tanımak gereklidir. Bunların başarılması ile taktik kararlar daha iyi yönetilebilir. Çalışmalarda, imalat sanayinin bu konuya açık olduğu gözlenmiştir. Makine imalatının tüm sahalarında 'malzeme' üst başlığı sürdürülebilir inovasyon gerektiren bir süreçtir. Yeni üretim, şekillendirme ve işleme teknolojileri desteğiyle ve işi tam olarak doğru okuyarak geleceğin ürünleri geliştirilebilir.

Çalışması yapılan kalıp imalat sektörü tek başına olmayıp pekçok alan gibi öncesi ve sonrası vardır. Bunlar aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

1- Öncesi: Genel olarak çelik satıcıları, tedarikçiler. Bunlar küçük dükkanlardan bünyelerinde büyük depoları da bulunduran Asyadan Amerikaya dek Avrupa dahil dev uluslararası şirketlere kadar geniş bir yelpazeyi oluşturmaktadır.

2- Sonrası: İmal edilen kalıpları kullanan kuruluşlar. Bunların da birkaç metrekarelik atölyelerden büyük fabrikalara kadar değişebilen, her birinin kendine özgü kaidelerinin olduğu imalathaneler.

3- Isıl işlemciler: Tüm süreçlerin orta yerinde bulunarak imalata yön vermektedir.

4- Kullanıcılar: Kalıpçıların ürünlerini alarak bunları "teçhizat" olarak kullanan ve kendileri ürünler üreten kuruluşlar.

Görüldüğü üzere böylesi karmaşık bir yapıdaki dinamik olma durumu her zaman gelişmeye açıktır. Yenilikler yapılmasında üniversitelerimize arayüz görevi düştüğü anlaşılmaktadır. Bu anlamda inovasyon kavramının bizatihi kendisinin önümüzdeki yıllarda gelişeceği ve yenileşeceği öngörülmektedir.

Malzeme özellikleri, değişen kimya ile değiştiğinden çeliğin ilk bakılması gereken özelliği kimyasal özellikleridir. Örneğin, aynı ya da benzer gruplarda kategorize edilmiş olan çeliklerin ısı iletkenlik değerleri arasında ciddi farklar gözlenmektedir [205].

Soğuk iş takım çelikleri için de benzer bir tablo ile karşılaşılmaktadır. Her ikisi de SİTÇ olan D2 ve S1 çeliklerinin ısı iletkenlik değerleri arasında iki kat fark olup sırasıyla 16,7

ve 31,2 W/mºK'dir [206].

Bu özellik, oda sıcaklığı düşünülse bile çalışmalar sırasında görüldüğü üzere gerek zımbada gerek vidada milisaniyelerle ifade edilecek sürede ısınma sorunları olmaktadır. Kullanılan çelik cinsi ne olursa olsun, kısa vidalarda makine kapasiteleri birim zamanda üretilen vida sayısı açısından daha düşüktür. Uzun vidalarda ise uzunluk, bir soğutma sağladığından benzer makinelerde ve işlerde aynı çapta kısa vidayla karşılaştırıldığında uzun vidada daha yüksek üretim sayılarına ulaşmak mümkündür.

Tablo 4.1. D2 ve S1 takım çeliklerinin kimyasal bileşimi

(max.)	**% C**	**%Si**	**% Mn**	**% Cr**	**% Mo**	**% V**
1.2379/D2	1,60	0,60	0,60	13,00	1,00	1,00
1.2550/S1	0,65	1,00	0,45	1,20	-	0,20

Bilim, teknoloji ve inovasyon ile ilgili kararlar alınması amacıyla kurulmuş olan "Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Kurulu" (BTYPK), rekabette karşılaştırmalı üstünlük kazandıracak alanları belirleyerek devletimizin kalkınma ve Ar-Ge etkinliklerinin koordinasyonu için altyapı, insan kaynağı ve diğer tüm kaynakların geliştirilmesine yönelik araştırmalar yaparak öneriler oluşturmaktadır. Danışma Grubu Tarafından Oluşturulan 30 Aday Teknolojik Hedef ve Kapsadığı Alanlar ile 27 Aday Sektörel Uygulama arasında aşağıdaki başlıklar da yer almaktadır:

- Cr, Ni, W, V, Mo ihtiva eden sıcak ya da soğuk iş takım çelikleri gibi teknolojik ve endüstriyel ihtiyacı yüksek çelik malzemelerin tasarlanması ve üretilmesi
- Süperalaşımlar, paslanmaz çelikler üretilmesi
- Yeni nesil ileri çelikler, yüksek teknoloji malzemeleri, uygulanması
- ileri metal malzemelerin üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve uygulamaları [207].

Kalıpçılar endüstriyel yeni uygulamalarda, kalıp imalatı alanında kullanılan günümüz alaşımlarına alternatif yeni metalik kalıp malzemeleri aramaktadır. İncelemesi yapılan refrakter metallerin sağladığı ilave üstün özellikleri nedeniyle gelecekte "üçüncü nesil" takım çelikleri de olacağı düşünülmektedir.

Yapılan denemelerde yeni nesil çeliklerle konvansiyonel çeliklere göre daha başarılı

sonuçlar alınabildiği görülmektedir. Ancak, fayda/maliyet analizi yaptıklarında kullanıcılar, performans faydasını aşan fiyat/maliyet dolayısıyla tercihte tereddüt etmektedir. Bu ise D2/1.2379 çeliğinin yerini koruyacağını göstermektedir.

Yeni nesil çeliklerin kullanımını kısıtlayan kritik eşiklerden biri de fiyat kadar ısıl işlemlerde karşılaşılan güçlüklerdir. D2/1.2379 için oturmuş bir ısıl işlem pratiği bulunmaktadır. Sorun çıkma ihtimali yeni nesile göre daha azdır. Olsa bile birim fiyatı görece düşük olduğundan kullanıcılar daha tolere edilebilir bulmaktadır. Isıl işlemler geri dönüşsüz operasyonlar olduğundan özellikle yeni nesil SİTÇ'de yapılacak ısıl işlemlerde sıcaklık ve süre ana parametreleri başta olmak üzere tali faktörlerin de hassasiyetle ele alınması gerektiği düşünülebilir.

Önümüzdeki süreçte iki önemli hammaddenin temin edilmesi ve kullanılması önemli olacaktır: 1) Genel olarak, katı, sıvı ve gaz tüm enerji hammaddeleri ve 2) demir içeren bileşiklerle ve belki bundan da önemlisi çelik yapımında halen kullanılmakta olan alaşımlama elementleri bileşikleri ile kullanılma potansiyeli olan elementlar. Ayrıca geri dönüşüm sektörüne ait gelişmeler de bu iki konu ile paralel olarak gelişecektir [208].

Çalışmalarda kalıp imalatı öncesi, sırasında ve sonrası işlemler incelenmiştir. Kullanıcı memnuniyeti düşünüldüğünde tasarım kavramının ayrılmaz bileşeni olan "Malzeme Seçimi"nin hem üreticileri, hem de kullanıcıları doğrudan etkilediği, giderek ekonomik kayıplara yol açtığı veya paydaşlar için kazanımlar sağladığı tespit edilmiştir.

İstatistiksel verilerden de kolaylıkla anlaşılacağı üzere yurt içinde üretilmeyen bu endüstriyel ara malı niteliğindeki malzemeler için ciddi miktarlarda dövizler ödendiği bilinmektedir. Bu nedenle de kalıpçılıkta süreçlerin gözden geçirilmesi üretimde verimlilik bilinci oluşturulması için çok önemlidir

Ülkemizde kalitenin sertifikasyonu, Takım Çeliklerinde uygun sertifikalandırma ve bunların doğru okunması kalite bilgisine dayanır. Tüm ürünler, imalat ve test bilgilerinin yer aldığı gerçek sertifikalarla işlem görmeli, lojistik hareketlere sertifika eklenmeli ve bu konuda bir okuryazarlık mutlaka geliştirilmelidir. Hiçbir standandarta uymayan malzeme kullanımlarının önüne geçilmesi elzemdir. Sertifikaları bir malzemenin pasaportu hüviyetinde olduğundan yer değiştirmeler sertifikasız olmamalıdır. Maliyeti en aza indirirken süreçleri olabildiğince basit ve yapılagelenden daha kolay hale getirerek alternatifi olan malzemelere oranla sürdürülebilir rekabet üstünlüğü yakalamak için bu

gereklidir.

Yeni nesil çeliklerdeki performans başarısının arka planında genel olarak refrakter metaller bulunmaktadır. Dünyanın bir asırdır üzerinde çalışmakta olduğu bu konu ıskalanmamalıdır. Yeni nesil SİTÇ'de molibden, niyobyum ve alüminyum kullanılmasının seçiminin bir tesadüf olmadığı düşünülmektedir.

Molibden, niyobyum ile birlike, sadece takım çeliklerinde değil, üstün performans beklenen tüm alaşımlı çeliklerde mikroyapısal denetimi kurgulayan bir elementtir. Bu çelikler, daha hafif ama dayanıklı ve araçlar, makineler, enerji santrallerindeki ağır hizmet koşullarını sağlayacak parçaların üretiminde giderek daha fazla önem kazanacaktır.

Kalıpçılık sektöründe çelik malzeme seçiminden başlayarak tedarik edilmesinde nicel ve nitel sorunlar yaşanmaktadır. Bire-bir dövize bağlı olduğundan kaynaklarımızı boşa harcamamak için sürdürülebilir stratejilere göre oluşturulacak modern çalışma yöntemlerinin kullanılarak israftan kaçınması gereken sektörlerin başında kalıp yapım endüstrisi gelmektedir. Bugün Endüstri 4.0 ile birlikte yönetilebilir rekabetçi üretim yapabilmek ve gerçek potansiyelimizin altında çalışmamak ancak üretim ekipmanlarımızı verimli kullanılması yoluyla mümkün olacaktır.

Örnekleri çalışılmış ve metal şekillendirme için kesme ve vida haddeleme yapılmış kalıpların en kritik noktası menevişlemedir. Menevişlemenin doğru yapılmadığı hiçbir çelikten alınabilecek faydaların tamamı alınamayacağı gibi kısa sürede aşınma gibi, kırılma gibi öngörülemeyecek hasarlarla da karşılaşılabilir. Bu tür imalat hassasiyetlerinin dönüm noktası, bu aşamada alaşım elementi karbürlerin karakterindeki mikroyapısal değişikliklerdir. İnce karbürlerin irileşmesi engellenebildiği ölçüde başarılı sonuçlar elde edilebilir. Kimyasal bileşimi oluşturan elementlerin oranlarının işlevselliği ancak ve ancak oluşacak karbür tiplerinin nicelik ve niteliklerine, bu ise doğrudan manevişlemedeki sıcaklık ve süreye bağlıdır. Burada aşağı veya yukarı yönde değişebilecek her birkaç derece ve dakika, maliyet unsuru olduklarından, potansiyel bir kazanç ya da zamansız hasar, yani kayıp kaynağıdır. Çalışması yapılan her üç çelikte de, D2, C2 ve K2'de ana aktörler karbonla birlikte krom, molibden ve vanadyum, yardımcı aktörler manganez ve silisyumdur. K2 örneğimizde bunlara niyobyum ve aluminyum da eklenmelidir. Karbürlerin birbirlerine dönüşebildiklerinin bilgisi bize altın kıymetinde veri sağlar. Birini etkileyen faktörlerle çeliğin geliştirilmesi için kritik öneme sahip 'bıçak

sırtı' bir karar bir başkası üzerinde ters etki yaratabileceğinden, 'bir tarafı yaparken bir başka tarafı bozmamak için' tüm müspet özellikleri birleştiren ve ilgili parametreleri daha iyi bilmek suretiyle bunları optimize eden performans eşiği yakalanabilir.

Molibden ve Niobyum, geleceğin çelikleri için daha önemli alaşımlama elementleri olacaktır. Bunlara Bor (B) başta olmak üzere başka elementlerin de katılması kaçınılmazdır. Ülkemizde de bu konularda yapılacak araştırmalarda yeni yaklaşımların üstlenilmesi gerekmektedir. Üniversiteler tedarikçilerle kullanıcılar arasında bağımsız ve tarafsız arayüz olmalı, taraflardan gelen bilgileri değerlendirerek, yorumlayarak, katkıda bulunarak filtre edilmiş rafine bilgileri aktarmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] Schacher H. D., 1997, Proceedings, Recent development trends in massive forming for the automotive industry, Stuttgart, Germany

[2] World Auto Steel, 2017, Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0

[3] Jeanneau M. ve Pichant P., 2000, The Trends of Steel Products in the European Automotive Industry, La Revue de Metallurgie–CIT

[4] Dünya Çelik Birliği https://www.worldautosteel.org/projects/ulsab/ , Erişim tarihi: 12.11.2022

[5] Metals Handbook, 1990, Cilt 3, Alloy Phase Diagrams, ASM

[6] Metals Handbook, 2006, Tool Steels, Desk Edition, ASM

[7] Davis J. R., 2001, Alloying: Understanding the Basics, Tool Steels, s. 210-233 ASM International

[8] Hojerslev, C., 2001, Tool steels. s. 14, 16, Riso National Laboratory, Danimarka

[9] European Space Agency, 2010, Threaded Fasteners Handbook –Space Engineering, s. 171, ECSS European Cooperation for Space Standardization

[10] Baydemir T., Aralık, 2021, TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, Ankara

[11] Shizhu W. ve Ping H., 2018, Principles of Tribology, 2. Baskı, s. 286, John Wiley & Sons Singapur

[12] Thuesen G. J. ve Sullivan W. G., 1999, ASEE, American Society for Engineering Education, Engineering Economy, A Historical Perspective Annual Conference Collection, Session 1639

[13] Arthur Mellen Wellington, 1877, The Economic Theory of the Location of Railways, J. Wiley & Sons, New York

[14] ABET, 1986, Annual Report. New York, A.B.D.

[15] G. T. Murray, Editör ve William G. Ovens, 1997, Handbook of Materials Selection for Engineering Applications, Ch. 1, Principles of Selection, s. 1-2 , Marcel Dekker Inc., Newyork, A.B.D.

[16] Pahl G. ve Beitz W. , 1988, Engineering Design, A Systematic Approach, 3. Baskı, s. 18-19, Springer-Verlag, Londra, U.K.

[17] National Research Council, 1995, Unit Manufacturing Processes: Issues and Opportunities in Research, s. 19, National Academy of Sciences, Washington

[18] G. Pahl ve W. Beitz ve ark., 1988, Engineering Design, A Systematic Approach, 3. Baskı, s. 12, Springer-Verlag, Londra

[19] Ullman D., 2010, The Mechanical Design Process, 4. Baskı, Ch. 9 Product Generation, s. 265, McGraw-Hill, New York, A.B.D.

[20] Jahan A. Ve ark., 2016, Multi-criteria Decision Analysis For Supporting the Selection of Engineering Materials in Product Design, 2. Baskı, Butterworth-Heinemann/Elsevier U.K., U.S.A.

[21] M. Ashby, 2000, Materials Selection in Mechanical Design, 2. Baskı, Butterworth-Heinemann, Cambridge

[22] ASM Handbook, Vol 20, J.H. Westbrook, Sources of Materials Property Data and Information, Materials Selection and Design, ASM International, 1997, s. 491-506

[23] M. Maleque M. ve M. Salit M, 2013, Materials Selection and Design, s. 57-58, Springer, Londra

[24] T. C. Dışişleri Bakanlığı, Avrupa Birliği Başkanlığı, www.ab.gov.tr/avrupa-birliginin-tarihcesi_105.html , Erişim tarihi: 03.11.2022

[25] The Making, Shaping and Treating of Steel, 1999, 11. Edition, Volume 1, Chapter 1, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, A.B.D.

[26] Asm Handbook Volume 4B, Steels Heat Treating Technologies, 2014, Ohio

[27] K. H. Prabhudev, 1988, Handbook of Heat Treatment of Steels, McGraw-Hill, New Delhi

[28] H. N. Gupta ve A. Mittal, 2009, Manufacturing Process, s.11, New Age International Publishers, New Delhi

[29] Metals Handbook, 1990, Cilt 1, Sayfa 233, ASM International

[30] Prof. Dr. İ. Özbek, 2015, Sakarya Üniversitesi, Ders Notları

[31] McCauley C., 2012, Machinery Handbook, 29. Baskı, Threads and Threading, s. 1918, 1921, Industrial Press, New York

[32] Charles A. Harper, Handbook of materials and product design, 3. Baskı, s. 1.15-1.16, McGraw Hill

[33] Hakan Koçak, 2006, Takım Çelikleri El Kitabı, Sağlam Metal, İstanbul

[34] Metals Handbook, 2001, ASM International, Desktop Edition

[35] Maalekian, M, 2007, The Effects of Alloying Elements on Steels, Technische Universitat Graz, Avusturya

[36] Metals Handbook, 2001, ASM International, Desktop Edition

[37] D. Delagnes, F. Pettinari-Sturmel , M.H. Mathon, 2012, Cementite-free martensitic steels: A new route to develop high strength/high toughness grades by modifying the conventional precipitation sequence during tempering, s. 5877-5888 Acta Materialia, Elsevier

[38] H. Bhadeshia, Bainite in Steels, 2015, Theory and Practice, Third edition, s. 179, Maney Publishing on behalf of the Institute of Materials, Minerals & Mining

[39] Coşkun Z., 2021,Dünyada ve Türkiye'de Niyobyum Tantalyum ve Vanadyum, MTA Maden Teknik Arama Gn. Md.lüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara

[40] Wisniak J., 2015, Charles Hatchett: The Discoverer of Niobium, Educacion Quimica, v.26, s. 346-355, http://dx.doi.org/10.1016/j.eq.2015.07.004

[41] Herring, D. H, 2013, Alloy Carbides, Industrial Heating, BNP Media, Illinois, A.B.D.

[42] Gökhan Arıcı, 2019, Düşük kromlu çeliklerde kobalt miktarının mikroyapıya ve tokluğa etkisi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, s.23

[43] Papp J., 2008, Niobium [Columbium] and Tantalum Minerals Yearbook 2006, U.S. Department of the Interior, USGS United States Geological Survey

[44] DeArdo a.ve Ark. 2006, International Symposium on Niobium Microalloyed Sheet Steel for Automotive Application, TMS The Minerals, Metals & Materials Society

[45] G. Roberts, G. Krauss, R. Kennedy, 1998, Tool Steels. 5. Edition, Ch.1, s.1, ASM International

[46] Charles R. Simcoe, 2014, July, s.34-35, The History of Alloy Steels: Part I, ASM Metallurgy Lane, Advanced Materials & Processes

[47] ASTM A681, 2008

[48] TS EN ISO 4957, 2003

[49] Harry Chandler, Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels, 2. Baskı, s. 513, Tool Steels, nd Edition, ASM International, Materials Park, OH, A.B.D

[50] Prof. Dr. İ. Özbek, 2015, Sakarya Üniversitesi, Ders Notları

[51] Christian Rudolf Sohar, 2011, Lifetime Controlling Defects in Tool Steels, s. 2, Vienna University of Technology, Springer, Avusturya

[52] B. Johansson ve R. Jervis, 2000, Proceedings of International Seminar on Tool Steels for Moulds and Dies, s.149-157

[53] Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı, Eylül 2021, Üretimin Geleceğinde Gelişen Teknlojiler-Metal Malzemelerin Geleceği Raporu, Ankara

[54] Boyce M, 2006, Gas Turbine Engineering Handbook, sayfa 443, 445, Elsevier

[55] Asil Çelik, Takım Çelikleri, Teknik Yayınlar, Asil Çelik San. Ve Tic A.Ş, Bursa

[56] Prof. Dr. Şadi Karagöz, 2009, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük

[57] Kenneth W. Murphy, 1985, Under Riser Segregation, Steel Founders' Society of America

[58] Pooya Delshad, Microstructural investigation of D2 tool steel during rapid solidification, 2014, s. 3-4, University of Alberta, Edmonton, Kanada

[59] Çardaklı İ.S., 2019, High cooling rate solidification of DC53 CW Tool steel, PhD Thesis, ODTÜ Ankara, s. 1-2

[60] E.M. Trent, P.K. Wright, 2000, Metal cutting, 4. Baskı, Butterworth-Heinemann, A.B.D.

[61] Anna Medmedeva, 2008, Properties of tool steel for tool holder application, Karlstad University Studies, İsveç

[62] K. H. Prabhudev, 1988, Handbook of Heat Treatment, McGraw Hill, ch.20, s.541

[63] Grote K. H. ve Antonsson E. K, 2008, Handbook of Mechanical Engineering, Part B Applications in Mechanical Engineering, s. 179-180, Springer

[64] Colas R. Ve Totten G. E., 2016, Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys, 1. Cilt, Sayfa 527

[65] Scholl, L. M. ve ark, 2022, Institute for Materials Applications in Mechanical Engineering, Aachen University, Germany, Steel Research International, Wiley-VCH GmbH, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/srin.202200578 Erişim Tarihi: 08.12.2022

[66] R. Syre, 1961, Agardograph, Niobium, Molybdenum, Tantalum and Tungsten, NATO Agard Research Memorandum 30.

[67] D. H. Leeds, 1963, A Portfolio Experience in Refractory Metal Protective Systems Research, AeroSpace Corporation, California, A.B.D

[68] Jack Paul Tosdale, 1967, Refractory Metal-Carbide Systems, M. S. Thesis, s. 8-27, Iowa State University of Science and Technology, AB.D

[69] Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı IAEA, 1970, International atomic energy agency conference proceedings, iaea Library, #121, Viyana. Avusturya

[70] Dr. Pınar Köymen Çağar, 2022, Nb Refrakter Metalinin Yüksek Sıcaklık Korozyon Dayanımının Kaplamalar İle Geliştirilmesi, İksad

[71] Callister W. ve Rethwisch D., 2018, Materials Science and Engineering, Wiley

[72] ASM Handbook, 1992, Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Cilt 2, ASM International

[73] R. Ferro ve A. Saccone, 2008, Intermetallic Chemistry, sayfa 235, Pergamon-Elsevier, Amsterdam

[74] Habashi, F., 1997, Handbook of Extractive Metallurgy, Cilt III, Sayfa 1327, Wiley-VCH, Almanya

[75] Dokumacı E, 2012, Production and Characterization of High Temp. Corrosion Resistant Materials, PhD. Thesis, Ege University, s. 3

[76] Machlin Irving, 1968, Symposium on metallurgy and technology of refractory metal alloys, A state-of-the-art review, volume 20, # 9, s. 21-25, JOM - Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Provided by the NASA National Aeronautics and Space Administration Astrophysics Data System

[77] David Rowe, 2003, Refractory Metals, s. 56-60, November/December, Heat Treating Progress

[78] Otto Thallner, A Concise Handbook on Tool Steel in General, 1902, Tercüme: W. T. Brannt, Henry Carey Baird Industrial Publishers, Philadelphia, A.B.D.

[79] Dokumacı E, 2012, Production and Characterization of High Temp. Corrosion Resistant Materials, PhD. Thesis, Ege University, s. 5

[80] T. Akande ve Ark., 2019, Thermodynamic properties of V, Cr, Mo, and Fe metals and their binary alloys, Turkish Journal of Physics: Vol. 43: No. 6, Article 9

[81] Mohrbacher H., 2019, Molybdenum Alloying: More Than Hardenability, Advanced Manufacturing (2020) 8:1–2, Springer

[82] Hardy Mohrbacher, 2018, Property Optimization in As-Quenched Martensitic Steel by Molybdenum and Niobium Alloying, MDPI Journal, Metals , 8, 234

[83] Irati Zurutuza Renom, 2022, Exploitation of synergetic effect of Mo and Nb on high strength quenched and tempered boron steels, PhD. Thesis, Tecnun Universidad de Navarra, İspnya

[84] Jack B. Goldman, 1963, Termodynamic properties of Molybdenum and Columbium: An annotated bibliography, Lockheed Missiles and Aircraft Corporation, California, A.B.D

[85] J.G. Speer, 2015, Solubility and Precipitation of Carbides Containing Niobium and Molybdenum in Low Alloy Steels, Proceedings of the Second International Symposium on Mo and Nb Alloying Steels Volume 2, s. 85-98, Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineracao, Brezilya

[86] M. F. Ashby, 2005, Materials Selection in Mechanical Design, 3rd ed., Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford

[87] Suchy I., 2006, Handbook of Die Design, McGraw Hill

[88] Wick Charles, 1984, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4. Baskı, Vol.2: Forming, Ch. 2, Die and Mold Materials, s.2-1, SME, Society of Manufacturing Engineers

[89] J. R. Paquin ve V. Boljanovic, 2005, Die Design Fundamentals, 3. Baskı, Industrial Press

[90] Sandberg N., 2012, On the machinability of high performans tool steels, PhD Thesis, Uppsala University, Faculty of Science and Technology, Sweden, s 18-19

[91] Colas R. Ve Totten G. E., 2016, Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys, 3. Cilt, Sayfa 2038

[92] William E. Bryson, Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels, 2. Baskı, Good Design Practices, 17. Bölüm, s. 125, Hanser Publishers, Munih/Almanya, Hanser Publications, Cincinnati/A.B.D.

[93] TTGV (Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı, Eylül 2021, Üretimin Geleceğinde Gelişen Teknlojiler-Metal Malzemelerin Geleceği Raporu, Ankara

[94] ASM Metals Handbook,1993, Forming and Forging, 14. Cilt, 9. Baskı ASM International

[95] Vukota Boljanovic, 2004, Sheet metal forming processes and die design, s. 13-14, Industrial Press, New York

[96] Kutz M. (Editör), 2002, Handbook of Materials Selection, S. 939, John Wiley & Sons, Inc., NewYork

[97] Sachin G. Ve ark., 2015, Design Analysis and Overview of Press Tool With its Defects and Remedies, cilt 3, International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences

[98] TTGV (Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı, Eylül 2021, Üretimin Geleceğinde Gelişen Teknlojiler-Metal Malzemelerin Geleceği Raporu, Ankara

[99] Vukota Boljanovic, 2004, Sheet metal forming processes and die design, s. 116 Industrial Press, New York

[100] Taylan Altan-Editör, 1998, Schuler Metal Forming Handbook, s. 275, Springer, Berlin Heidelberg, Almanya

[101] SME, 2010, Fundamentals of Tool Design, 6. Baskı, s. 220, Society of Manufacturing Engineers, Michigan)

[102] Mendi F, 2001, Kesme kalıplarının bilgisayar yardımıyla tasarımı ve tasarım süresinin etüdü, Teknoloji, 127-137

[103] R. Pearce, Sheet Metal Forming, The Adam Hilger Series on New Manufacturing Processes and Materials, 1991

[104] Theis H.E., 1999, Handbook of Metalforming Processes, 1999

[105] Aroba Saleem, Effect of Manufacturing on Microstructure and Magnetic Properties of Non-Oriented Electrical Steel Sayfa 21, PhD. Thesis, McGill University, Montreal, Kanada

[106] Wick Charles, 1984, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Vol.2: Forming, Ch. 4, Sheet Metal Blanking and Forming, s.4-25, SME, Society of Manufacturing Engineers

[107] Doç.Dr. Orhan ÇAKIR, 2022, Geleneksel Olmayan İmalat Yöntemleri, Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul

[108] Prof. Dr. Naci Kurgan, 2022, Alışılmamış İmalat Yöntemleri, Ders Notları, 19 Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun

[109] S. Tumanski, 2011, Magnetic Materials, Handbook of Magnetic Measurements, Ch. 3, s. 121, CRC Press, London, U.K.

[110] P. Baudouin p. Ve ark., 2003, The effect of the guillotine clearance on the magnetic properties of electrical steels, Journal of Magnetism and Magnetic Materials v.256, s.32–40)

[111] Christoffer Christiansen, 2017, Material choice for a rotor in a switched reluctance high speed motor, s. 7, Y. Lisans Tezi, Karlstads Üniversitesi, İsveç

[112] Luca Salvador, 2016, Influence of Cutting Process on Magnetic Properties of Electrical Steel, Y. L. Tezi, s. 17-21, Endüstri Müh, Padova Üniv. İtalya

[113] Schoppa A. ve Ark., 2000, Infuence of the cutting process on the magnetic properties of non-oriented electrical steels, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 215-216, issue 1, pp. 100-102

[114] AKSteel, 2007, Selection of Electrical Steels for Magnetic Cores, Product Data Bulletin, AK Steel Corporation, Ohio A.B.D.

[115] AKSteel, 2007, Selection of Electrical Steels for Magnetic Cores, Product Data Bulletin, AK Steel Corporation, Ohio A.B.D.

[116] Demir, A., ve Saraç, Z., 2013, Nüve Malzemelerinin Manyetik Kayıplarının Ölçülmesi, # 3-6, s. 99, Elektrik Mühendisleri Odası Dergis

[117] Viale D. Ve ark, 2002, Optimizing Microstructure for High Toughness Cold-Work Tool Steels, Proceedings of the 6th International Tooling Conference, Karlstad, Sweden, s.306

[118] H. Bhadeshia, 2001, Design of Ferritic Creep-resistant Steels, Vol. 41 # 6, s. 629, University of Cambridge, ISIJ International

[119] Sir Alan Cottrell, 1995, Chemical Bonding in Transition Metal Carbides, Institute of Materials Book # 613, CRC Press

[120] ASM Handbook, Volume 9: Metallography and Microstructures, 2004, s. 644–669, ASM International

[121] Prof. Dr. J. Lecomte-Beckers ve J. T. Tchuindjang, 2005, Institut de Mécanique et Génie Civil, Matériaux Métalliques Spéciaux, Liège Belgium, Wiley Analytical Science

[122] Sylvain Depinoy ve ark., 2017, Carbide Precipitation in 2.25 Cr-1 Mo Bainitic Steel: Effect of Heating and Isothermal Tempering Conditions, s. 2164, vv. 48A, The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International

[123] H. Brandis, ve ark, 1980, Processing and Properties of High Speed Tool Steels, s. 1-18, TMS-AIME, A.B.D.

[124] Rafael A. Mesquita, 2017, Tool Steels-Properties and Performance, s. 79, CRC Press, Taylor-Francis Group, LLC

[125] H. Brandis, ve ark, 1980, Processing and Properties of High Speed Tool Steels, s. 1-18, TMS-AIME, A.B.D.

[126] Verhoeven, J. D. 2007. Steel Metallurgy for Non Metallurgist. Ohio, ASM International, Materials Park

[127] Meilinda Nurbanasari, 2013, Influence of Conventional Heat Treatment and Thermomechanical Processing on the Microstructure and Hardness of Two Tungsten Hot Working Tool Steels, PhD. Thesis, s. 21-22, The University of Sheffield, U.K.

[128] Porter D. ve ark, 2009, Phase Transformations in Metals and Alloys, 3. Baskı, s. 421-422, CRC Press, Taylor & Francis Group

[129] N. T. H. Oanh ve N. H. Viet, 2020, Precipitation of $M_{23}C_6$ Secondary Carbide Particles in Fe-Cr-Mn-C Alloy during Heat Treatment Process, MDPI Journal, Metals , 10, 157

[130] N.I. Medvedeva, D.C. Van Aken ve J.E. Medvedeva, 2015, Computational Materials Science, 96A, s. 159-164

[131] Akyıldız Ö., 2018, Simulation of Phase Equilibria in High Chromium White Cast Irons, Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, Vol. 23, No. 3, s. 179-189) DOI: 10.17482/uumfd.333701

[132] Yiu L. Ve ark., 2015, Mechanical properties and electronic structures of $M_{23}C_6$ type multicomponent carbides, Journal of Alloys and Compounds, # 648, s. 874-880 Elsevier

[133] West, D.F. and N. Saunders, 2013, Ternary Phase Diagrams in Materials Science, 3. Baskı, Maney Publishing

[134] Minshi Wang ve ark., Primary carbide transformation in a high performance microalloy at 1000 °C, 2019, Journal of Alloys and Compounds, vol. 781, s. 751-760

[135] Martin Magnuson and Maurizio Mattesini, 2017, Chemical bonding and electronic-structure in MAX phases, Thin Solid Films 621, s.108-130, Elsevier/Science Direct

[136] Deysher, G., ve ark., 2019, American Chemical Society, 14, #1, s. 204–217, ACS, A.B.D.

[137] J. Branco, G. Krauss, 1987, Heat treatment and microstructure of tool steels for molds and dies, Proceedings of an International Conference, s. 94-117, Colorado School of Mines Press, U.S.A.

[138] M. A. Rehan, 2019, Effect of H. treatment on microstructure and mechanical properties of %5 Cr CW tool steel, PhD Thesis, s. 28, University West, İsveç

[139] H. Sağlam ve R. Kuş, 2011, Performance of Internal Thread Rolling Head and The Mechanical Properties of Rolled Thread, s. 210, 6. International Advanced Technologies Symposium, IATS'11, Elazığ

[140] Christopher White, 2005, Observations on the Development of Wood Screws in North America, MFA Museum of Fine Arts, Boston

[141] Collins J.A. ve ark., 2010, Mechanical Design of Machine Elements and Machines, 2. Baskı, 13. Bölüm, s. 485, 487, John Wiley & Sons

[142] John G. Nee, 2010, Fundamentals of Tool Design, 6. Baskı, s. 147, SME, A.B.D.

[143] Jim Szumera, 2003, The Tool Steel Guide, s. 45, Industrial Press Inc., New York

[144] Prasad H. ve ark, 2020, Determination of Optimal Torque in Thread Rolling Operation, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 68 Issue 5

[145] Heinz Tschaetsch, 2006, Metal Forming Practise; Processes – Machines – Tools, s. 59-60, Berlin Heidelberg: Springer, 2006

[146] O.S. Zhelezkov, S.A. Malakanov, V.V. Semashko, 2017, Prediction of Thread Rolling Tools Wear Resistance, International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, Procedia Engineering v. 206 s. 630–635, Elsevier

[147] Christopher J. McCauley, 2012, Machinery Handbook, 2012, 29. Baskı, Numbering Systems, s. 398, Industrial Press, New York, A.B.D.

[148] David A. Stephenson ve John S. Agapiou, 1997, Metal Cutting Theory and Practice, s. 49-50, Marcel Dekker Inc., Newyork, A.B.D.

[149] S. Kalpakjian ve S. R. Schmid, 2009, Manufacturing Engineering and Technology, 6. Baskı, Bölüm. 33-5, Wear, s. 377. Pearson

[150] Thomas J. Drozda, 1983, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4. Baskı, Vol.1: Machining, Ch. 12, Thread Rolling, s.12-128, SME, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, A.B.D

[151] *ASM Handbook,* 1989, Volume 16, Machining 9. Baskı, ASM International

[152] Steel Heat Treatment Handbook: Metallurgy and Technologies, 2006, 2nd Edition, George E. Totten (Ed.), "Chapter 6, Taylor & Francis Group, LLC

[153] S. Kalpakjian ve S. R. Schmid, 2009, Manufacturing Engineering and Technology, 6. Baskı, Bölüm. 33-5, Wear, s. 961-963. Pearson

[154] Karl-Heinz Zum Gahr, 1987, Microstructure and Wear of Materials, Tribology Series, 10, Elsevier

[155] M. Maleque ve M. Salit, 2013, Materials Selection and Design, s. 19-20, Springer

[156] Kutz M. (Editör), 2002, Handbook of Materials Selection, S. 756, John Wiley & Sons, Inc., NewYork

[157] İbrahim Özbek, 1999, Borlama yöntemiyle yüksek hız çeliklerinin yüzey performanslarının geliştirilmesi, s. 3, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi

[158] Hatice AKÇA, Osman İYİBİLGİN, Engin GEPEK, 2020, Biyomalzemeler ile İmplant Üretimi Sürecinin Biyotriboloji Yönünden Değerlendirilmesi, s. 681, # 8, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

[159] Kenneth Holmberg, Allan Matthews ve Helena Ronkainen, Coatings tribology, contact mechanisms and surface design, Tribology International, 1998, Vol. 31, Nos 1–3, pp. 107–120, Elsevier Science Ltd.

[160] D Casellas ve ark., 2007, Fracture toughness of carbides in tool steels evaluated by nanoindentation, Acta Materialia v.55, p 4277–4286, Science Direct, Elsevier

[161] J. A. Collins, 1993, Failure of Materials in Mechanical Design, 2. Baskı, Wiley

[162] Alexander Norrby, 2010, Nanotribological Characterization of Advanced Tool Steels, Abstract, Y. Lisans Tezi, Karlstads Üniversitesi, İsveç

[163] Heikkila, I., 2013, The Positive Effect of Nitrogen Alloying of Tool Steels Used in Sheet Metal Forming, PhD Thesis, Uppsala University, Faculty of Science and Technology, Sweden, s. 10

[164] Y. Arslan ve A. ÖZDEMİR, 2013, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi Cilt 2, # 3

[165] ASTM G40, 1999, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion

[166] Şenol Bayraktar, 2015, Farklı kesme yöntemleri ile üretilen silisli sac paketlerinin elektrik makinelerinin performansı üzerine etkisi, Doktora Tezi, İmalat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Ankara

[167] Bharat Bhushan, 2001, Modern Tribology Handbook, 1. Cilt, Principles of Tribology s. 1394-1397, CRC Press LLC, Florida, A.B.D.

[168] Rachel Collier, 2019, Experimental and Modeling Study of Sliding Wear Performance for Selected Molybdenum Stellite Alloys, Master Thesis, Faculty of Graduate and Postdoctoral Affairs, Applied Science in Materials Engineering, Carleton University Ottawa, Ontario, Kanada, s. 20

[169] R. P. J. Blau, B. T. Consulting, 2017, Sliding and Adhesive Wear, vol. 18, s. 313–322, Friction Lubrication and Wear Technology

[170] Li, Dongyang, 2017, Abrasive Wear, cilt 18, s. 243, Friction, Lubrication, and Wear Technology

[171] Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor, 2014, Engineering Tribology, 4. Baskı, Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K.

[172] E. A. Brandes ve G. B. Brook,1992, Smithells Metals Reference Book, 7. Baskı, Friction and Wear, s. 25-11 ve 25-15, Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K.

[173] Kenneth G. Budinski, 2014, Friction, Wear and Erosion Atlas, Ch. 6, s. 73-78, Impact Wear, CRC Press-Taylor & Francis Group

[174] ASTM G40, 1999, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion

[175] Patrik Karlsson, Anders Gaard, Pavel Krakhmalev,2014, Influence of tool steel microstructure on friction and initial material transfer, Wear, #319, s. 12-18, Elsevier

[176] Prof. Dr. J. Lemaitre ve Prof. Dr. R. Desmorat, 2005, Engineering Damage Mechanics, Berlin, Springer2

[177] Sohar, R. ve ark., 2008, Vienna University of Technology, Anisotropy effects on gigacycle fatigue behaviour of high Cr alloyed cold work tool steel, Slovenska Akademia Metalic Materials, volume 46, Issue 4, p 197-207

[178] L. M. Scholl, A. Bezold, C. Broeckmann, 2022, Institute for Materials Applications in Mechanical Engineering, Aachen University, Germany

[179] Childs T. ve ark., 2000, Metal Machining, sayfa 118, Arnold Publishers, Londra

[180] Ingrid Picas, 2012, Doktora Tezi, Mechanical behaviour of tools, microstructure on fatigue, fracture and damage, Universitat Politècnica de Catalunya, İspanya

[181] G. Roberts, G. Krauss, R. Kennedy, 1998, Tool Steels. 5. Edition, Ch.1, s.1, ASM International

[182] Giang Ngoc Anh, 2004, Multi-scale Model for Fatigue in Carbide-rich Tool Steel, PhD. Thesis, Aachen University, 2014, s.2, 5

[183] 30.12.2022 tarih ve #32059 Resmi Gazete #6622 Cumhurbaşkanı kararı; İstatistik Pozisyonlarına Bölünmüş Türk Gümrük Tarife

[184] T. C. Ticaret Bakanlığı, Dış Ticaret Verileri, TÜİK Türkiye İstatistik Kurumu

[185] Basbanes, Levan, Editör, 2007, Advanced Materials Research Trends, Nova Science Publishers

[186] C. Berger, H. Scheerer, J. Ellermeier, 2010, Modern materials for forming and cutting tools, Materials Science & Technology, s. 5-16, volume 41, # 1, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, Almanya

[187] Subaşı M. R., 2019, Pres Kalıpları İmalatında Malzeme Seçimi İçin Bir Karar Destek Sistem Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya

[188] Ali Özcan, 2018, Ardışık Kalıplarda Kalıp Malzemesinin Aşınma ve Ürün Geometrisi Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniv., s. 88-89

[189] Colas R. Ve Totten G. E., 2016, Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys, 4. Cilt, Sayfa 2451

[190] ASM Metals Handbook,1993, Forming and Forging, 14. Cilt, 9. Baskı ASM International

[191] Ersin Arslanbulut, 2020, Farklı yüzey işlemleri uygulanmış dökme demir ve çelik kamların aşınma dayanımlarının incelenmesi, s.5-6, Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas

[192] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbet, 2011, Shigley's Mechanical Engineering Design, 9. Baskı, Ch. 2 Materials, s. 49-50, McGraw-Hill series in Mechanical Engineering

[193] Rafael A. Mesquita, 2017, Tool Steels-Properties and Performance, s. 71-72, CRC Press-Taylor & Francis Group, LLC

[194] Alpay Yılmaz, 2006, Nb alaşımlı HSS çeliklerin aşınma davranışı, Doktora Tezi, s. 53, Kocaeli Üniversitesi

[195] Melika Ozer, 2022, Influence of heat treatments on microstructure and wear behavior of AISI H13 tool steel, s. 396, # 60, Kovove Materialy

[196] Saleem A. ve ark., 2018, Microstructure and mechanical property connections for a punched non-oriented electrical steel lamination, Materials Science and Engineering

[197] L. Kirkhorn L. ve ark, 2013, The influence of tool steel microstructure on friction in sheet metal forming, Wear, #302, 1268-1278

[198] Kenneth G. Budinski, 2014, Friction, Wear and Erosion Atlas, Ch. 6, s. 79, Impact Wear, CRC Press-Taylor & Francis Group

[199] K. Wieczerzak, P. Bala, M. Stepieri, T. Koziel, 2015, The Characterization Of Cast Fe-Cr-C Alloy, Archives of Metallurgy and Materials 60(2)

[200] Siwei Cao, 2013, Determination of the Fe-Cr-Ni and Fe-Cr-Mo Phase Diagrams at Intermediate Temperatures using a Novel Dual-Anneal Diffusion-Multiple Approach, Doktora Tezi, Ohio State University

[201] (https://history.aip.org/phn/11410001.html Erişim Tarihi: 22.03.2023)

[202] Edgar Collins Bain, Harold. W. Paxton, 1966, Alloying elements in steel, 2. Baskı, ASM, Metals Park, Ohio, A.B.D.

[203] Karl E. Dawson, Dissimilar Metal Welds, PhD. Thesis, University of Liverpool, s.38

[204] Sylvain Depinoy, 2017, Evolution microstructurale d'un acier 2.25 Cr – 1 Mo au cours de l'austénitisation et du revenu : croissance des grains austénitiques, séquence de précipitation des carbures et effets sur les propriétés mécaniques, Ph.D Thesis, s.120, Ecole Nationale Sup´erieure des Mines de Paris. Fransa

[205] ASM Speciality Handbook, tool Materials, 1995, s. 136,ASM International

[206] Hakan Koçak, 2006, Takım Çelikleri El Kitabı, s. 122 ve 126, Sağlam Metal, İstanbul

[207] T.C. Cumhurbaşkanlığı Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Kurulu İleri Malzeme Teknoloji Yol Haritası, Temmuz 2021, Ankara

[208] 1. U. S. National Research Council. Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. The National Academies Press (2008). 2. European Commission. Critical raw materials for the EU (2010). 3. U.S. Department of Energy. Critical Materials Strategy (2010). 4. Graedel, T. E. et al. Methodology of metal criticality determination. Environ. Sci. Technol. 46, 1063–1070 (2012)

[209] K. Miao ve ark., 2015, Coarsening of carbides during different heat treatment conditions. S. 513-523, # 622 Journal of Alloys and Compounds

[210] S. Farahany ve ark., 2022, Effect of triple tempering temperature on microstructure, mechanical, and wear properties of K340 cold work tool steel, Journal of Materials Engineering and Performance

[211] G. Z. S.Wilmes, 2002, Effect of niobium and vanadium as alloying element in tool steels with high chromium content. 6. International Tooling Conference, s. 269-287, Karlstadt, İsveç

ÖZGEÇMİŞ

İlk, Orta ve Lise eğitimlerini tamamladıktan sonra 1982 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Metalurji Mühendisliği bölümünü bitirmiştir. Askerlik görevinin ardından vardiya mühendisi olarak demir çelik üretim sektöründe çalışma hayatına başlamış olup bu görevini hammadde şefi, proje başmühendisi, yatırım müdür yardımcısı, iş geliştirme ve projeler müdürü gibi farklı pozisyonlarda 40 yıl sürdürmüştür. 2012-2018 yılları arasında Marmara Üniversitesinde Çevre ve Enerji, Tesis Tasarımı ve Mühendislik Malzemeleri Ekonomisi dersleri vermiştir. EuroSlag (Avrupa Cüruf Birliği), TSE, Sanayi Bakanlığı ve Üniversiteler nezdinde ulusal ve uluslararası organizasyonlarda komite üyeliklerinde bulunmuş olup yurtiçi ve yurtdışı birçok seminer ve konferanslara konuşmacı olarak katılmıştır. 2015-2017 yıllarında Çelik İhracatçıları Birliğine bağlı MATİL Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarları A.Ş' nin İTÜ'de bulunan Çelik Test – Araştırma Geliştirme Merkezinde Kalite Sistemleri ve Sertifikasyon Müdürü olarak görev yapmıştır. Halen GlobChem İtalya firmasının Türkiye ve Azerbaycan ülke müdürü olarak görev yapmaktadır.

Evli ve iki çocuk babasıdır.