



Katı Ortam Sementasyonunun Parametreleri ve Uygulama Alanları

The Parameters and Application Areas of Solid Medium Cementation

Arif Canbuldu¹ , Oğuz Erdem^{1*} 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 06/12/2023

Kabul / Accepted: 29/12/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 01/12/2024

Son Versiyon/Final Version: 01/01/2024

Öz

Makine parçalarının tasarımı ve imalatı, mühendisliğin ve fen bilimlerinin birçok olgusunu kapsamaktadır. Mekanğin temeli olan statik ve dinamik tasarıma ilaveten uygun malzeme seçimi ve uygun yüzey işlemini belirleme genellikle deneyimlerle öğrenilen veya standartlar tarafından belirlenen kriterlerdir. Günümüz endüstrisinde, daha pahalı alaşım çeliklerini daha düşük maliyetli çeliklerle değiştirerek ya da düşük karbonlu çeliklerin yüzeylerinin sertleştirilmesiyle daha dayanıklı ve daha düşük maliyetli çelikler elde etme çalışmaları yapılmaktadır. Sementasyon bir diğer adıyla karbürizasyon, genellikle düşük karbonlu çeliklere uygulanan termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Sementasyon işlemiyle temel olarak karbon verici malzemeden çelik yüzeyine karbon difüzyonu sağlanarak yüzey sertliği ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Sementasyon işlemi katı, sıvı ya da gaz ortamda gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada, katı ortam sementasyonunun işleme fiziği, uygulama alanları, değişken parametreleri, yöntemdeki karbon verici malzemeler, sementasyon sıcaklıkları ve süreleri, işlemde kullanılan aktivatör türleri ve oranları hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Sementasyon, karbürizasyon, karbürleme, kutu sementasyon”

Abstract

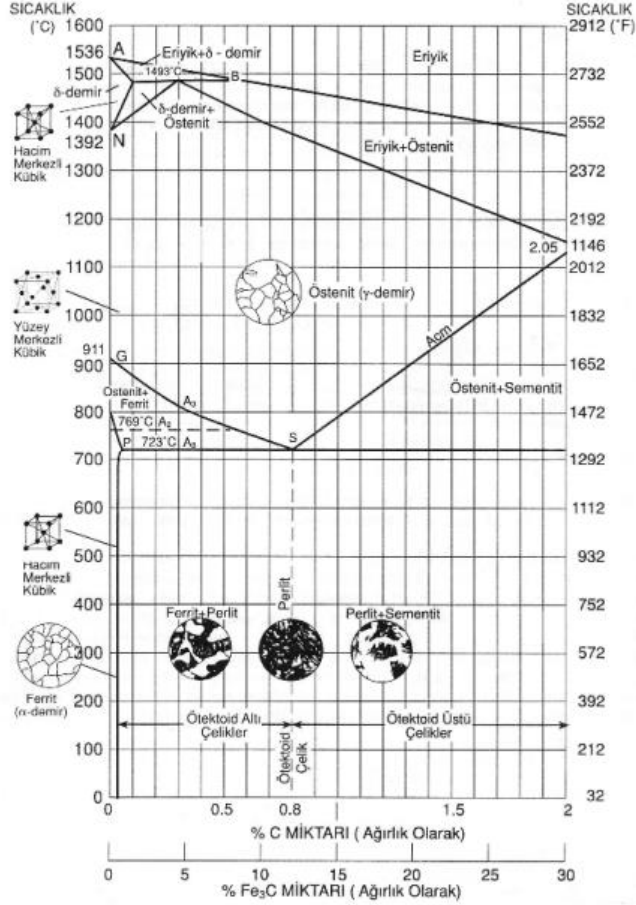
The design and manufacturing of machine parts covers many aspects of engineering and science. In addition to static and dynamic design, which is the basis of mechanics, choosing appropriate materials and determining the appropriate surface treatment are criteria generally learned through experience or determined by standards. In today's industry, efforts are being made to obtain more durable and lower-cost steels by replacing more expensive alloy steels with lower-cost steels or by hardening the surfaces of low-carbon steels. Carburization, also known as carburization, is a thermochemical surface hardening process generally applied to low carbon steels. The cementation process basically aims to improve mechanical properties such as surface hardness and wear resistance by providing carbon diffusion from the carbon donor material to the steel surface. The cementation process can be carried out in solid, liquid or gaseous medium. In this study, detailed information is given about the processing physics of solid medium cementation, application areas, variable parameters, carbon donor materials in the method, cementation temperatures and times, activator types and ratios used in the process.

Key Words

“Cementation, carburization, carburizing, box cementation”

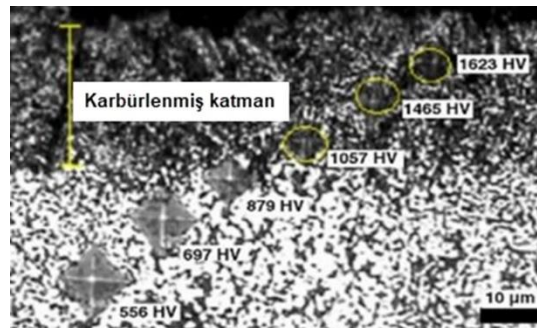
1. Giriş

Sementasyon; karbon içeriği düşük olan çelik malzeme yüzeyine katı, sıvı veya gaz ortamda karbon verilmesi esasına dayanan en eski yüzey sertleştirme işlemidir. Yüzey sertleştirilmesi sayesinde malzeme yüzeyinde elde edilen sert katmanın, malzemenin elastik deformasyonuna izin verecek kadar tok ve aşınmalardan etkilenmeyecek kadar dayanıklı olması gerekmektedir. Sementasyon işlemi 800-950 °C arasında yapılan termokimyasal bir işlemidir. Çelik ısıtılarak sıcaklığı Şekil 1’de görülen östenitik nokta üzerine çıkarılır. Düşük sıcaklıklarda mevcut olan hacim merkezli kübik (HMK) kafesli α -Fe (ferrit) oldukça düşük miktarda karbon çözüdürebildiğinden sementasyon işlemi yüzey merkezli kübik (YMK) kafesine sahip olan ve %2,14’e kadar karbon çözüdürebilen γ -Fe (östenit) yapı sıcaklıklarında yapılmaktadır (Yılmaz, 1985).



Şekil 1. Demir-Karbon dengeli diyagramı (Karagöz, 2007).

İşlemin yapıldığı ortamda karbonca zengin bir koruyucu atmosfer meydana getirilerek çeliğin yüzeyinden çekirdeğine doğru karbon difüzyonu sağlanır. Sementasyon yapılacak olan çelik öncelikle karbon difüzyon işlemi yapılabilmesi için östenit faz sıcaklığına çıkarılır ve ardından karbon verici ortamda karbonun malzemenin yüzeyine difüzyon olması beklenir. Daha sonra parçaya su verilerek yüzeyin sertleştirilmesi sağlanır. Sementasyon katı, sıvı veya gaz ortamlarda gerçekleştirilebilir. Fakat karbon verici ortam hangisi olursa olsun karbonun taşınımı gaz fazında gerçekleşmektedir. Şekil 2’de görüldüğü gibi karbon verici ortama göre sementasyon derinliği de farklılık gösterebilmektedir (Tang v.d., 2022).



Şekil 2. 950 °C’de 8 saat karbürlenmiş çeliğin farklı derinliklerdeki sertlik değişimi (Sabri, 2010).

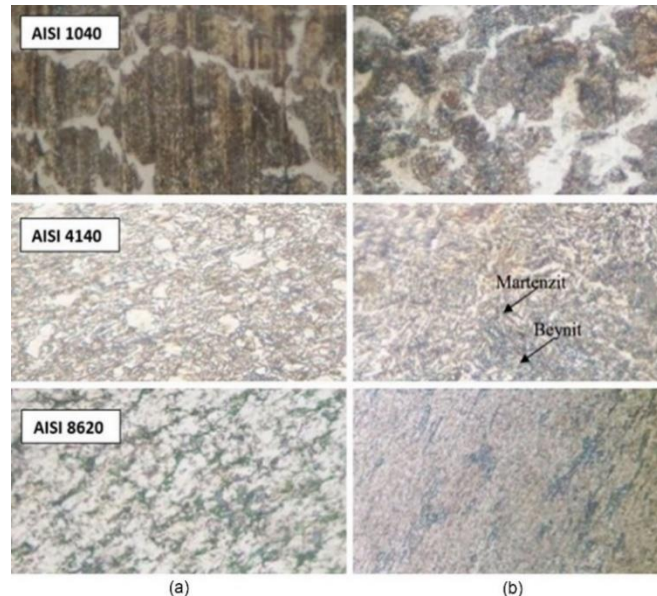
2. Sementasyon Çeşitleri

Katı ortam sementasyonu (KOS) (kutu sementasyonu), sıvı ortam sementasyonu (SOS) (tuz banyosunda sementasyon) ve gaz ortam sementasyonu (GOS) olmak üzere farklı karbon verici ortamlarda sementasyon işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Metal endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bu sementasyon yöntemleri her boyuttaki parçalar için kullanılabilir. Sementasyonun üç yönteminde de karbon elementi moleküler olarak değil atomik olarak çelik yüzeyine difüzyon olur. Sementasyon tüm yöntemlerde çeliğin östenit fazı sıcaklığına kadar ısıtılmasıyla metal-gaz reaksiyonu sonucunda gerçekleşir. Her metot çelik yüzeyinde birbirinden farklı sementasyon derinlikleri ortaya çıkarır ve sementasyon sonrasında uygulanan sertleştirme işlemine göre birbirinden farklı sertlik değerleri elde edilir (Yegen, 2009). Potasyum siyanür (KCN) veya sodyum siyanür (NaCN) gibi tuzlar SOS işleminde karbon verici olarak kullanılmaktadır. Uygulanacak sementasyon sıcaklığına ve buna bağlı olarak istenen sementasyon derinliğine göre, kullanılacak tuzun seçimi gerçekleştirilir. Buna göre kullanılan tuzlar; ince sementasyon derinliği veren tuzlar (düşük sementasyon sıcaklığında çalışan) ve sementasyon derinliğini arttıran (yüksek sementasyon sıcaklığında çalışan) tuzlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Siyanür tuzları insan sağlığı için zararlı olduğundan kullanımında dikkatli olunması gerekmektedir (Topbaş, 1998). GOS işleminde, Şekil 3'te de görüldüğü gibi parçanın bulunduğu sızdırmaz bir fırın içerisine karbon verici gaz gönderilerek sementasyon işlemi gerçekleştirilir. Bu gazlar genellikle metan (CH_4), etan (C_2H_6), asetilen (C_2H_2) veya propan (C_3H_8) gibi hidrokarbon esaslıdır (Karagöz, 2007).



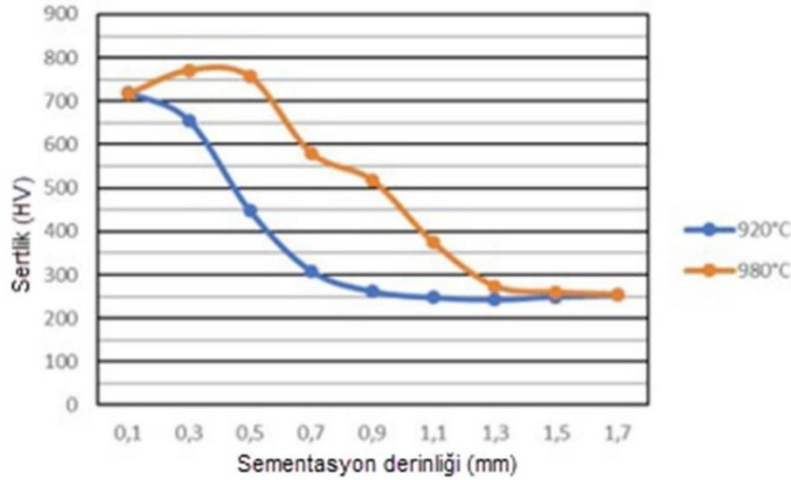
Şekil 3. GOS fırını (Karagöz, 2007).

Pekgöz ve arkadaşları, AISI1040 imalat çeliği, AISI4140 ıslah çeliği ve AISI8620 sementasyon çeliğini tuz banyosunda SOS işlemine tabi tuttuktan sonra temperleme işlemi yaparak çelik yüzeylerinin sertlik ölçümlerini gerçekleştirmişler ve sementasyon işleminin mikroyapıya olan etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda, numunelere 200 °C sıcaklıkta 2 saat boyunca ön tavlama uygulanmıştır. AISI1040 çeliğine 845°C'de 2 saat, AISI 4140 çeliğine 845 °C'de 4 saat ve AISI8620 çeliğine ise düşük karbonlu çelik olduğundan; 900 °C'de 4 saat tuz banyosunda SOS işlemi uygulanmıştır. İşlemlerin ardından numuneler soğutma tuzunda bekletildikten sonra normal suya atılarak soğutma işlemi tamamlanmıştır. Sertleştirme işleminden sonra 250 °C'de 2 saat boyunca menevişleme işlemi uygulanmıştır. SOS işlemi sonucunda yüzey sertlik değerleri iki katı oranda artmıştır. Şekil 4'te verilen mikroyapı görüntülerine göre AISI1040 çeliğindeki mikroyapı perlit ve sementit ağırlıklıyken, düşük alaşımlı çeliklerin yapısında karbür bileşenleri, beynit ve martenzit gözlemlenmiştir. Bu mikroyapısal değişikliklerin sertlik değerini etkileyen en önemli parametreler olduğu tespit edilmiştir (Pekgöz v.d., 2013).



Şekil 4. Çelik numunelerin mikroyapı görüntüleri: a) SOS öncesi; b) SOS sonrası (Pekgöz v.d., 2013).

Erkan ve arkadaşları AISI8620 çeliğine asetilen gazı kullanarak GOS işlemi gerçekleştirmişler ve işlem sonucunda AISI8620 çeliğinin sertlik derinliklerini ölçmüşlerdir. GOS işlemi sonucunda, 920°C’de sertlik derinliği 0,401 mm iken, 980°C’de sertlik derinliği değeri 0,798 mm ile yaklaşık iki katına ulaşmıştır. Şekil 5’te verilen tabloda da görüldüğü gibi 980°C’de parça yüzeyine daha çok karbonun emilmesi sayesinde sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir (Erkan v.d., 2020). Benzer şekilde Coşar, 20MnCr5 ve 8622RH çeliklerine GOS işlemi uygulamıştır. İşlem uygulanmadan önce numunelerin sertlikleri yaklaşık 19-20 HRC iken, GOS işlemi sonunda 20MnCr5 çelik numunesinin yüzey sertliği 57,3 HRC ve 8622RH çeliğinin ise 60,5 HRC olarak tespit edilmiştir. Her iki numune arasında 8622RH çeliğinde daha yüksek ölçülen sertlik değerinin, içeriğindeki Mo ve Ni elementleri sebebiyle oluştuğu belirtilmiştir (Coşar, 2014).



Şekil 5. Sertlik ölçüm sonuçları (Erkan v.d., 2020).

KOS işleminde ise karbon verici ortam olarak genellikle odun kömürü kullanılmaktadır. KOS işleminde, yüzey sertleştirilmesi yapılacak olan çelik, karbon verici toz ve aktivatör malzemeyle birlikte Şekil 6’da ki gibi sızdırmaz bir kutuya yerleştirilip fırında gerçekleştirildiği için pratikte “kutu sementasyonu” olarak da anılmaktadır.

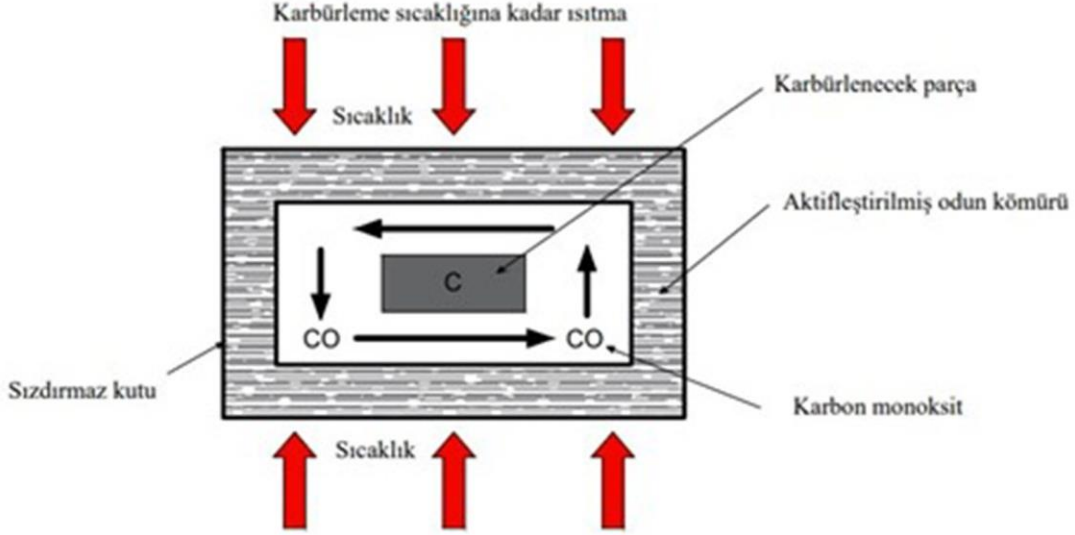


Şekil 6. Sementasyon kutusu (Karaca, 2019)

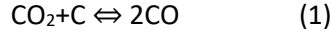
2.1. KOS İşleminin Mekanizması

KOS, sertleştirme yapılacak olan çeliğin sementasyon kutusunun içinde bulunan herhangi bir karbon kaynağı ortamında, östenit faz sıcaklığına kadar ısıtılmasıyla karbonun yüzeylere difüzyonu ile gerçekleştirilen bir yöntemdir. Pratikte genellikle odun kömürü KOS işleminde karbon kaynağı olarak tercih edilir. Çeliğin ortamda ısıtıldığı sıcaklık 850-930 °C değerleri arasında olmakla beraber çeliğin sertleşme derinliğine göre ısıtma süresi genellikle 9-10 saat civarındadır (Yılmaz, 1985). Karbon elementi, sıcaklığın yükselmesiyle kutu içerisindeki havanın oksijeni ile tepkimeye girerek karbon dioksit (CO₂) gazı oluşturur. Karbon dioksit (CO₂)

gazı da karbon elementi ile tekrar reaksiyona girerek karbon monoksit (CO) gazı oluşturur (Şekil 7). KOS işlemi CO gazı ile gerçekleşmektedir (Denklem 1 ve 2).

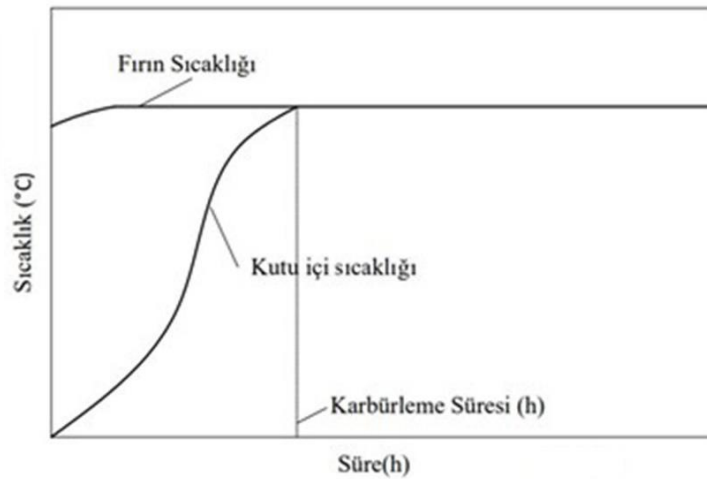


Şekil 7. Kutu sementasyonunun şematik gösterimi (George, 2016; Çölova, 2021).



CO gazı çelik yüzeylerinde ayrışarak CO₂ gazı ve atomik karbonu oluşturur. Atomik karbon, östenit faza ulaşan çelik yüzeyce emilerek yapıda çözünür. Bu sayede çelik yüzeyine karbon verilmiş olur. Ortaya çıkan CO₂ gazı, yine odun kömürü ile reaksiyona girerek CO gazı oluşturur. Reaksiyonlar tekrar tekrar devam eder. Sementasyon kutusundaki O₂ miktarı zamanla azalacağından gerekli CO₂ gazı üretilebilmesi için karbon kaynağına aktivatör maddeler katılması gerekir. Bunlar CaCO₃ (Kalsiyum karbonat), BaCO₃ (Baryum karbonat), Na₂CO₃ (Sodyum karbonat) ve KCO₃ (Potasyum karbonat) gibi yüksek sıcaklıklarda parçalanabilen toprak alkali karbonatlardır (Karagöz, 2007).

KOS için, çelik parça yüzeyleri iyice temizlenip yağ ve oksitlerinden arındırıldıktan sonra kutunun alt kısmına serilen karbon verici madde üzerine yerleştirilir. Daha sonra karbon verici malzemenin kalını kutu içine dökülerek yerleştirme işlemi tamamlanır. Hava sızdırmazlığı için kutu kapağı kapatılır ve gerekirse kapak çevresi şamot ile sıvanır. KOS işleminde kullanılan karbon verici maddeler düşük ısı iletkenliğe sahip oldukları için kutu içi sıcaklığının karbürleme sıcaklığına erişmesi belli bir zaman almaktadır. Şekil 8'de kutu içi sıcaklığın fırın sıcaklığına ulaşabilmesi için belirli bir süre beklenmesi gerektiği açıkça görülmektedir. KOS işleminden sonra çelik parçaların menevişleme metodu ile sertliği bir miktar azaltılarak sertleştirme sonrası çelik parçalardaki artık gerilmeler giderilir. Genellikle sertleştirme sonrasında çelik parçalar 160-220 °C arasındaki bir sıcaklıkta 1-2 saat menevişleme işlemine tabi tutulurlar (Yılmaz 1985).



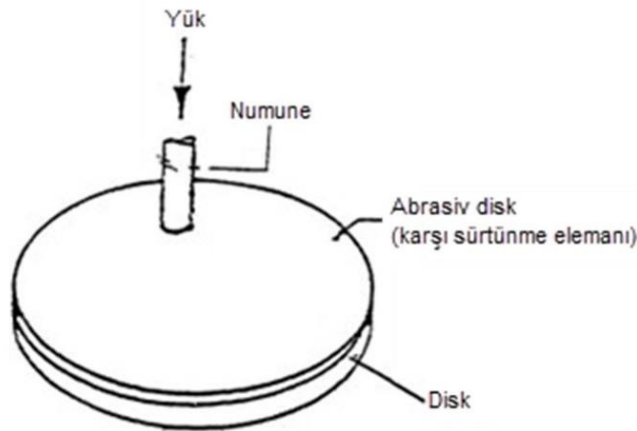
Şekil 8. Fırın ve kutu içi sıcaklığının zamanla değişimi (Yılmaz, 1985)

2.2. KOS İşleminin Parametreleri

KOS işleminde, nihai ürünün mekanik özelliklerine birçok parametre etki etmektedir. Bunlar; çeliğin alaşım yapısı, sementasyon sıcaklığı ve süresi, karbon verici malzeme ve oranı, aktivatör malzeme cinsi ve oranıdır. İmalatçıların KOS işleminden önce karar verme aşamasında bu parametreleri dikkatlice belirlemeleri gerekmektedir. Yüzeide istenen sertlik derinliğinin elde edilebilmesi için sementasyon ortamının belirli bir sıcaklıkta ve belirli bir sürede şartlandırılması gerekir. Sürenin ve sıcaklığın artmasıyla sertlik derinliği de doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu sıcaklıkta çelik parçalar istenilen sertlik derinliğine göre belirlenen bir süre bekletilirler. Sıcaklığın değerinin artırılmasıyla, sementasyon süresi önemli ölçüde azaltılmaktadır. Fakat parçaların çarpılması veya mekanik özelliklerinin zayıflaması gibi risklerden ötürü daha yüksek sıcaklıklara çıkılması uygun değildir. Örneğin; 0,5 mm sertlik derinliği için sementasyon sıcaklığının 950 °C'den 1050 °C'ye yükseltilmesiyle sementasyon süresi yarı yarıya azaldığı deneysel çalışmalarla ispatlanmıştır (Pekgöz v.d., 2013). Ayrıca, sementasyon süresinin artmasıyla yüzey sertliği ve sementasyon derinliği artışının doğru orantılı olduğu birçok çalışmayla tespit edilmiştir (Karagöz, 2019).

Afolalu ve arkadaşları, AISI5130 çeliğine kutu sementasyon ile yüzey sertleştirme işlemi uygulamışlardır. KOS işleminde karbon verici olarak yumurta kabuğu, hurma çekirdeği ve hindistan cevizi kabuğu karışımı kullanılmıştır. Deneyler, 950 °C, 1000 °C, 1050 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda ve 60, 90, 120 ve 180 dakika sürelerde gerçekleştirilmiştir. En yüksek yüzey sertliği değerine (141,03 HV) 1050 °C sıcaklıkta ve 90 dakikada yapılan sementasyon işleminde ulaşılmıştır (Afolalu v.d., 2018). Benzer şekilde Aramid ve arkadaşları, düşük karbonlu (% 0,1999 C içeren) çeliğin KOS işleminde karbon verici olarak öğütülmüş sığır kemiği kullanmışlardır. 850°C, 900°C ve 950°C'de 15 ve 30 dakika yapılan KOS işlemi sonrasında yağda oda sıcaklığına kadar soğutma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra numunelere 550 °C'de temperleme işlemi uygulanarak yüzey sertliği artırılmıştır. En yüksek yüzey sertliği değerine (68,3 HRA) 850 °C sıcaklıkta ve 30 dakikada yapılan KOS işleminde ulaşılmıştır (Aramide v.d., 2010).

Baykara, 16MnCr5 çeliğine KOS işlemi uygulamış ve işlem sonrasında çeliğe aşınma deneyleri gerçekleştirmiştir (Şekil 9). Deneysel çalışmalardan sementasyon derinliği ve sertlik ile aşınma dayanımı arasında doğrudan bir ilişki olmadığını tespit etmiştir. Tribolojik sisteme çok sayıda faktörün etki etmesi ve bu faktörlerden herhangi birinin değişmesiyle diğer faktörlerin aşınma dayanımını etkileyebileceği sonucuna varmıştır. 16MnCr5 çeliğine 930 °C sıcaklıkta, 3,5 saat KOS işlemi uygulandığında en yüksek aşınma dayanımı değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. İşlem sonrası 1,04 mm sementasyon derinliği ve 60 HRC yüzey sertliği elde edilmiştir (Baykara, 1998).



Şekil 9. İki cisimli abrazif aşınma için kullanılan pim-disk deney cihazının şematik görünümü (Baykara, 1998).

Çoban ve arkadaşları, karbon verici ortama %10, %20 ve %30 oranlarında baryum karbonat ($BaCO_3$) katarak CK10 ve 16MnCR5 çeliklerine sabit sıcaklık ve sürede (900 °C, 9 saat) KOS işlemi uygulamışlardır. Deneyler sonucunda, $BaCO_3$ miktarının %10'dan daha fazla olması çeliğin sertleşme derinliğinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Karbon verici ortamdaki %20 ve %30 oranlarındaki $BaCO_3$ ise çelikte hemen hemen aynı sertlik ve sertleşme derinliklerine olanak sağladığı gözlemlenmiştir. CK10 çelikte %10 $BaCO_3$ katkısında, 0,65 mm'den sonra sertlikte ani düşüş gözlemlenirken, %20 ve %30 $BaCO_3$ katkılarında bu düşüş 1 mm'den sonra gerçekleştiği belirtilmiştir. 16MnCR5 çeliğin mikrosertlik ölçümlerinde ise $BaCO_3$ oranı artışı sertleşme derinliğini bariz olarak değiştirmediği ve her üç oranda da birbirine yakın sertlik değerlerinin elde edildiği rapor edilmiştir (Çoban v.d., 2004). Çölova, St37 genel yapı çeliği ile yaptığı karbürleme araştırmasında farklı sıcaklık ve sementasyon süreleri denemiştir. En yüksek sertlik değerlerine 930 °C'de ve 10 saat uygulanan KOS işlemi sonrasında ulaşılmıştır. Aşınma testleri sonucunda uygulanan sementasyon süresi ve sıcaklık değeri ile aşınma kaybının ters orantılı olduğu, fakat yük ile aşınma kaybının ise doğru orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Çölova, 2021).

Forti ve arkadaşları, son yıllarda yüksek korozyon direnci yüzünden popüler hale gelen Fe-Al alaşımlarının, sertleştirilebilme mekanizmaları üzerine KOS çalışmaları yapmışlardır. Fe_2AlX ($X=Ti, V, Nb$) yüzeylerinde karbon atomlarının difüzyonu üzerine yapılan deneylerde, alaşımda titanyum bulunan çeliklerde V ve Nb'ye kıyasla karbon difüzyonunun daha iyi olduğu sonucuna

varmışlardır (Forti v.d., 2021). Hassan, AISI1020 çeliğine karbon verici olarak odun kömürü ve inek kemiği kullanarak bir dizi kutu sementasyon işlemi uyguladıktan sonra sertlik değişimi ve aşınma direnci artışı üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. KOS işleminde 925°C sıcaklık ve 2 saat bekleme süresi değerleri kullanılmıştır. KOS sonrası numuneler fırında yavaşça soğutulduktan sonra yarım saat süreyle 870°C'ye kadar tekrardan ısıtılıp daha sonra suda hızla soğutulmuştur. Son olarak 160°C'de 1 saat süreyle temperleme işlemi yapılarak oda ortamında havayla yavaşça soğutulmuştur. Deneyler sonucunda karbon kaynağı olarak inek kemiğinin kullanılabilmesi anlaşılmıştır. En iyi sonuçları %90 odun kömürü bileşiminde ve bu bileşikle yapılan KOS işleminde 2,32 mm sertlik derinliği değeri elde edildiği bildirilmiştir (Hassan, 2015).

Ihom, %0,18 karbon içerikli çeliğe yaptığı KOS işleminde, karbon verici olarak sığır kemiğinin kullanılabilirliği üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. %60 odun kömürü + %40 sığır kemiği karışımından oluşan karbonlama bileşiğiyle 900 °C'de 8 saatte yapılan KOS işlemi ile 780 HV yüzey sertlik değerine ve 2,32 mm etkili sementasyon derinliğine ulaşılmıştır. Deney sonuçlarından sığır kemiğinde bulunan kalsiyum karbonatın aktivatör madde görevi gördüğü anlaşılmış olup sığır kemiğinin KOS işlemlerinde karbon kaynağı olarak kullanılabilmesi ispat edilmiştir (Ihom, 2013). Yine, Oyetunji ve arkadaşları, karbon verici olarak öğütülmüş istiridye kabuğu, hurma çekirdeği ve sığır kemiği kullanarak %0,078 karbon içeren çeliğe KOS işlemi yapmışlardır. KOS işlemi, %20 oranında BaCO₃ aktivatör kullanılarak 700-1100 °C sıcaklıklarında ve 1-5 saat arasında yapılmıştır. En iyi yüzey sertliği değeri karbon verici olarak sığır kemiği kullanılan ve 900 °C karbürleme sıcaklığında yapılan deneyde ulaşılmıştır. Deniz kabuğunun karbon verici olarak kullanıldığı karbürleme işlemlerinde dekarbürizasyon yaşandığından bu materyalin karbürleme işlemlerinde kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır (Oyetunji v.d., 2012).

Jacquet ve arkadaşları, çelik yüzeyindeki karbon kalınlığının sementasyon süresi boyunca izlenebilmesi adına bir metot geliştirmesi için çalışmalar yapmışlardır. Geliştirilen metodun çalışma prensibi: karbürleme ortamına yerleştirilen sensör ile karbürleme atmosferindeki CO, CO₂ ve CH₄ gazı miktarlarının ölçülerek, kütle akışı hızının hesaplanmasına dayanmaktadır. Denemeler sonucunda geliştirilen metotla çelik yüzeyindeki optimum karbon kalınlığı 70 µm olarak tespit edilmiştir (Jacquet v.d., 2002).

Kaya yaptığı çalışmada, SAE5120 ve SAE8620 çeliklerini 930 °C'de, 60-120-180-240 dakika boyunca KOS işlemine tabi tutmuştur. İşlem sonrası yapılan Charpy-Darbe testinde her iki çelik numunesi için de en uzun süre sementasyon uygulanan numunelerin en az tokluğa sahip oldukları görülmüştür. İşlem uygulanan çeliklerin mikroyapılarına bakıldığında yüzeyde ötektoid üstü, çekirdeğe doğru ötektoid ve çekirdeğe en yakın alanlarda ferritik ile beyitlik yapılardan oluştuğu tespit edilmiştir. SAE5120 çeliğine KOS işlemi yapılmadan önceki yüzey sertliği 207 HV iken, en yüksek değer 240 dakikalık işlem süresinden sonra 871 HV olarak ölçülmüştür. SAE8620 çeliğinin KOS işlemi yapılmadan önceki sertlik değeri 250 HV iken, en yüksek değer 240 dakikalık sementasyon süresinden sonra 855 HV olarak ölçülmüştür. Karbürleme süresinde 4 saat ve üzerindeki sürelerle çıkıldığında, semente edilen numunelerin yüzey kısmındaki sertlik değerlerinde aşırı bir artış olduğu gözlemlenmiştir (Kaya, 2015).

Kılıç çalışmasında, 14NiCr10 ve 14NiCr14 çeliklerine uygulanan KOS işlemine bağlı olarak sertlik ve Şekil 10'da görülen yorulma testi düzeneğinde yorulma dayanımı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sementasyon işlemi sonrasında numunelerin yüzey sertlikleri 14NiCr10'da 59 HRC ve 14NiCr14'te ise 53 HRC olarak ölçülmüştür. Numunelere uygulanan yorulma deneyleri ile, 240 N yük kapasitesinde ve buna karşılık gelen 563,43 MPa gerilmeye numunelerin 1000120 devire kadar yorulmadan dayanabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, tezgâhın en çok uygulayabildiği kapasite olan 300 N yükte ve buna eşdeğer 704,3 MPa gerilmeye 819710 devir daha yapılarak toplamda 1819830 devire kadar malzemelerin yorulmadığı tespit edilmiştir (Kılıç, 2008).



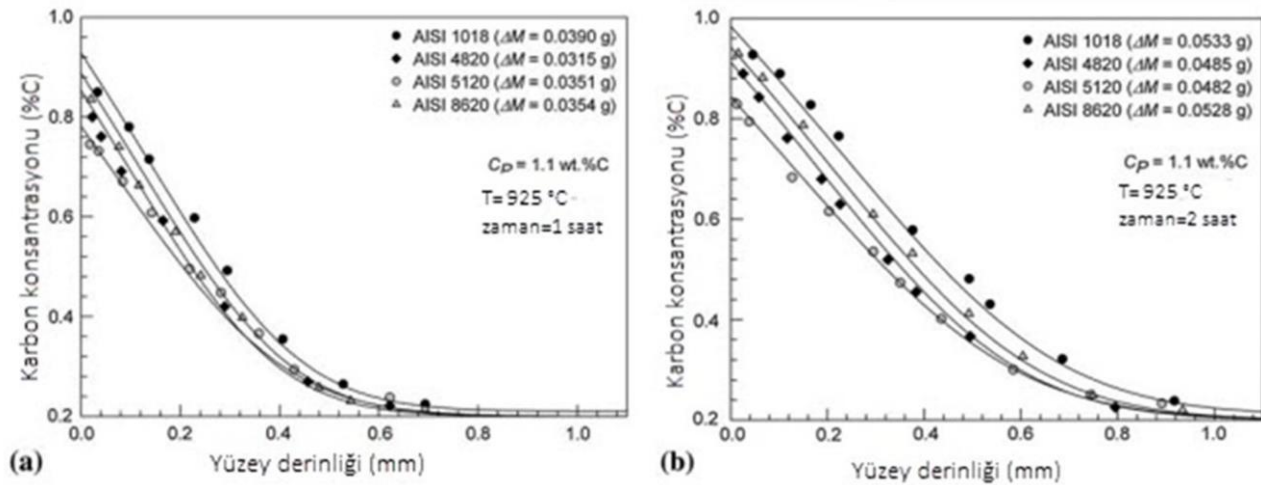
Şekil 10. Yorulma testi düzeneği (Kılıç, 2008).

Kuswanto, endüstride kullanılan pahalı kesme bıçaklarının yerine KOS yöntemiyle sertleştirilen ve nispeten daha ucuz olan düşük karbonlu çeliklerin kullanılması konusunda çalışmalar yapmıştır. Bu amaçla karbürleme ortamı olarak %90 hindistan cevizi kabuğu

(karbon verici) ve %10 baryum karbonat (aktivatör) karışımı tercih edilerek St37 çeliği ile 900 °C sementasyon sıcaklığında ve 2 saat bekleme süresinde KOS deneyleri yapılmıştır. Fırında ısıtma kademeli olarak gerçekleştirilmiş olup, ilk aşamada 200 °C'de 1 saat, ikinci aşamada 500 °C'de 1 saat ve 700 °C'de 1 saat, son olarak karbürleme sıcaklığında (900 °C) 2 saat olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra fırının ısıtılması kapatılarak sıcaklık 350°C'ye düşene kadar yavaşça soğutulmuştur. Fırın 350°C'ye ulaştıktan sonra kapağı açılarak karbürleme kutusu dışarı çıkarılmıştır. Fırın dışında karbürleme kutusunun kapağı açılarak, tüm numuneler açık havada oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. İşlem sonrası elde edilen yüzey sertliği değeri 184,45 kgf/mm² mikro Vikers değerindedir. KOS yöntemiyle St37 çeliğinin sertliğinde %26 artış sağlandığı belirtilmiştir (Kuswanto, 1999).

Özcan, silah namlularının sertleştirilmesi için borokarbürleme üzerine çalışmalar yapmıştır. Borokarbürleme işleminin etkinliğini kontrol amacıyla, aynı numunelere (32CrMoV), aynı sıcaklık ve sürelerde, borlama, KOS ve borokarbürleme işlemlerini uygulamıştır. Borokarbürleme işleminde eşit oranda bor ve karbon kaynağı olarak odun kömürü kullanmıştır. Borlama, KOS ve borokarbürleme işlemleri sonrasında numunedeki mikroyapı değişimleri araştırılmış ve uygulanan üç işlemten sonra malzemelerin sertliklerindeki artış karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda borlama yöntemi ile en yüksek 1800 HV yüzey sertliği değerine ulaşılmıştır. KOS ile ulaşılan sertlik değerleri, borlama işlemiyle ulaşılan değerlere göre daha düşük olarak tespit edilmiştir. Bunun nedeninin ise ortamdaki karbon oranının KOS yapılacak çelikteki karbon oranından daha düşük olması ve çelikten karbon çekilerek dekarbürizasyon gerçekleşmesi olarak belirtilmiştir. Borokarbürleme deneyi sonucundaki malzeme yüzey sertliği değerinin de borlama deneylerindeki sertlik değerleri kadar yüksek olmadığı görülmüştür. Yapılan borlama, KOS ve borokarbürleme işlemlerinden, 900 °C'de 5 saat süreyle yapılan toz borlama işleminin, gerçek namı uygulamaları için daha uygun olabileceği bulunmuştur (Özcan, 2012). Özaraç ve arkadaşlarının çalışmasında, SAE8620 çeliğinin KOS işlemiyle karbürlenmesi ve işlem sonunda sertleştirilmesi araştırılmıştır. Deneylerde sementasyon sıcaklığı 930 °C olarak belirlenmiş ve sementasyon sonrası sertleştirme ise 870 °C'de 25 dakika bekletildikten sonra su içerisinde ani soğutma şeklinde yapılmıştır. KOS işlemi odun kömürüyle 0,5-1-5-10 saat sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda; çekirdek sertliği 439 VSD olan SAE8620 çeliğinin KOS işlemi sonrasında sertlik değeri 742 VSD olmuş ve kabuk sertliğinde %60 oranında sertlik artışı sağlandığı belirtilmiştir. Sementasyon süresi 5 saatten fazla olduğunda, semente edilen yüzey kısmının sertlik değerlerinde artış görülmüş fakat, 5 ve 10 saat sementasyon sürelerinde neredeyse aynı sertlik değerleri elde edildiği bildirilmiştir. Çelik parçaların mikroyapılarına bakıldığında yüzey ötektoid üstü, çekirdeğe doğru ötektoid ve çekirdek bölgesi beynitik ve ferritik yapılardan oluştuğu tespit edilmiştir (Özaraç v.d., 2021).

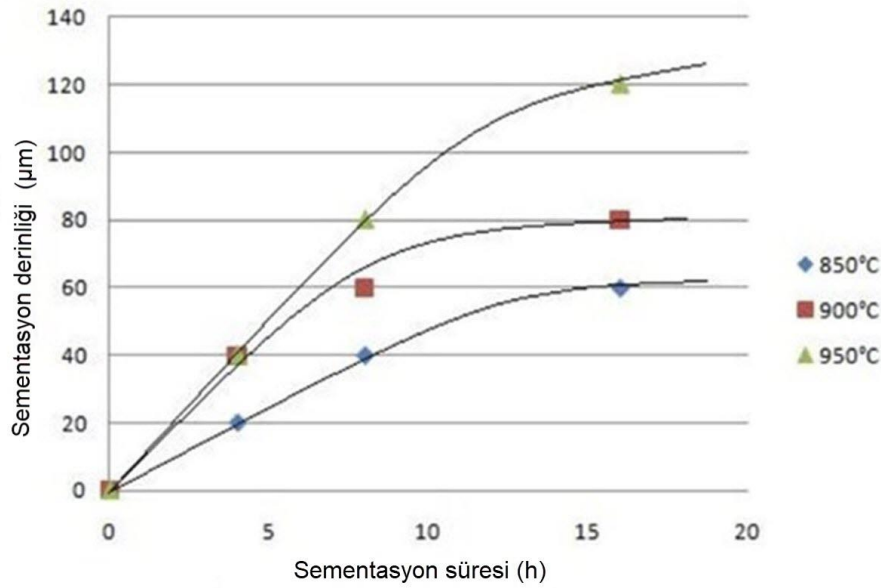
Rowan ve arkadaşları, çelik alaşımdaki elementlerin KOS işlemine etkileri üzerine araştırmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmada, AISI1018, AISI4820, AISI5120 ve AISI8620 çelikleri kullanılmıştır. Bu çeliklerin seçilmesindeki amaç, hepsinin %0,2 oranında karbon içermesi ve diğer alaşım elementlerinin oranlarının farklı olmasıdır. Yüksek konsantrasyonda östenit stabilize edici elementlere (Si, Ni) sahip çelikler, östenit yapı içindeki karbon difüzyonunu arttırmaya rağmen, atmosferden çelik yüzeyine karbon transferinin kinetiğini önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir. Karbon yayılımını düşürmesine rağmen, karbür oluşturu elementlerle (Cr, Mo) alaşımlanan çelikler, atmosferdeki kütle aktarım katsayısını önemli ölçüde artırmış ve karbon profili oluşum hızını arttırmıştır. Deneysel olarak belirlenen karbon yayılımları, termodinamik ve kinetik veri tabanlarından elde edilen karbon yayılımları ile iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir. 925 °C'de 1 ve 2 saat karbürlenen çeliklerin, yüzey derinliğine göre karbon konsantrasyonları Şekil 11'de görülmektedir. Deneysel çalışmanın sonucunda, yüksek Cr ve düşük Ni konsantrasyonlarına sahip orta ve yüksek alaşımlı çeliklerin, çelikteki karbon difüzyonunu önemli ölçüde azalttığı ve bu nedenle istenen sementasyon derinliğini elde etmek için daha uzun karbürleme sürelerinin gerektirdiği bildirilmiştir (Rowan v.d., 2009).



Şekil 11. 925 °C'de KOS işlemi yapılan çeliklerin karbon konsantrasyonu – yüzey derinliği grafiği: a) 1 saat; b) 2 saat (Rowan v.d., 2009).

Sabri yaptığı çalışmasında, AISI1045 çeliğinin KOS işleminde yüzey sertliği ve sementasyon kalınlığı bakımından sementasyon süresinin etkisinin sementasyon sıcaklığının etkisinden daha düşük olduğunu tespit etmiştir. Şekil 12'den de anlaşılacağı üzere 4, 6

ve 10 saat sürelerle yaptığı KOS işlemlerinde en yüksek yüzey sertliği değerlerine (395,7 HV) 950 °C'de 16 saat süreyle yapılan sementasyonda ulaşmıştır (Sabri, 2010).

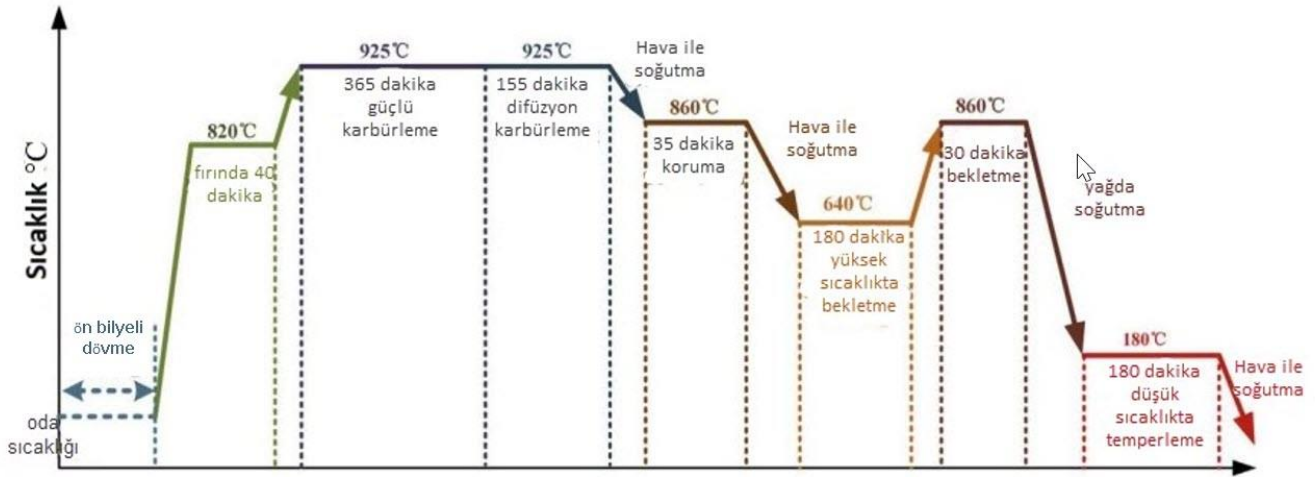


Şekil 12. Sementasyon süresi – sementasyon derinliği grafiği (Sabri, 2010).

Salawu ve arkadaşları, dişli imalatında kullanılmak üzere KOS işlemine tabi tutulan (900 °C'de 3 saat bekleme süresi ile) gri dökme demir malzemede karbüratör olarak organik karbon kaynaklarının kullanılması konusunda çalışmalar yapmışlardır. KOS deneyleri, toz haline getirilmiş palmye çekirdeği kabuğu, hindistan cevizi kabuğu ve odun kömürü içeren üç organik karbon vericiye aktivatör olarak yumurta kabuğunun eklenmesiyle gerçekleştirilmiştir. KOS işleminde, her ortam ağırlıkça %70 oranında karbon verici + %30 oranında aktivatör olacak şekilde ayarlanmıştır. Eşit süre ve sıcaklıkta yapılan deneyler sonucunda, odun kömüründe karbürlenmiş gri dökme demirin 116,9 HV olan ilk sertlik değeri 282,5 HV'lik bir artış göstermiştir. Ayrıca, hindistan cevizi kabuğuyla karbürlenmiş gri dökme demirin sertliği odun kömürünün sertliğiyle eşit derecede artmıştır. Bununla birlikte, hurma çekirdeğiyle yapılan KOS işlemindeki çelik yüzeyin sertliği 355,8 HV değeriyle en iyi artışı göstermiştir (Salawu v.d., 2020).

Yılmaz ise yaptığı çalışmada, KOS işleminden yüksek etkili sementasyon derinliği değerini elde edebilmek adına karbürleme süresi, karbürleme sıcaklığı ve aktivatör oranını değiştirerek farklı şartlarda en yüksek etkili sementasyon derinliğine ulaşmıştır. Örneğin; 900 °C'de %3 sodyum karbonat ihtiva eden ortamda 6 saat karbürleme sonucunda 0,769 mm'lik bir sementasyon derinliğine ulaşılırken aynı derinlikten daha fazlası 0,815 mm olarak 1000 °C ve %10 sodyum karbonat şartlarında 1 saat karbürleme ile elde edilebilmiştir (Yılmaz, 1985).

Bilyeli dövme; mekanik güçlendirme için etkili bir soğuk yüzey işleme yöntemi olmakla birlikte yüksek verimlilik ve düşük maliyeti nedeniyle dişli, yatak ve krank millerinin yorulma dayanımının artırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Wu ve arkadaşları, uçak motorları, helikopterler ve türbin dişlilerinin imalatında yaygın olarak kullanılan düşük karbonlu alaşımlı çelik sınıfındaki AISI9310 çeliğinin KOS işleminin verimliliğini artırmak için ön bilyeli dövme süreci ve ardından gelen KOS işlemini birleştirme stratejisi üzerine Şekil 13'te görüldüğü gibi bir KOS çalışması yapmışlardır. Dinamik yükler altında çalışan makine parçalarındaki yorulma arızalarının temel nedeninin KOS işlemiyle oluşturulan yetersiz sertleşme derinliği (YSD) ve yüzey sertliğinden (YS) kaynaklandığı literatürde yer almaktadır. Bu nedenle çalışmada, YSD ile mikroyapı, plastik deformasyon ile YS değerleri arasındaki ilişkinin keşfedilmesi amaçlanmıştır. Deneysel sonuçlar, KOS işleminden önce bilyeli dövme işleminin uygulanmasıyla önerilen stratejinin, KOS yapılmış dişli çeliğinin hem YSD'sini hem de YS'sini arttırmada çok etkili olduğunu göstermiştir. Geleneksel KOS işleminden sonra YSD ve YS'nin yaklaşık 750 mm ve 635 HV olduğu, fakat ön bilyeli dövme işleminin uygulanmasından sonra bu değerlerin sırasıyla 1250 mm ve 672 HV'ye yükseldiği belirtilmiştir (Wu v.d., 2022).



Şekil 13. Ön bilyeli dövme ve KOS işleminin şematik görünümü (Wu v.d., 2022).

2.3. KOS İşleminin Çıktı Performansları

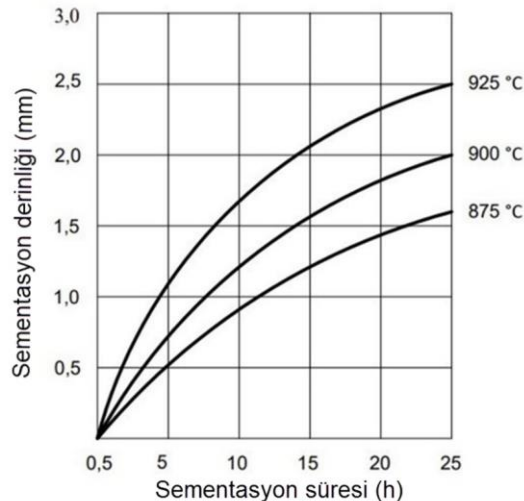
2.3.1. Sementasyon derinliği

TS 1719'da ki tanıma göre sementasyon derinliği (kabuk derinliği) veya diğer adıyla etkili sementasyon derinliği; 1 kgf (9,8 N) yükte ölçüldüğü zaman Vickers sertliği 550 VSD olan karbonlanmış ve sertleştirilmiş tabaka ile yüzey arasındaki dik uzaklığa denir. Pratikte ise sementasyon derinliği teriminden, çeliğin yüzeyinden itibaren merkezine doğru karbon içeriğinin ani düştüğü noktaya kadar olan dik mesafe anlaşılır. KOS işlemi esnasında istenen sertlik derinliğinin ayarlanmasında önemli olan iki faktör uygulanan sıcaklık ve süredir. Şekil 14'te sementasyon süresi ile sementasyon derinliği arasındaki ilişki görülmektedir.

$$SD = K\sqrt{t}$$

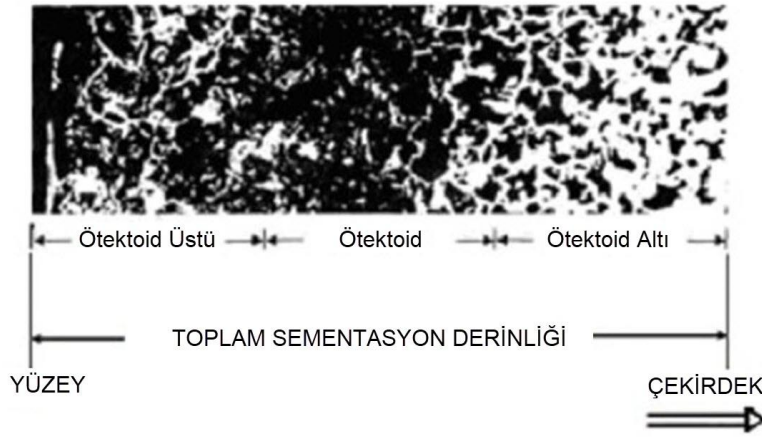
- SD : Sementasyon derinliği (mm)
- K : Sıcaklık ve difüzyon sabiti ($\text{mm/h}^{-1/2}$)
- t : Sementasyon süresi (h)

Çelik sementasyon sıcaklığından yavaş yavaş soğutulursa, KOS işleminin etkilediği nüfuz derinliğince değişken karbon miktarlarına bağlı farklı mikroyapılar ortaya çıkar. Öncelikle yüzeyde oluşan ötektoid üstü bölgede perlit ve sementit yapıları görülmektedir. Bu yapının altındaysa ötektoid bölgede sadece perlitik yapılar görülmektedir. Çekirdeğe yakın bölgelerdeyse ferritik ve perlitik yapılardan oluşan ötektoid altı bölge meydana gelir ve çekirdeğe yaklaştıkça ferritik yapı artmaktadır (Baykara, 1998). Çeliğin yüzey kısmında sertleşmiş tabaka derinliği aşırı artırıldığında artık östenit yapı, daha fazla karbon içeriği nedeniyle büyür ve aynı nedenden dolayı, karbürlerin çökmesi ve tane sınırlarının oksidasyonu meydana gelir. Bu mekanizma ise kalıntı östenit yapı varlığına sebep olmakta ve yorulma direnci üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır (Boniardi v.d., 2006).



Şekil 14. Sementasyon derinliğinin sementasyon sıcaklığı ve sementasyon süresine bağlı olarak değişimi (Yılmaz, 1985).

Şekil 15'te işlem öncesi %0,2 oranında karbon ihtiva eden bir çeliğin sementasyon işleminden sonra yüzeyden çekirdeğe doğru ortaya çıkan mikroyapı değişiklikleri görülmektedir. Başlangıçta %0,2 karbon içeren çelik parça sementasyon kutusunda 925 °C sıcaklıkta 6 saat karburlendikten sonra kutu içinde soğutulmuş ve ardından %2'lik nital çözeltisinde dağlanarak mikroskopta 30 kez büyütülerek mikroyapıya bakılmıştır. Çekirdeğe yaklaştıkça ferrit miktarında artış gözlenmiş, yüzeye yakın bölgelerde ise perlit ve sementit yapılarında artış tespit edilmiştir (Yegen, 2009).



Şekil 15. Başlangıçta %0,2 miktarında karbon içeren çelik parçasının KOS işleminden sonra yüzeyinden çekirdeğe doğru ortaya çıkan mikroyapı değişiklikleri (Yegen, 2009).

Doğrusal olmayan ultrason, güçlü nüfuz edilebilirliği, geniş uygulama alanı, insan vücuduna zararsız olması ve geleneksel ultrasona göre daha yüksek duyarlılığı gibi avantajlar nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrusal olmayan ultra ses sayesinde; yorulma hasarı, mikroskobik kusurlar ve sürünme hasarları etkili bir şekilde karakterize edilebilmektedir. Tang ve arkadaşları, doğrusal olmayan ultrasona dayalı yöntemle 2,5 MHz çalışma frekansına sahip özel bir sensör kullanarak sementasyon derinliğinin tespiti üzerine araştırmalar yapmışlardır. Özel sensörün yapısı, doğrusal olmayan ultrasona dayalı sementasyon derinliğinin tespitinde tasarlanmış, uygulanmış ve doğrulanmıştır. Sensör destek katmanı; ağırlıkça %1 tungsten tozu ve ağırlıkça %80 epoksi reçineden oluşmaktadır. Sensörün yüksek akustik empedans özelliğine sahip olduğu, 8 mm kalınlığındaki destek katmanının yüksek hassasiyete ve artık titreşim bastırmaya sahip olduğu tespit edilmiştir. Özel sensör, tespit prosedürünü basitleştirmektedir ve tespit etkinliğini ve kararlılığını artırdığı tespit edilmiştir (Tang v.d., 2022).

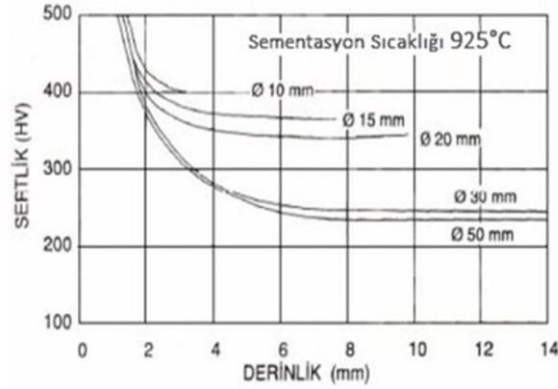
2.3.2. Yüzey sertliği

Yüzey sertliğini belirleyen ana faktör östenit fazdaki çözünen karbon miktarıdır. KOS işlemi sonrasında çelik yüzeyindeki karbon oranı %0,8 - %1 arasında olmalıdır. Yüzeydeki karbon oranının bu değerlerin üzerine çıkmasının bazı sakıncaları vardır. Öncelikle, eğer çelik sementasyon sıcaklığından itibaren yavaş yavaş soğutulursa perlit tane sınırlarında sementit ağı oluşur. KOS işlemi sonrasındaki sertleştirme işlemlerinde parça Şekil 1'de ki östenit bölgesinin altındaki sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra sertleştirilirse, bu işlem sonunda çelik yapısında sementit ağı olduğu gibi kalır. Bu durum çeliğin kırılma dayanımı için olumsuz etki yaratır. İkincisi ise, yüzeyde %0,8 üzerindeki oranda karbon miktarı oluşması durumunda sertleştirmenin ardından martenzit yapıda artık östenit kalmasına ve azalan sertliğe neden olur. Yüksek alaşımlı çeliklerde, %0,8 oranının üzerinde yüzeydeki karbon oluşumuna özellikle dikkat edilmelidir (Yegen, 2019).

Yüzey sertliği açısından bir diğer önemli faktör de sementasyon süresidir. Sementasyon süresinin uzatılmasıyla östenit fazda çözünen karbon miktarı artar ve bu yüzden sertleştirme sonrasında martenzitik yapıda daha çok artık östenit kalır. Bu nedenle de yüzey sertlik değeri düşer. Çelik daha düşük bir sıcaklıktan yine sertleştirilirse artık östenitin azalmasıyla sertlikte artış olur (Ihom, 2013; Schneider v.d., 2013; Yegen, 2019).

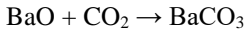
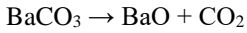
2.3.3. Çekirdek sertliği

Çelik parça boyutlarının ve sementasyon sonrasındaki sertleştirme sıcaklıklarının çekirdek sertliği üzerinde önemli etkileri olmaktadır. Şekil 16'da çapları 10-15-20-30-50 mm olan Ck15 kaliteli çelik parçalar için, parça boyutunun ve sementasyon sonrası sertleştirme sıcaklıklarının çekirdek sertliğine olan etkileri görülmektedir. Parçalara 925°C sıcaklıkta sementasyon derinliğinin 1 mm olacağı şekilde KOS işlemi yapılmıştır. Aynı sementasyon sıcaklığında (925°C) parça boyutunun küçülmesiyle çekirdek sertliğinin arttığı tespit edilmiştir (Karagöz, 2007; Yegen, 2009).



Şekil 16. Farklı çap değerlerine sahip Ck15 çeliklerinin 925°C'deki sementasyon işlemi sonrasında sertleştirme işlemi ile ulaşılan çekirdek sertlik değerleri (Karagöz, 2007)

KOS işleminde en çok kullanılan aktivatörler, baryum karbonat ($BaCO_3$), kalsiyum karbonat ($CaCO_3$), potasyum karbonat (KCO_3) ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) gibi alkali metal karbonatlarıdır. Aktivatörler işlem esnasında sementasyon ortamında azalan karbonmonoksiti tekrar sağlarlar. Böylece karbürleme süresi üzerinde azaltıcı etkileri vardır. Aktivatör oranı %11'i aştığında dekarbürizasyon olayı başlamaktadır ki bu kutu sementasyon işleminde istenmeyen bir durumdur. Dekarbürizasyon yaratan diğer neden ise kutu içindeki hava boşlukları ya da sementasyon kutusunun kapağının sızdırmasıdır. Daha fazla oksijen atomu daha fazla CO_2 üretir ve CO_2 gazının basıncı kutu içerisinde giderek artar. Kutu içindeki sıcak karbon sınırlı olduğundan, ilk reaksiyonda üretilen CO_2 gazının tümü CO gazına dönüştürülemez. Dolayısıyla CO_2/CO oranı denge oranından daha fazla olur ve dekarbürizasyon meydana gelir. İlk oluşan CO_2 karbon verici ortamın karbonu ile reaksiyona girerek aktif CO gazını meydana getirir. Karbürleme işlemi sırasında serbest kalmış CO_2 gazı, baryum karbonatın düşük ayrışma basıncından dolayı tekrar $BaCO_3$ oluşturmak için reaksiyona girer. Karbürleme işlemi sürdükçe bu üç reaksiyon arasında dinamik bir denge kurulur ve sürekli bir döngü gerçekleşir.

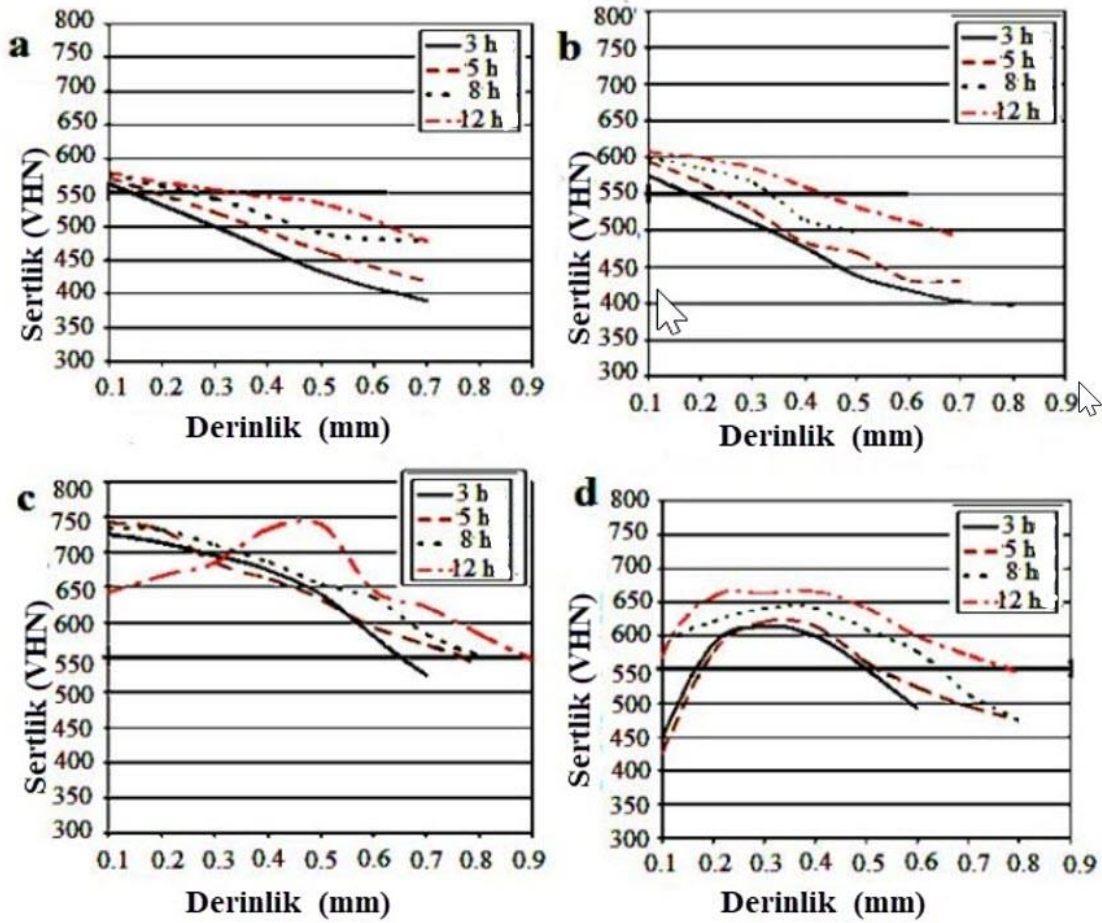


Asrofi ve arkadaşları, zincir dişlisi imalatında yaygın olarak kullanılan SS400 çeliğinin KOS ile sertleştirilmesi işleminde, $BaCO_3$ aktivatörünü sırasıyla %40, %30 ve %20 oranında kullanmışlardır. Karbon kaynağı olarak; bileşiminde %82 karbon içeren mahoni odun kömürü (MWC) kullanılmıştır. KOS işlemi 850 ve 900 °C'de 1 saat bekletme süresinde gerçekleştirilmiştir. 900 °C'de (tutma süresi 1 saat) %60 odun kömürü + %40 $BaCO_3$ karışım oranında en yüksek sertlik değeri (677,4 HV) elde edilmiştir (Asrofi v.d., 2020). Yine, Paul ve arkadaşları, katı atıkların tekrar değerlendirilebilmesi amacıyla yumurta kabuğunun KOS işleminde aktivatör olarak kullanılmasını araştırmışlardır. Karbon kaynağı olarak da kavun kabuğu, şeker kamışı atığı ve çiçek atıkları gibi organik malzemeler kullanılmıştır. %0,25 C içeren düşük karbonlu çeliğe 920 °C'de 5 saat süre ile KOS işlemi yapılmıştır. Şeker kamışı atığı kullanılan KOS işleminde 45,1 HRC'lik bir yüzey sertliği elde edilirken, aktivatör olarak yumurta kabuğu eklenmesi ile yüzey sertliği 45,5 HRC olmuştur. Kavun kabuğu atığı 47,8 HRC'lik bir yüzey sertliği sağlarken, yumurta kabuğu ilavesi ile yüzey sertliği 52,6 HRC olmuştur. Çiçek atıkları çelik üzerinde 56 HRC'lik bir yüzey sertliği sağlarken, yumurta kabuğu eklenmesi ile yüzey sertliği 56,6 HRC olmuştur (Paul v.d., 2013). Benzer şekilde, Darmo ve arkadaşları, AISI1010 çeliğine 3 saat süreyle 800 °C ve 900°C sıcaklıklarında KOS işlemi yapmışlardır. Karbon verici olarak toz halinde Şekil 17'de görülen bambu kömürü ve aktivatör olarak da $BaCO_3$ kullanılmıştır. Bambu kömürü – $BaCO_3$ oranları: 90%-10%, 80%-20% ve 70%-30% sırası ile uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre en yüksek yüzey sertliği değeri (606,36 kgf/mm²) ve en iyi çekme mukavemeti değeri (496,3 MPa); 900°C sıcaklıktaki, %70-%30 bambu kömürü – $BaCO_3$ karışım oranında yapılan KOS işlemi ile elde edilmiştir (Darmo v.d., 2021).



Şekil 17. KOS işleminde kullanılan toz malzemeler: a) baryum karbonat; b) bambu kömürü (Darmo v.d., 2021).

Hosseini ve arkadaşları, 1.5920 çeliğine 925°C'de farklı sürelerle KOS işlemi yapmışlar ve aktivatör olarak Na_2CO_3 kullanmışlardır. Na_2CO_3 içeriğinin ağırlıkça %5'e kadar artırılmasıyla, tüm karbürleme süreleri için sertlik derinliği büyük oranda değişmemiştir. Na_2CO_3 içeriğinin ağırlıkça %11'e kadar artırılmasıyla sertlik derinliği önemli ölçüde artmıştır. Fakat bu değerden daha yüksek değerlerde dekarburizasyon oluşması nedeniyle sertlik derinliğinde azalma olmuştur. Maksimum sertlik derinliği, 12 saatlik karbürleme süresi ve ağırlıkça %11 aktivatör kullanılarak elde edilmiştir (Hosseini v.d., 2013). Benzer şekilde, Khosravi ve arkadaşları, Na_2CO_3 tozunun KOS işleminde aktivatör olarak kullanılmasının işlem üzerine etkileri konusunda çalışmalar yapmışlardır. Bileşiminde %0,21 karbon içeren 1.5920 çeliğinden hazırlanan numuneler Şekil 18'de görüldüğü gibi 925°C'de 3, 5, 8 ve 12 saatlik farklı sürelerde karbürlenmiştir. Deneylerde kullanılan Na_2CO_3 karışım oranları ise ağırlıkça %0, %5, %10 ve %15 dir. Deneyler sonunda optimum etkili sementasyon derinliği değerlerine %11,5 aktivatör (Na_2CO_3) kullanımında erişilmiştir. En iyi yüzey sertlik değerine de 12 saat süreyle %10 aktivatör (Na_2CO_3) oranı kullanılarak yapılan deneyde ulaşılmıştır (749 VHN) (Khosravi v.d., 2014).



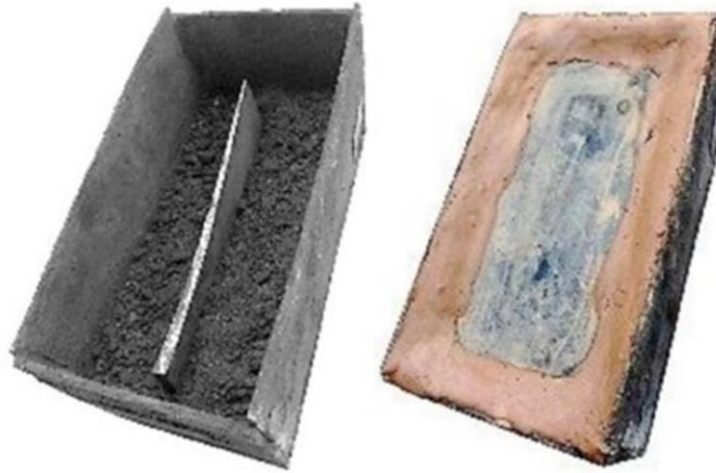
Şekil 18. Farklı oranlarda aktivatör kullanılan işlemlerdeki yüzey sertlikleri: a) Ağırlıkça %0 Na_2CO_3 ; b) Ağırlıkça %5 Na_2CO_3 ; c) Ağırlıkça %10 Na_2CO_3 ; d) Ağırlıkça %15 Na_2CO_3 (Khosravi v.d., 2014).

Negara ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, %0,17 karbon içeriğine sahip çeliğe KOS işlemi uygulamış ve bu işlemde aktivatör olarak BaCO_3 kullanmışlardır. Karbon kaynağı olarak kullanılan keçi kemiği külü ve bambu kömürünün karbon içeriği sırasıyla %18,95 ve %66,4 olarak daha önceki çalışmalardan belirlenmiştir. KOS işlemi 925°C'de 4 saat süreyle uygulanmış ve sonra yağda soğutma işlemi yapılmıştır. Uygulamada; %80 keçi kemiği külü + %20 BaCO_3 ve %80 bambu kömürü + %20 BaCO_3 karışım oranları kullanılmıştır. 575,23 HV ile en yüksek yüzey sertliği, toplam sertlik derinliği yaklaşık 1,5 mm olan bambu kömürü karışımıyla karbürlenmiş çelikte elde edilmiştir. Keçi kemiği külü karışımıyla karbürlenmiş çelik, bambu kömürü karışımıyla karbürlenmiş çelikten daha düşük bir yüzey sertliğine (558,13 HV) sahip olduğu fakat, toplam sertlik derinliğinin (2 mm) daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Negara v.d., 2015; Negara v.d., 2019)

Ogo ve arkadaşları, BaCO_3 ile CaCO_3 içeren nehir istiridyeye kabuklarının KOS işlemi sırasında aktivatör olarak kullanılmasını araştırmışlardır. %0,13 karbon içeren St37 çeliğine 950 °C'de yapılan KOS işleminde karbon verici olarak odun kömürü kullanılmıştır. Deneyler sonucunda optimum sertlik değerinin %30 nehir istiridyeye kabuğu ve %70 odun kömürü karışım oranı kullanılarak yapılan karbürleme işleminde oluştuğu gözlenmiştir. % 30'un üzerinde nehir istiridyeye kabuğunun sertlik değerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Aktivatör olarak %20 BaCO_3 'e kıyasla %30 nehir istiridyeye kabuğu kullanımı daha iyi sonuçlar vermiştir.

Nijerya'da nehir istiridye kabuğu bulunabilirliği ve maliyeti açısından $BaCO_3$ göre aktivatör olarak kullanımının daha iyi bir alternatif olduğu belirtilmiştir (Ogo v.d., 2004). Benzer şekilde, Okongwu ve arkadaşları, KOS işleminde aktivatör malzeme olarak mermer, kireçtaşı ve dolomit kullanımını $BaCO_3$ kullanımı ile karşılaştırarak sonuçları incelemişlerdir. Araştırmanın amacı Nijerya'da $BaCO_3$ maliyetinin yüksek olması ve ülkede kireçtaşı ve mermer ocaklarının bolca bulunmasından ötürü alternatif malzemeler arayışıdır. Deneysel çalışmalar sonucunda en etkili bileşimin %80 odun kömürü, %15 mermer ve %5 baryum karbonattan oluştuğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda sonuçlardan, dolomitin aktivatör olarak kullanımının uygun olmadığı, hatta karbürleme işlemini geciktirdiği anlaşılmıştır (Okongwu v.d., 1987).

Ramli ve arkadaşları, düşük karbonlu SCM420 çeliğinin KOS işleminde aktivatör olarak dog conch deniz kabuğunun (DCSP) kullanılabilirliği konusunda çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmalarda karbon verici olarak hindistan cevizi kabuğu (CSP) kullanılmıştır. Sonuçlar, optimum karbonlama performansının 950 °C karbürizasyon sıcaklığı, 3 saat bekleme süresi ve %40 DCSP + %60 CSP konsantrasyonu kullanılarak elde edildiğini göstermiştir. %40'ın üzerindeki DCSP konsantrasyonları için karbürlenmiş numunenin karbon içeriğinin azaldığı ve dolayısıyla da sertlik değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Bu sebeple, DCSP'nin KOS işlemi için etkili bir enerji sağlayıcı olarak görev yapabileceği fakat, aktif karbon kaynağı olarak kullanılmayacağı sonucuna varılmıştır (Ramli v.d., 2021). Thammacot ve arkadaşları, Şekil 19'da görülen AISI1010 çeliğinden imal edilmiş bıçağa uyguladıkları KOS işleminde karbon kaynağı olarak okalıptüs kömürü ve aktivatör olarak da yumurta kabuğu ve kalsiyum karbonat kullanmışlardır. Yumurta kabuğu bileşiminde %94,12 oranında kalsiyum karbonat bulunmaktadır. KOS işlemi: 900, 950 ve 1000 °C sıcaklıklarda 30-60-90 dakika sürelerinde uygulanmıştır. İlk grup ağırlıkça %10 kalsiyum karbonat ve ağırlıkça %90 okalıptüs kömürü kullanılarak kutuya yerleştirilmiş, ikinci grup ise ağırlıkça %10 yumurta kabuğu ve ağırlıkça %90 okalıptüs kömürü kullanılarak kutuya yerleştirilmiştir. Karbürlemenin ardından havada soğutma gerçekleştirilmiştir. Östenitleştirme için 780°C'de 20 dakika bekletilmiş ve soğutulmuştur. Son olarak bıçaklar 180°C'de 1 saat süreyle temperlenmiştir. Deney sonucunda bıçağın yüzey sertliği ile karbürleme sıcaklığı ve süresinin doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. $CaCO_3$ kullanımından elde edilen sertlik değeri yumurta kabuğu kullanımına göre biraz daha fazla olduğu tespit edilmiştir. 1000 °C'de 90 dakika KOS işlemi sonrasında, aktivatör olarak $CaCO_3$ kullanılan numunede 790 HV sertlik değerine ulaşılırken, aktivatör olarak yumurta kabuğu kullanılan numunede 780 HV sertlik değerine ulaşılmıştır (Thammacot v.d., 2016).



Şekil 19. AISI1010 çeliğinden imal edilmiş bıçağın sementasyon kutusuna yerleştirilmesi (Thammacot v.d., 2016).

2.4. KOS İşlemi Yapılabilen Malzemeler

Günümüzde düşük karbonlu çelikler, alaşımlı çelikler, takım çelikleri ve paslanmaz çelikler gibi malzemelere karbon emdirmek için farklı difüzyon işlemleri uygulanmaktadır. KOS, yüzeyi sert ve aşınmaya karşı dayanıklı, çekirdek bölgesindeyse daha yumuşaklık ve tokluk özellikleri istendiğinde, darbeli ve değişken zorlamalara maruz kalan düşük karbonlu çeliklere sıkça kullanılan bir difüzyon işlemidir. Siyanürleme, ferritik nitrokarbürleme ve karbonitrasyon yöntemlerine kıyasla KOS oldukça temiz, çevre ve insan sağlığı dostu bir yöntemdir. KOS'da, %0,1-0,25 oranlarında karbon içeren çeliklerde tatmin edici sonuçlar elde edilebilmektedir. Piston pimleri, miller, dişliler, zincir baklaları, zincir dişliler ile makaraları, fren diskleri, rulmanlı yataklar, haddeleme merdaneleri, kılavuz yatakları, bazı kontrol ve ölçü aletleri, soğuk şekillendirilen veya ekstrüzyonla şekillendirilen parçalar, takım çelikleri gibi parçaların üretiminde KOS işlemi tercih edilmektedir (Schneider v.d., 2013).

Qin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, KOS işleminin malzeme özellikleri, yüzey sertliği, artık gerilmeler, yüzeyi sertleştirilmiş 18CrNiMo7-6 çeliğinin kalan östeniti ve bunun sonucunda ortaya çıkan yorulma mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. KOS işleminin 18CrNiMo7-6 çeliğinin yorulma dayanımını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Karbürlenmemiş numuneler için yorulma sınırı 680 MPa iken KOS işlemi sonrasında 1108 MPa değerine yükselmiş ve bu sayede %62,9 oranında mukavemet artışı

sağlanmıştır. Yüksek sertlik ve yorulma dayanımı değerleriyle, yorulma çatlığının başlamasının engellenebildiği tespit edilmiştir (Qin v.d., 2022).

2.5. KOS İşleminin Avantajları

- Çelik tamamen ya da kısmen en son şeklini aldıktan sonra KOS işlemi uygulandığı için parçanın işlenmesinde gereken kuvvetler daha az olacaktır.
- Parça üzerinde sertleşmesi istenmeyen, sonradan işlenecek alanlar varsa, elektrolitik bakır ve özel pastalar vasıtasıyla bu alanlar kapatılır. KOS işlemi bu alanlara etki etmeyeceğinden daha sonra bu bölgelerin kolayca işlenmesine olanak sağlar.
- KOS işlemi sonrasında, çekirdek bölgesi yumuşaklığını koruyacağından sertleştirme esnasında oluşabilecek çarpılmalar oldukça azdır.
- Sementasyon çelikleri, yüzeyinde benzer sertlik değerleri verebilen takım çeliği durumundaki yüksek karbonlu çeliklerden ucuzdur. Bu sayede maliyet açısından KOS işlemi avantaj sağlar.
- KOS işlemi sadece bölgesel olarak sertleştirilecek büyük parçalar için çok daha ekonomiktir.
- KOS işlemiyle büyük sementasyon derinlikleri ucuz ve kolay olarak elde edilir.
- KOS işlemi kendi kapalı ortamını sağladığı için çok çeşitli fırınlardan yararlanabilir.
- GOS işlemiyle karşılaştırıldığında, seçici karbürleme için daha geniş bir durdurma teknikleri seçeneği sunar.
- SOS işlemi (tuz banyosunda karbonlama) ile karşılaştırıldığında siyanürün bertaraf edilmesine gerek yoktur.
- Hem GOS hem de SOS ile karşılaştırıldığında sermaye yatırımı daha azdır. Bu nedenle, KOS özellikle düşük hacimli uygulamalar için daha ekonomiktir.
- KOS bileşiklerini depolamak için ayrı bir odaya gerek yoktur, fakat SOS işlem için gerekli tuzların sıkı denetim altında saklanması gerekir.
- KOS kontrollü atmosfer fırınına ihtiyaç duymaz. Aynı fırın normalleştirme, tavlama ve gerilim giderme işlemleri için de kullanılabilir (Hosseini v.d., 2016).

2.6. KOS İşleminin Dezavantajları

- KOS işleminde parçaların toz ile kaplanması ve temizlenmesi için fazlaca iş gücü harcanır.
- Karbon verici toz iyi bir ısı iletici olmadığından sementasyon sıcaklığına ulaşılincaya kadar daha uzun süreli bir ısıtma gereklidir.
- Sementasyon işleminde kullanılan kutular alaşımly çeliklerden imal edilmiş olmalıdır. Aksi durumda sürekli olarak değişen soğutma ve ısıtma işlemleri sonucunda üzerlerinde cüruf tabakası oluşacaktır.
- Soğutma için parçaları kutudan çıkarmak zordur.
- Çeliklere sementasyon sıcaklığından itibaren hemen su verilmemelidir. İlk önce yavaşça soğumaları, ardından tekrar ısıtılmaları gerekmektedir. Bu ise enerji kaybına neden olur.
- Sertleştirme hassas değildir ve yüzeye emdirilen karbon miktarı kontrolsüzdür. Katı sertlik derinliği toleranslarının gerekli olduğu sığ sertlik derinliklerinin üretimi için pek uygun değildir.
- Diğer sementasyon çeşitlerine göre daha kirli bir işlemdir ve aynı zamanda çok daha uzun süre gerektirir.
- Yöntem büyük hacimli üretim için uygun değildir.
- Patlamaların önlenmesi için kapsamlı güvenlik önlemleri alınması gerekmektedir (Hosseini v.d., 2016).

3. KOS İşleminin Uygulama Alanları

KOS yöntemiyle; metallerin yüzeyine karbon difüzyonu yoluyla yüzey sertleştirme yapılabildiği gibi, metal yüzeylere kaplama işlemleri de yapılabilmektedir. Difüzyon yoluyla kaplama işlemi, metalin iç mekanik özelliklerini değiştirmeden yüzey sertliği ve aşınma direnci özelliklerini iyileştirerek malzemenin çalışması imkansız olan koşullarda kullanılabilmesini sağlar. En çok bilinen kutu sementasyon kaplama prosesleri; alüminize etme, kromlama ve silikonlamadır. Tipik bir kutu; kaplanacak metal, kaplama malzemesi (Cr, Al, Si gibi parçaların yüzeyinde biriken element tozları) ve aktivatör (Al_2O_3 , SiO_2 veya SiC) malzemenin oluşur.

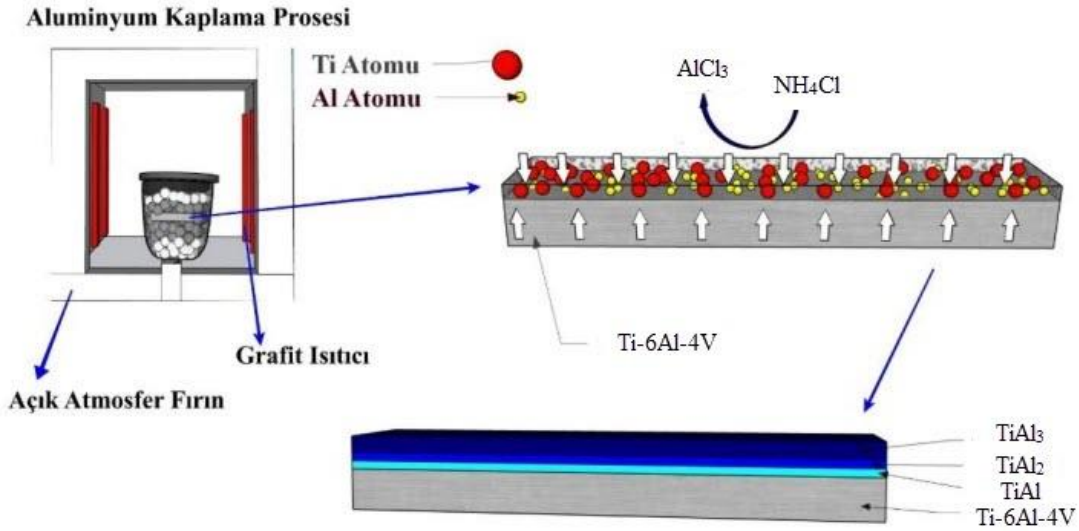
Makine parçalarında genel olarak kullanılan çeliklerin ömürleri aşınmaları ile sınırlıdır. Bu sebeple aşınmaların önlenerek parçaların ömürlerinin uzatılması, ekonomik açıdan önemli oranda avantaj sağlar. Yakın zamanlarda bu sorunları azaltmak ya da ortadan tamamen kaldırmak için çeliklerinin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalardan bir tanesi de kaplama yöntemidir. Karaca yaptığı çalışmada, 1,2344 sıcak iş takım çeliklerine KOS işlemi kullanarak değişik sıcaklıklarda 2 saat süreyle Vanadyum Karbür (VC) kaplama gerçekleştirmiştir. Vanadyum karbür kaplama ile korozyona karşı dayanımı ve aşınmaya karşı direnci artırma amaçlanmıştır. KOS işlemi; 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda ve 2 saat bekleme sürelerinde uygulanmıştır. Sementasyon kutusu içerisine 65 mikron altı Ferro Vanadyum, Al_2O_3 ve NH_4Cl ilave edilmiştir. Daha sonra numuneler kutuya yerleştirilmiş ve bir miktarda silisyum karbür ve dökme demir talaşı eklenerek numunelerin üzeri kapatılmıştır. Böylece numunelere oksijenin difüze olmasının önüne geçilmiştir. Deneyle sonucunda; sıcaklığın artmasıyla tane boyutlarında belirgin bir değişiklik olmadığı belirtilmiştir. Elde edilen VC kaplama tabakalarının yüzeylerde homojen olarak kaplandığı görülmüştür. Sıcaklığın artmasıyla kaplama kalınlığının arttığı görülmüştür. Tablo 1'den de anlaşılacağı üzere kaplama sonrası ana malzeme sertlik değerlerinin, sıcaklık değeri arttıkça arttığı tespit edilmiştir (Karaca, 2019).

Tablo 1. VC kaplama sonrası ana malzeme ve kaplama sertlik değerlerinin sıcaklıkla değişimi (Karaca, 2019).

Sıcaklık (°C)	Kaplama sonrası ana malzeme sertliği (HV)	Kaplama sertliği (HV)
900	584,775	1050,27
1000	694,191	1180,60
1100	809,083	1401,56

Tong ve arkadaşları, KOS işlemiyle Ni bazlı bir süper alaşım üzerinde düşük sıcaklıkta alüminid kaplamaların oluşumu üzerine çalışmalar yapmışlardır. Paket tozları (toplamda 20 g) saf Al tozu, α - Al_2O_3 dolgu maddesi ve NH_4Cl aktivatöründen oluşmaktadır. Yüksek yoğunluk ve homojenlik özelliği taşıyan kaplamaların iki katmanlı bir yapıya sahip oldukları belirtilmiştir. Üst katman esas olarak Al_3Ni_2 ve Al_3Ni 'den oluşurken, alt katman Al_3Ni_2 'den oluşmaktadır. Paket NH_4Cl içeriğinin alüminizasyon işlemi üzerindeki etkisi, paket Al içeriği ağırlıkça %10'da sabit tutulurken paket NH_4Cl içeriği ağırlıkça %5'ten ağırlıkça %30'a değiştirilerek araştırılmıştır. İşlem sıcaklığı ve kaplama süresi sırasıyla 700 °C ve 8 saattir. Deneysel sonuçlardan, paket aktivatör (NH_4Cl) içeriği dışındaki tüm parametrelerin kaplama kalınlığı üzerinde etki yarattığı fakat, mikroyapı ve bileşen dağılımı üzerinde etki yaratmadığı tespit edilmiştir. NH_4Cl içeriğinin kaplama kalınlığını, yapısını ve bileşen dağılımını etkilemediği belirtilmiştir. Kaplama kalınlığı ile biriktirme süresi arasındaki parabolik ilişki, sürecin difüzyon kontrollü olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kaplama kalınlığı ile karşılıklı biriktirme sıcaklığı arasında doğrusal bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır (Tong v.d., 2010).

Yılmaz ve arkadaşları, Şekil 20'de şematize edilmiş KOS yöntemiyle Ti6Al4V alaşımı üzerine alüminid esaslı kaplama üretimi yapmışlardır. Ti6Al4V numunelerin kaplama işleminde; alüminyum kaynağı olarak Al, aktivatör olarak da NH_4Cl tozları ve dolgu malzemesi olarak Al_2O_3 tozu kullanılmıştır. Açık atmosferli bir fırında 4, 6 ve 8 saat sürelerinde, 700°C sıcaklıkta alüminyum kaplama işlemleri uygulanmıştır. Gerçekleştirilen X-ışını (XRD) analizlerinde kaplama tabakası üzerinde $TiAl_3$, $TiAl_2$, $TiAl$ ve eser miktarda Al_2O_3 fazları görülmüştür. Bekleme sürelerine bağlı olarak kaplama tabakası kalınlığının 12-20 μm arasındaki değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Meydana gelen titanyum alüminid tabakasında 578-650 HV arasında sertlik değerleri elde edilmiştir (Yılmaz v.d., 2022).

**Şekil 20.** KOS yöntemiyle kaplama işleminde gerçekleşen reaksiyonların şematik gösterimi (Yılmaz v.d., 2022).

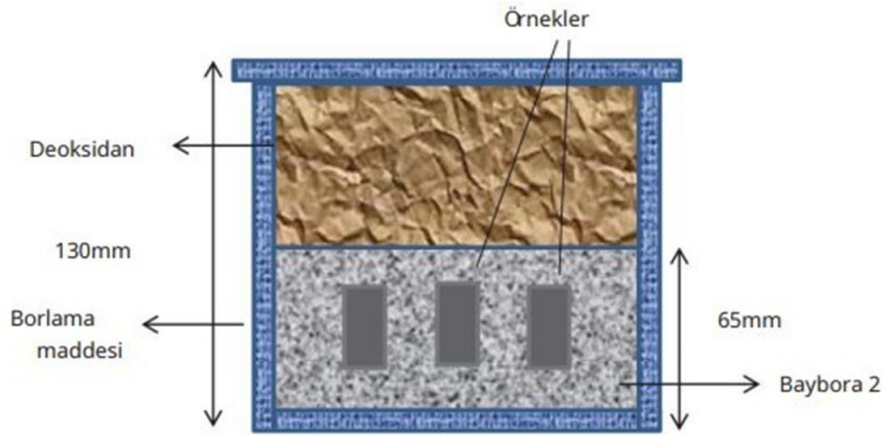
Son zamanlarda magnezyum alaşımları havacılık sanayisinde geniş uygulama alanları bulmaktadır. Tercih edilmelerinin sebebi ise; yüksek mukavemet, büyük elastiklik modülü ve iyi ısı dağılımı göstermeleridir. Bunca iyi mekanik özelliğe karşın magnezyum alaşımlarının korozyon dirençleri oldukça düşüktür. Günümüzde korozyon dirençlerini arttırmak için çeşitli kaplama işlemleri yapılmaktadır. Hu ve arkadaşları, AZ31 magnezyum alaşımı üzerine KOS yöntemi ile Al içeren kaplamalar konusunda çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada Al kaynağı olarak $AlCl_3$, aktivatör olarak %50 oranında $NaCl$ kullanılmıştır. Numuneler 400 °C sıcaklıkta 8 saat ısıtıldıktan sonra fırında oda sıcaklığına kadar soğutulmuşlardır. Yapılan işlem alaşımın korozyon direncini ve yüzey sertliğini etkili bir şekilde arttırmıştır. Yüzey sertlik değeri ham malzemede 53 HV iken, kaplama işlemi sonrasında bu değer 167 HV'ye ulaşmıştır (Hu v.d., 2022).

Kahrıman ve arkadaşları, AISI316L çeliğinin KOS yöntemiyle krom (Cr) kaplanmasını bir difüzyon problemi olarak ele almış ve kaplama biriktirme işleminin kinetiğini incelemişlerdir. Sıcaklık, zaman ve yüzeylerde oluşan kaplama katmanlarının bileşimleri gibi proses değişkenlerinin etkisi Thermo-Calc yazılımı ile termodinamik olarak ve DICTRA (Diffusion Controlled TRANSformations) modülü ile kinetik olarak incelenmiştir. Altlık yüzeyinde Cr birikmesi sırasında karbon difüzyonuna bağlı olarak yüzeyde hızla bir krom karbür ($Cr_{23}C_6$) oluştuğu görülmüştür. Krom karbür dışı doğru karbon difüzyonu ve kromun karbona karşı güçlü afinitesi

reaksiyonu nedeniyle oluştuğu bildirilmiştir. Bu tür karbür tabakanın oluşumu, Cr'nin altlık yüzeyinden difüzyonunu bloke etmesi ve çelik içeriğindeki karbonu lokal olarak taşıyarak dekarbürizasyona neden olduğu sonucuna varılmıştır (Kahrıman v.d., 2023).

Lu ve arkadaşları, AZ91D magnezyum alaşımı (ağırlıkça %9,3 Al, ağırlıkça %0,63 Zn, ağırlıkça %0,32 Mn ve kalanı Mg içeren) üzerine KOS yöntemiyle kaplama yapılmasında, difüzyon süresi ve difüzyon sıcaklığı üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Sonuçlara göre 10 g ZnO ve 1 g NH₄Cl içeren difüzyon kaynağının etki süresi 400 °C'de 150 saat civarında olduğu tespit edilmiştir. Daha gevşek ve saf bir difüzyon kaynağının kutunun daha iyi hava sızdırmazlığı sağlanmasında yardımcı olarak KOS süresinin kısaltılmasına katkı sağlayabileceği sonucuna varılmıştır. Daha kalın Zn açısından zengin difüzyon alaşımli kaplamanın imalatı için difüzyon kaynağının daha uzun bir ön ısıtmaya tabii tutulması gerektiği tespit edilmiştir. Aktif fazın yüksek sıcaklıklarda sürekli tüketimi, difüzyon kaynağının arızalanmasına yol açabileceği belirtilmiştir. Etkin olmayan bir difüzyon kaynağının ana bileşimi ZnO olduğundan böyle bir difüzyon kaynağı yeni NH₄Cl tozu eklenerek yeniden etkinleştirilebileceği sonucuna varılmıştır (Lu v.d., 2023).

Yamanel ve arkadaşları, Baybora-2 tozu kullanarak AISI1020 çeliği üzerinde KOS ile kaplama işlemi deneyleri yapmışlardır (Şekil 21). İşlem sonrası numunelerdeki kinetik ve mekanik özellikler üzerindeki değişimler incelenmiştir. KOS işlemini 2, 4 ve 6 saat sürelerde 950 °C ve 1050 °C sıcaklıklarda uygulamışlardır. İşlem süresi ve sıcaklığının artmasıyla yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlığının arttığı tespit edilmiştir. 950 °C sıcaklıkta uygulanan KOS işlemi ile kaplamada en çok 196,3 µm kaplama kalınlığına ve 1050 °C sıcaklıkta uygulanan KOS işlemi ile kaplamada ise en çok 304,7 µm kaplama kalınlığına ulaşılmıştır. Numune olarak kullanılan AISI1020 çeliğinin herhangi bir işlem yapılmaksızın sertlik değeri 168 HV iken, yapılan kaplama işleminden sonra yüzey sertlik değeri, sementasyon ve nitrürleme gibi sıklıkla kullanılan yüzey sertleştirme işlemlerinde elde edilen sertlik değerlerinin yaklaşık 5 katı (2224 HV) olarak elde edilmiştir (Yamanel v.d., 2023).



Şekil 21. Borlama kutusunun şematik görünümü (Yamanel v.d., 2023).

4. Sonuç

Sementasyon en eski yüzey sertleştirme işlemi olup, karbon içeriği düşük olan çelik malzeme yüzeyine katı, sıvı veya gaz ortam içerisinde karbon emdirilmesi esasına dayanır. İşlem sonrası çelik malzemenin karbonca zenginleşmiş yüzeyinde aşınmaya dirençli sert bir yapı oluşurken çekirdeği yumuşak ve tok olarak kalır. Katı ortam sementasyonu (KOS), sertleştirme yapılacak olan parçanın kutu içerisinde bulunan bir karbon kaynağı ortamında, östenit faz sıcaklığına kadar ısıtılarak karbonun yüzeylere difüzyonuyla yapılan bir yöntemdir. Bu çalışmada, KOS'un parametreleri, çıktı performansları ve uygulama alanları hakkında detaylı bir literatür araştırması yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

KOS için karbon kaynağı olarak sığır kemiği, istiridy kabuğu, hindistan cevizi kabuğu, yumurta kabuğu ve palmye çekirdeği kabuğu gibi çok farklı malzemeler kullanılsa da, pratikte genellikle odun kömürünün tercih edildiği tespit edilmiştir. KOS işlemi için sementasyon sıcaklığı genellikle 850-930 °C arasında olmakla beraber parçanın sertleşme derinliğine bağlı olarak ısıtılma süresi genellikle 9-10 saat civarında olduğu görülmüştür. KOS işleminden sonra çelik parçaların menevişleme metoduyla (160-220 °C arasında bir sıcaklıkta 1-2 saat bekleme) sertliğinin bir miktar azaltılarak sertleştirme sonrası çelik parçalardaki artık gerilmelerin giderildiği görülmüştür. KOS işleminde en çok kullanılan aktivatörler, baryum karbonat (BaCO₃), kalsiyum karbonat (CaCO₃), potasyum karbonat (KCO₃) ve sodyum karbonat (Na₂CO₃) gibi alkali metal karbonatlar olduğu tespit edilmiştir. Aktivatör maddelerin işlem esnasında sementasyon ortamında azalan karbonmonoksiti tekrar sağladığı ve böylece karbürleme süresi üzerinde azaltıcı etkilerinin olduğu görülmüştür. KOS işlemi esnasında ortamdaki karbon oranının sertleştirme yapılacak malzemedeki karbon oranından daha düşük olması durumunda, malzemenin karbon çekilerek dekarbürizasyon olayının gerçekleşebileceği ve bununla KOS işlemi için istenmeyen bir durum olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, aktivatör oranının %11'i aştığında durumda da dekarbürizasyonun başladığı görülmüştür. Çelik sementasyon sıcaklığından itibaren yavaşça soğutulursa, sementasyon işleminin etki ettiği nüfuz derinliği boyunca değişen karbon miktarlarına bağlı olarak farklı mikroyapıların meydana geldiği tespit edilmiştir. Yüzeyde oluşan ötektoid üstü bölgede sementit ve perlit yapılar, bunun hemen altında ise ötektoid bölgede sadece perlitik yapının ve

merkeze yakın ötektoid bölgelerdeyse perlitik ve ferritik yapıların oluştuğu görülmüştür. Sementasyon süresinin uygun seçilmesi de yüzey sertliği açısından bir diğer önemli faktör olduğu belirlenmiştir. Sementasyon zamanının uzatılmasıyla östenit fazda çözünen karbon miktarının arttığı ve sertleştirme sonrası martenzitik yapıda daha fazla artık östenit kaldığı ve bunun sonucunda da sertlik değerinin düştüğü tespit edilmiştir. KOS işleminin çeliğinin yorulma dayanımını önemli ölçüde arttırdığı (yaklaşık %62,9 oranında) görülmüştür. KOS işleminin bu sayede yüksek sertlik ve yorulma dayanımı değerleriyle, yorulma çatlağının başlamasını engelleyebildiği tespit edilmiştir. KOS yöntemiyle metal yüzeylere kaplama işlemlerinin de yapılabildiği görülmüştür. Alüminize etme, kromlama ve silikonlama gibi difüzyon yoluyla kaplama işleminde, metalin iç mekanik özelliklerini değiştirmeden yüzey sertliği ve aşınma direnci özelliklerinin iyileştirildiği tespit edilmiştir. KOS işleminin %0,1-0,25 oranlarında karbon içeren çeliklerde birçok uygulamasının olduğu görülmüştür. Dişliler, miller, piston pimleri, zincir baklaları, fren diskleri, kılavuz yatakları, rulmanlı yataklar, haddeleme merdaneleri, bazı ölçü ve kontrol aletleri, soğuk şekillendirilen veya ekstrüzyonla şekillendirilen parçalar, kesici takımlar gibi parçaların imalinde KOS işlemi tercih edildiği sonucuna varılmıştır.

5. Referanslar

Afolalu, S.A., Asonaminasom, E.H., Ongbali, S.O., Abioye, A.A., Udo, M.O., Salawu, E.Y. (2018) Dataset On Experimental Investigation Of Optimum Carburizing Temperature And Holding Time Of Bi- Nano Additives Treatment Of AISI 5130 Steel. Data in Brief 19, 2279–2283, Mechanical Engineering Department, Covenant University, Ota, Ogun State, Nigeria.

Aramide, F.O., Ibitoye, S.A., Oladele, I.O., Borode, J.O. (2010) Pack Carburization of Mild Steel, using Pulverized Bone as Carburizer: Optimizing Process Parameters. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, Issue 16, p. 1-12.

Asrofi, M., Hidayatulloh, A.V., Jatisukamto, G., Sutjahjono, H., Sakura, R.R. (2020) The Effect Of Temperature And Volume Fraction Of Mahoni (Swietenia Mahogani) Wood Charcoal On SS400 Steel Using Pack Carburizing Method: Study Of Hardness And Microstructure Characteristics. AIMS Materials Science Volume 7, Issue 3, 354–363.

Baykara, C. (1998) Sementasyon Çeliklerinde Yüzey Pürüzlülüğü ve Sementasyon Derinliğinin Aşınma Dayanımına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi.

Boniardi, M., D'Errico, F., Tagliabue. (2006) Influence Of Carburizing And Nitriding On Failure Of Gears – A Case Study. Engineering Failure Analysis 13, 312–339.

Coşar, D. (2014). 8622RH ve 20MnCr5 Çeliklerinin Aşınma ve Mekanik Özelliklerine Gaz Karbürleme İşleminin Etkisinin İncelenmesi, Yüksek lisans tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.

Çoban, C., Taktak, Ş., Başpınar, S., Said, G., (2004). Kutu Sementasyonla Çelikleri Karbürleme İşleminde BaCO₃ Aktivatörün Sertleşme Derinliğine Etkisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Afyon. Cilt: 4, Sayı: 1-2, Sayfa: 1-6.

Çölova Ö. (2021) Karbürleme Yapılan Genel Yapı Çeliğinin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi.

Darmo, S., Sutanto, R. (2021) Study Of The Effect Carburizing Agent Gigantochloa Verticillata Munro Charcoal-Barium Carbonat On Pack Carburizing Low Carbon Steel. International Journal of Engineering And Science Vol.11, Issue 9, PP 45-50.

Erkan, A., Yılmaz Ü., Helvacioğlu, Ş., Günay, H., Aydoğan, R., Ersoy, Ç. (2020) Düşük Basıncılı Sementasyon Yöntemi ile Malzemelerin Mekanik ve Metalografik Özelliklerinin Geliştirilmesi. Mühendis ve Makine. Sayı: Ağustos 2020.

Forti, M., Alonso, P., Balbuena, P. (2012) Ab-Initio Studies On Carburization Of Fe₃Al Based Alloys. / Procedia Materials Science 1, 191 – 198.

George, S. (2016) Surface Modification Of Materials.

Hassan, K., S. (2015) Comparative Of Wear Resistance Of Low Carbon Steel Pack Carburizing Using Different Media. International Journal of Engineering & Technology, 4 (1), 71-77.

Hosseini, S.R.E., Khosravi, H., Sohrabi, R., Hosseini, Z., Karimi, E.Z., Makarem, M. (2013) Correlation between Hardenability Curves and Microstructure of a Cementation Steel Carburized in the Presence of Na₂CO₃ as an Energizer Material. ISIJ International, Vol. 53, No. 12, pp. 2213–2217.

Hosseini, S.R.E., Li, Z. (2016) Pack Carburizing: Characteristics, Microstructure, and Modeling. In Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys. Taylor and Francis: New York, 13 Apr 2016; 1-24.

- Hu, J., Liao, J., Yang, X., Zeng, J., Li, H., Song, B., Xu, H., Guo, N., Jin, Y. (2022) Microstructure And Properties Of Al-Coating On AZ31 Magnesium Alloy Prepared By Pack-Cementation. *Nonferrous Met. Soc. China* 32, 493–502.
- Ihom, P.A. (2013) Case Hardening Of Mild Steel Using Cowbone As Energiser. *African Journal of Engineering Research* Vol. 1(4), pp. 97-101, October 2013.
- Jacquet, P., Rousse, D.R., Bernard, G., Lambertin, M. (2002) A Novel Technique To Monitor Carburizing Processes. *Département de génie mécanique, Université Laval, Sainte-Foy (Québec), Canada*.
- Kahrıman, F., Tzini, M., Haidemenopoulos, G.N. (2023) Modeling of Surface Modification of Stainless Steel by Halide Activated Pack Cementation Method. *AKÜ FEMÜBİD* 23, 045703 (1001-1009).
- Karaca, Y. (2019) 1,2344 Sıcak İş Takım Çeliğinin Kutu Sementasyon Yöntemi ile Vc Kaplanabilirliğinin İncelenmesi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9 (IMSTEC Özel Sayı),106-110.
- Karagöz, İ. (2007) Sementasyon Çeliklerinde Difüzyon Ve Sertlik Derinliğini Arttıracak Isıl İşlem Koşullarının İncelenmesi, Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Karagöz, İ. (2019) SAE 8620 (21NiCrMo2) Plakaların Isıl İşleminde Karbürizasyon Süresi Ve Malzeme Kalınlığına Bağlı Olarak Oluşan Sertlik Değişimi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt: 6, No:3, Sayfa: 748-754.
- Kaya, M. (2015) SAE 5120 Ve 8620 Çeliklere Uygulanan Sementasyon İşleminin Mikroyapı Ve Sertlik Değişimlerine Etkisinin Araştırılması. Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Khosravi, H., Hosseini, S.R.E., Sisan, M.M., Paykani, M.A. (2014) Modeling of Pack-Carburizing Route by General Factorial Design of Experiment. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 3 Issue 9.
- Kılıç, E.(2008) 14NiCr10 – 14NiCr14 Çeliklerinin Uygulanacak Sementasyon İşlemine Bağlı Olarak Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek lisans tezi. Kırıkkale Üniversitesi.
- Kuswanto, B. (1999) Perlakuan Pack Carburizing Pada Baja Karbon Rendah Sebagai Material Alternatif Untuk Pisau Potong Pada Penerapan Teknologi Tepat Guna. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2010 Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim Semarang*.
- Lu, D., Jiang, Q., Ma, X., Fan, L., Huang, Y., Hou, B. (2023) Effective Time Of A Diffusion Source In A Pack Cementation Process On The AZ91D Magnesium Alloy. *Journal Of Materials Research And Technology*, 24, 5552-5562.
- Negara, D.N.K.P., Muku, D.M.K., Sugita, K.G., Astika, M., Mustika, W., Prasetya, D.G.R. (2015) Hardness Distribution and Effective Case Depth of Low Carbon Steel After Pack Carburizing Process under Different Carburizer. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 776, pp 201-207.
- Negara, D.N.K.P., Widiyarta, I.M. (2019) The Study On Mechanical Properties Of Pack Carburized Low Carbon Steel Using Baco3 As Energizer. *Materials Science and Engineering* 673, 012125.
- Ogo, D.U.I., Ause, T., Ibanga, E.J. (2004) The Use of River Clam Shells (*Aspatharia Sinuata*) as an Energizer in Case Carburization of Mild Steels. *ISIJ International*, Vol. 44, No. 5, pp. 865–868.
- Okongwu, D.A., Paranthaman, V. (1987) Assessment Of The Efficacy Of Some Carbonate Minerals As Energizers In Pack Carburisation Of Mild Steel. *Nijotech* Vol. 11. No. 1 September 1987.
- Oyetunji, A., Adeosun, S.O. (2012) Effects of Carburizing Process Variables on Mechanical and Chemical Properties of Carburized Mild Steel. *Journal of Basic & Applied Sciences*, Volume 8, 319-324.
- Özcan, H. (2012). 32CrMoV Çeliğinin Aşınma Direncini Arttırmak İçin Yeni Bir Isıl İşlem Metodunun Geliştirilmesi, Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi.
- Özsaraç, U., Yılmaz, R., Ekerer, A. ve Uzun, H. (2021). Sementasyon İşlemi Yapılan Çeliklerde Mikro Sertlik ve Mikroyapı Değişimlerinin İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi.
- Paul, I.A., Bem, N.G., Justine, N.I., Joy, O.N. (2013) Investigation Of Egg Shell Waste As An Enhancer In The Carburization Of Mild Steel. *American Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 1, No. 2, 29-33.

- Pekgöz, B., Sarıdemir, S., Uygur, İ., Aslan, Y. (2013) Sementasyon İşleminin Farklı Çeliklerin Mikroyapı ve Sertlik Değerlerine Etkileri. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi. Cilt:10 Sayı:1, Sayfa:19-24.
- Qin, S., Zhang, C., Zhang, B., Ma, H., Zhao, Z. (2022) Effect Of Carburizing Process On High Cycle Fatigue Behavior Of 18CrNiMo7-6 Steel. Journal Of Materials Research and Technology, 16, 1136-1149.
- Ramli, Wu, C.C. (2021) Novel Study On Mechanical Properties Of Pack Carburizing SCM 420 Steel With Energizer Dog Conch. International Journal of Modern Physics B, Vol. 35, No. 5, 2150065.
- Rowan, O.K. (2009) Effect of Alloy Composition on Carburizing Performance of Steel. Journal of Phase Equilibria and Diffusion Vol. 30 No. 3.
- Sabri, H.A.B.A. (2010) Experimental Study Of Pack Carburizing Of Carbon Steel. Yüksek lisans tezi, Universiti Malaysia Pahang.
- Salawu, E.Y., Ajayi, O.O., Inegbenebor, A.O., Akinlabi, S., Akinlabi, E., Popoola, A.P.I., Uyo, U.O. (2020) Investigation Of The Effects Of Selected Bio-Based Carburising Agents On Mechanical And Microstructural Characteristics Of Gray Cast Iron. Heliyon 6 e03418.
- Schneider, M.J., Chatterjee, M.S. (2013) Introduction To Surface Haredening Of Steels. ASM Handbook, Volume 4A, Page 259-267.
- Tang, Y., Zhang, G., Mao, H., Ren, J., Huang, Z., Li, X., Li, Q. (2022) Research On The Sensor For Detection Of Carburized Case Depth Based On Nonlinear Ultrasound. Results in Physics 42, 105984.
- Thammachot, N., Nachaisit, P., Homjabok, W., Peeratatsuwan, C., Mayai, A., Nithikarnjanatharn, J. (2016) The Effects Of Energizer, Carburizing Temperature And Time On The Mechanical Properties Of Hardened Big Knives In A Pack Carburizing Process. KKU Engineering Journal October – December 2016;43(4):172-177.
- Tong, L., Dengzun, Y., Chungun, Z. (2010) Low-temperature Formation of Aluminide Coatings on Ni-base Superalloys by Pack Cementation Process. Chinese Journal of Aeronautics 23, 381-385.
- Topbaş, M.A.(1998) Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı.
- Wu, J., Wei, P., Liu, H., Zhang, X., He, Z., Deng, G. (2022) Evaluation Of Pre-Shot Peening On Improvement Of Carburizing Heat Treatment Of AISI 9310 Gear Steel. Journal Of Materials Research and Technology, 18, 2784-2796.
- Yamanel, B., Erdem, O., Bican, O. (2023) Baybora-2 Tozu İle Borlanmış AISI 1020 Çeliğin Kinetik Ve Mekanik Özellikleri. Metall. Technol Arş. 120, 602.
- Yegen, İ. (2009) Sıcak Haddelenmiş Ve Soğuk Çekilmiş SAE 8620 Ve 16MnCr5 Çeliklerinde Tuz Banyosunda Gerçekleştirilen Sementasyon İşleminin Aşınma Direncine Etkisi. Yüksek lisans tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Yılmaz, A.N. (1985) Kutu Sementasyonunda Karbürleme Süresi, Karbürleme Sıcaklığı ve Aktivatör Oranının Etkili Sementasyon Derinliğine Etkileri. Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yılmaz, F., Efe, G.C., Yener, T. (2022) Kutu Sementasyon Yöntemi ile Ti6Al4V Alaşımı Üzerine Aluminid Esaslı Kaplama Üretimi. Journal of Smart Systems Research (JOINSSR) 3(2), 49-60.