

KAYNAK BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ

Prof. Dr. Gürel Çam



KAYNAK BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ

Prof. Dr. Gürel Çam

Yayın No. : 2963
Mühendislik/Teknik No. : 303
ISBN : 978-625-406-452-4
E-ISBN : 978-625-406-453-1
Basım Sayısı : 1. Basım, Ekim 2020

© Copyright 2020, NOBEL AKADEMİK YAYINCILIK EĞİTİM DANIŞMANLIK TİC. LTD. ŞTİ. SERTİFİKA NO.: 40340

Bu baskının bütün hakları Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti.ne aittir. Yayınevinin yazılı izni olmaksızın, kitabın tümünün veya bir kısmının elektronik, mekanik ya da fotokopi yoluyla basımı, yayımı, çoğaltımı ve dağıtımı yapılamaz.

Nobel Yayın Grubu, 1984 yılından itibaren ulusal ve 2011 yılından itibaren ise uluslararası düzeyde düzenli olarak faaliyet yürütmekte ve yayınladığı kitaplar, ulusal ve uluslararası düzeydeki yükseköğretim kurumları kataloglarında yer almaktadır.

Genel Yayın Yönetmeni : Nevzat Argun -nargun@nobelyayin.com-
Yayın Koordinatörü : Gülfem Dursun -gulfem@nobelyayin.com-

Redaksiyon : Buse Gamze Çeliktaş -buse@nobelyayin.com-
Sayfa Tasarım : Ahmet S. Baydar -ahmet@nobelyayin.com-
Kapak Tasarım : Mehtap Yürümez -mehtap@nobelyayin.com-
Baskı Sorumlusu: Yavuz Şahin -yavuz@nobelyayin.com-
Baskı ve Cilt :

Kütüphane Bilgi Kartı

Çam, Gürel.

Kaynak Bilimi ve Teknolojisi / Gürel Çam

1. Basım, s. x + 308 , 160x235 mm. Kaynakça var, dizin yok.

ISBN: 978-625-406-452-4

E-ISBN: 978-625-406-453-1

1. Kaynak Teknolojisi 2. Kaynak Metalurjisi 3. Kaynak Kalitesi 4. Kaynak Muayenesi 5. Kaynak Kabiliyeti 6. Kaynak Yöntemleri

Genel Dağıtım

ATLAS AKADEMİK BASIM YAYIN DAĞITIM TİC. LTD. ŞTİ.

Adres: Bahçekapı mh. 2465 sk. Oto Sanayi Sitesi No:7 Bodrum Kat Şaşmaz-ANKARA - siparis@nobelyayin.com-

Telefon: +90 312 278 50 77 - **Faks:** 0 312 278 21 65

E-Satış: www.nobelkitap.com - www.atlaskitap.com - **Bilgi:** esatis@nobelkitap.com - info@atlaskitap.com

Dağıtım ve Satış Noktaları: Alfa Basım Dağıtım, Arasta, Arkadaş Kitabevi, D&R Mağazaları, Dost Dağıtım, Ekip Dağıtım, Kıda Dağıtım, Kitapsan, Nezih Kitabevleri, Pandora, Prefix, Remzi Kitabevleri

ÖN SÖZ

'Kaynak Bilimi ve Teknolojisi' adlı bu kitap, Üniversitelerimizin başta Makine, Metalurji-Malzeme ve Endüstri Mühendisliği bölümlerinde okuyan öğrencilerimiz olmak üzere tüm mühendislik eğitimi alan öğrencilerimizin yararlanacağı bir ders kitabı olması yanında endüstride kaynak konusunda çalışan mühendislerin bilgilerini tazelemek ve kaynak teknolojisi konusunda gelişmeleri izlemek için başvuracakları bir kaynak oluşturma arzusuyla hazırlanmıştır.

Kaynak teknolojisi, endüstriyel uygulamalarda oldukça önemli bir yer tutmakta ve her geçen gün kullanımı artmaktadır. Bunun nedenlerinin başında, son yıllarda endüstride yeni ürünlere olan taleplerin artmasına paralel olarak özellikle farklı malzemelerin kaynak işlemlerine olan talebin artması sonucu kaynak teknolojisinde önemli gelişmeler kaydedilmesi gelmektedir. Diğer bir neden de, son yıllarda yeni geliştirilen malzemelerin (yeni nesil çelikler ve alüminyum alaşımları gibi) klasik kaynak yöntemlerinde karşılaşılan sorunları aşmak için yürütülen araştırma-geliştirme faaliyetleri sonucu kaynak teknolojisinde önemli gelişmelerin ortaya çıkmasıdır. Birçok uygulamalı mühendislik alanında olduğu gibi, kaynak teknolojisinin kapsadığı konuların çok yönlü oluşu ve gelişen teknolojiye paralel olarak sürekli yeniliklere açık olması, bu konuda ders veya başvuru kitabı hazırlamayı güçleştirmektedir. Belki bu nedenle, kaynak teknolojisi konusunda tüm kaynak teknolojilerini kapsayan ve son yıllardaki gelişmeleri içeren Türkçe yayınlanmış eser bulunmamaktadır. Bu kitabın hazırlanmasındaki diğer bir amaç bu eksikliğin giderilmesine bir ölçüde yardımcı olmaktır. Bu kitapta, deneysel olarak kendi yaptığım çalışmalardan çıkan sonuçlara da yer verilmiştir. Ayrıca, son yıllarda geliştirilmiş ve Türkçe yayınlanmış kitaplarda ele alınmamış olan yeni kaynak teknolojileri de tartışılmıştır.

Bu kitabın, tüm meslektaşlarıma ve öğrencilerimize yararlı olacağı inancındayım. Özellikle, gelişen kaynak teknolojilerinden ülkemizde endüstriyel üretim işlemlerinde katma değer yaratılması için faydalanılmasını temenni ederim. Bu kitabın hazırlanmasında katkısı olan Dr. H. Tarık SERİNDAG ve Dr. Serkan GÜLER'e teşekkür ederim. Ayrıca, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti, Fen-Mühendislik ve Sağlık Bilimleri Yayın Editörü Sayın Sadık Küçükakman beye de teşekkürlerimi sunarım. Bu kitapta elde olmadan oluşan bazı hatalar bulunabilir. Bu konuda veya genel olarak kitaba yönelik her türlü katkı ve eleştirilerinizi bana iletirseniz sevinirim. Bu kitabı oğlum Orkun Burak ÇAM'a ve genç yaşta elim bir trafik kazası sonucu edebiyete intikal eden, kaynak konusunda birçok çalışmayı birlikte yaptığım, sevgili meslekdaşım Dr. Öğr. Üyesi Güven İPEKOĞLU'na ithaf ediyorum. Saygılarımla.

Prof. Dr. Gürel ÇAM

YAZAR HAKKINDA

Prof. Dr. Gürel Çam, 1984 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Sakarya Mühendislik Fakültesi'nden Metalurji Mühendisi olarak mezun oldu. 1985-1990 yılları arasında İngiltere'de dil kursu, yüksek lisans ve doktora yapmak üzere T.C. Milli Eğitim Bakanlığı'ndan burs kazandı. Doktorasını 'Malzeme Bilimi' dalında 1990 yılında Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, İngiltere'de tamamladı. Doktora sonrası yurda dönerek Ağustos-Eylül 1990 tarihleri arasında 3 ay süreyle TÜBİTAK Marmara Araştırma Enstitüsü (MAM)'da çalıştı. Daha sonra, 1994 yılının Ekim ayında 'Malzeme Bilimi' alanında Doçent oluncaya kadar, Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde Yrd. Doçent olarak görev yaptı. 1994 Ekim-1998 Ekim tarihleri arasında Helmholtz-Zentrum Geesthacht (daha önceki adıyla GKSS Research Center), Almanya'da misafir araştırmacı olarak çalıştı. Helmholtz-Zentrum Geesthacht adlı Araştırma Merkezi'nde bulunduğu dönemde kaynak teknolojileri konusunda Brite-Euram projeleri dahil çok sayıda projede görev aldı. Daha sonra tekrar yurda dönerek önce Mersin Üniversitesi'nde 1999 yılının Eylül ayına kadar bir yıl Doçent olarak, takiben Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde 2000 yılına kadar Doçent olarak görev yaptı. 2000 yılının Ocak ayında Mustafa Kemal Üniversitesi'nde İmalat ve Konstrüksiyon Anabilim Dalında Profesör olarak atandı. 2004-2007 tarihleri arasında Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dekanı olarak görev yaptı. Ayrıca, Mustafa Kemal Üniversitesi'nde 2015 yılının Ocak-Nisan ayları arasında, kadrosunun bulunduğu fakülte İskenderun Teknik Üniversitesi olarak ayrılıncaya kadar, tekrar Mühendislik Fakültesi Dekanı olarak görev aldı. 2015 yılından beri de İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde Profesör olarak görev yapmaya devam etmektedir.

Kendisi Amerikan Kaynak Birlięi (American Welding Society - AWS) ve Alman Kaynak Teknolojisi Birlięi (Deutscher Verband für Schweißtechnik - DVS) üyesidir. Bunun yanı sıra, 2009 yılının Ocak ayından beri Gedik Eğitim Vakfı tarafından kurulan Türk Kaynak Teknolojisi Akademisi (TKTA), Genel Kurul Üyesi ve 2018 yılı Mayıs ayından bu yana MÜDEK Makine Mühendisliği ve Metalurji-Malzeme Mühendisliği Bölümleri Program Deęerlendiricisidir. Yazarın alışma yaptığı araştırma konuları arasında; yapısal malzemelerin sür-tünme karıştırma kaynağı, lazer ve elektron kaynağı ile difüzyon kaynağı, kaynaklı bağlantıların karakterizasyonu, kaynak metalurjisi ve düşük dönüşüm sıcaklığına sahip ilave teller (low transformation temperature - LTT- filler wires) gibi kaynak teknolojileri alanı ile ilgili konular bulunmaktadır. Ağustos 2020 tarihi itibariyle, 45'i saygın SCI-tarafından taranan yurt dışı dergilerde olmak üzere toplam 150'nin üzerinde yayımlanmış makale ve bildirinin yazarıdır. Makale ve bildirilerine Google Akademik'te 3400'ün üzerinde atıf yapılmış olup, h-indeksi 33'tür. Yayınlarına, Web of Science'da yapılan atıf sayısı ise 2150'ün üzerindedir ve WOS'taki h-indeksi 28'dir.

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM I: KAYNAĞIN TEMEL PRENSİPLERİ	1
1.1. Kaynak Teknolojisine Genel Bakış.....	3
1.1.1. Kaynak Uygulama Türleri.....	4
1.1.2. Kaynağın Uygulama Alanları.....	6
1.2. Kaynaklı Bağlantı	9
1.2.1. Kaynaklı Bağlantı Tipleri.....	9
1.2.2. Kaynak Çeşitleri.....	10
1.3. Kaynak Fiziği.....	13
1.3.1. Güç Yoğunluğu.....	13
1.3.2. Ergitme Kaynaklarının Fiziği.....	15
1.3.2.1. Ark Kaynağı.....	21
1.3.2.2. Elektrocüruf Kaynağı.....	25
1.3.1.3. Direnç Kaynağı	25
1.3.1.4. Elektron Kaynağı	28
1.3.1.5. Lazer Kaynağı	29
1.3.3. Katı Hâl Kaynaklarının Fiziği	30
1.3.3.1. Difüzyon Kaynağı	31
1.3.3.2. Sürtünme Kaynağı.....	34
1.3.3.3. Ultrasonik Kaynak	35
1.3.3.4. Patlamalı Kaynak	36
1.3.3.5. Manyetik Alan Kaynağı	36
Kaynakça.....	37
BÖLÜM II: KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	39
2.1. Ergitme Kaynağı Yöntemleri	42
2.1.1. Gaz Kaynağı.....	44
2.1.1.1. Oksi-Asetilen Gaz Kaynağı.....	44
2.1.1.2. Gaz Kaynağında Kullanılan Alternatif Gazlar	49

2.1.1.3. Basınçlı Gaz Kaynağı.....	50
2.1.2. Ark Kaynağı.....	51
Ark Kaynağı Terminolojisi	52
2.1.2.1. Tüketilen Elektrot Kullanılan Ark Kaynakları.....	56
2.1.2.2. Tüketilmeyen Elektrot Kullanılan Ark Kaynakları.....	71
2.1.3. Direnç Kaynağı	83
2.1.3.1. Direnç Nokta Kaynağı.....	87
2.1.3.2. Direnç Dikiş Kaynağı.....	92
2.1.3.3. Direnç Projeksiyon Kaynağı	94
2.1.3.4. Direnç Alın Kaynağı	96
2.1.3.5. Yüksek Frekanslı Direnç Kaynağı	100
2.1.4. Diğer Ergitme Kaynakları	101
2.1.4.1. Termit Kaynağı	101
2.1.4.2. Elektro-Cüruf Kaynağı.....	103
2.1.4.3. Elektron Kaynağı	105
2.1.4.4. Lazer Kaynağı	108
2.1.4.5. Hibrit Ergitme Kaynağı.....	111
2.2. Katı Hâl Kaynak Yöntemleri	113
2.2.1. Dövme (Demirci) Kaynağı.....	115
2.2.2. Soğuk Kaynak	116
2.2.3. Endüksiyon Kaynağı.....	117
2.2.4. Sıcak Basınç Kaynağı	118
2.2.5. Hadde Kaynağı.....	118
2.2.6. Difüzyon Kaynağı	119
2.2.7. Sürtünme Kaynağı.....	124
2.2.7.1. Geleneksel Sürtünme Kaynağı.....	128
2.2.7.2. Lineer Sürtünme Kaynağı	131
2.2.7.3. Radyal Sürtünme Kaynağı	132
2.2.7.4. Sürtünme Saplama Kaynağı.....	132
2.2.7.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağı.....	133
2.2.8. Ultrasonik Kaynağı	138
2.2.9. Patlamalı Kaynak	140
2.2.10. Manyetik Alan Kaynağı	142
2.11. Hibrit Katı Hâl Kaynağı.....	143
Kaynakça.....	145

BÖLÜM III: KAYNAK METALURJİSİ153

3.1. Kaynak Metalurjisi.....	154
3.2. Kaynak Bölgesi.....	156

3.2.1. Ergime Bölgesi.....	165
3.2.2. Kaynak Arayüzeyi.....	171
3.2.3. Isıdan Etkilenmiş Bölge	172
3.2.3.1. Katı Eriyik Sertleşmesi Yapılmış Alaşımlar	173
3.2.3.2. Soğuk Şekil Verilerek Sertleştirilmiş Alaşımlar	174
3.2.3.3. Yaşlandırma Sertleştirmesi Yapılmış Alaşımlar	178
3.2.3.4. Faz Dönüşümü İle Sertliği Arttırılmış Alaşımlar	181
3.2.4. Isıdan Etkilenmemiş Baz Metal Bölgesi	186
3.3. Ticari Alaşımların Kaynak Edilebilirliği	186
3.3.1. Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti	190
3.3.1.1. Düşük Karbonlu Ve Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti.....	199
3.3.1.2. Su Verilmiş Ve Temperlenmiş Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti.....	200
3.3.1.3. Yeni Nesil Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti.....	201
3.3.1.4. Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti	205
3.3.2. Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti	216
3.3.3. Magnezyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti	227
3.3.4. Bakır Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti.....	230
3.3.5. Nikel Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti.....	233
3.3.6. Titanyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti.....	236
3.3.7. Kobalt Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti.....	243
3.3.8. Diğer Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti	243
Kaynakça.....	244
BÖLÜM IV: KAYNAK KALİTESİ VE KONTROLÜ	253
4.1. Kaynak Kalitesi.....	254
4.2. Kaynak Hataları	258
4.2.1. Ergitme Kaynağında Oluşan Hatalar.....	259
4.2.2. Katı Hâl Kaynaklarında Oluşan Hatalar.....	265
4.3. Kaynak Kalite Kontrolü	269
4.3.1. Tahribatsız Kaynak Muayenesi.....	269
4.3.1.1. Gözle Muayene	270
4.3.1.2. Radyografik Muayene.....	271
4.3.1.3. Ultrasonik Muayene	272
4.3.1.4. Manyetik Partikül Testi.....	273
4.3.1.5. Sıvı Penetran Testi	274

4.3.1.6. Elektromanyetik Muayene	275
4.3.1.7. Akustik Emisyon Testi	277
4.3.1.8. Kontrol Testleri	278
4.3.1.9. Sertlik Deneyleri	281
4.3.2. Tahribatlı Kaynak Muayenesi	282
4.3.2.1. Metalografik İnceleme	282
4.3.2.2. Sertlik Deneyi.....	284
4.3.2.3. Çekme Deneyi.....	286
4.3.2.4. Kesme Deneyi	290
4.3.2.5. Bükme Deneyi.....	291
4.3.2.6. Kırılma Tokluğu Deneyleri	293
4.3.2.7. Yorulma Deneyi.....	300
4.3.2.8. Sürünme Deneyi.....	300
4.3.2.9. Korozyon Deneyi	301
4.4. Kaynak Tasarım Kriterleri	301
Kaynakça.....	305