

**SİALON SERAMİKLERİNİN KARBON
FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT
MALZEMELERİN DELME
OPERASYONLARINDAKİ
PERFORMANSLARI**

Ali ÇELİK
Doktora Tezi

Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı
Ağustos-2013

**Bu tez çalışması MDA İleri Teknoloji Seramikleri San. Tic. Ltd. Şti.
tarafından desteklenmiştir.**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ali ÇELİK'in “SiAlON Seramiklerinin Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Delme Operasyonlarındaki Performansları” başlıklı **Seramik Mühendisliği Anabilim Dalındaki** Doktora Tezi 23.07.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. Ferhat KARA
Üye	: Prof. Dr. Alpagut KARA
Üye	: Prof. Dr. Ender SUVACI
Üye	: Prof. Dr. Erhan BUDAK
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Yiğit KARPAT

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

Eşim Yasemin'e...

ÖZET
Doktora Tezi

**SiAlON SERAMİKLERİNİN KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER
KOMPOZİT MALZEMELERİN DELME OPERASYONLARINDAKİ
PERFORMANSLARI**

Ali ÇELİK

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferhat KARA
2013, 169 sayfa

Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitler yüksek spesifik mukavemet ve mükemmel yorulma dirençleri ile havacılık endüstrisindeki kullanımı düzenli olarak artan malzemelerdir. Kompozit malzeme içerisinde farklı yönlerde konumlandırılmış fiberlerin aşındırıcı karakterleri bu malzemeleri işlenmesi güç hale getirmektedir. Bu nedenle, CFRP kompozit malzemelerin işlenmesinde kullanılabilecek, yüksek aşınma dayanımına sahip yeni malzemelere olan ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu doktora tezi çalışmasında sahip oldukları üstün mekanik, kimyasal ve ısı özellikleri ile pek çok aşınma uygulamasında kullanılan SiAlON esaslı malzemelerin CFRP kompozitlerin delme sürecindeki performanslarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda matkap ucu geometrik özelliklerinin ve işleme koşullarının (kesme hızı, v ve ilerleme hızı, f) sürece olan etkilerinin yanı sıra, farklı SiAlON matkap uçlarının aşınma davranışları ve malzeme özellikleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Sonuç olarak, delme sürecinin başlangıcında mikro-pullanma aşınma mekanizmasının geçerli olduğu bulunmuştur. Kesici malzemenin kırılma tokluğu bu süreçte aşınmayı kontrol ederken, ilerleyen delme sürecinde baskın hale gelen abrasif aşınmada kesici malzeme sertliği etken olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: SiAlON, delme, aşınma, Fiber Takviyeli Polimer
Kompozitler (FRPC)

ABSTRACT
PhD Dissertation

**THE PERFORMANCE of SiAlON CERAMICS on DRILLING
OPERATIONS of CARBON FIBER REINFORCED POLYMER
COMPOSITES**

Ali ÇELİK

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Ceramics Engineering Program**

**Supervisor: Prof. Dr. Ferhat KARA
2013, 169 pages**

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites are very promising materials in aerospace industry due to their high specific strength and outstanding fatigue resistance and their use in aerospace industry increases gradually. However, the abrasive character of the carbon fibers oriented in different directions in the composite makes these materials difficult to cut. Therefore, it is a prerequisite to develop high wear resistant cutting materials for machining of CFRP composites.

In this thesis, it was aimed to determine the performance the SiAlON based materials, which are used in many wear applications due to their high mechanical, chemical and thermal properties, in drilling operation of CFRP composites. In this scope, besides the effect of drill bit geometry and machining parameters (cutting speed, v and feed rate, f) on the drilling process, the relationship between the wear resistance and the material properties of different SiAlON drill bits were investigated. It was observed that the micro-chipping is the main wear mechanism at early stage of the drilling operation. While the fracture toughness of the cutting material controls the wear of the drill bits at this stage, the abrasive wear, which becomes the dominant mechanism at further stages, is controlled by the hardness of the cutting material.

Keywords: SiAlON, drilling, wear, Fiber Reinforced Polymer Composites (FRPC)

TEŞEKKÜR

Engin bilgi ve tecrübelerini alçak gönüllülikle birleştirmeyi başaran ender insanlardan olan, çok değerleri danışman hocam Prof. Dr. Ferhat Kara'ya bu tez çalışmasında yapmış olduğu bilimsel katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Talaşlı imalat konusunda yönlendirmeleriyle çalışmamın şekillenmesinde büyük katkısı olan, değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Yiğit Karpat'a ayrıca teşekkür ederim.

Bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, tez izleme jürisindeki hocam Prof. Dr. Alpagut Kara'ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, değerli önerilerini benimle paylaşan hocalarım Prof. Dr. Ender Suvacı ve Prof. Dr. Erhan Budak'a teşekkür ederim.

Talaşlı imalat çalışmalarında Koç Üniversitesi Üretim Otomasyonu Araştırma Merkezi laboratuvarı imkânlarını kullanımımıza sunan saygıdeğer hocam Doç. Dr. İsmail Lazoğlu başta olmak üzere, testlerin gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı Araş. Gör. Nevzat Bircan Buğdaycı ve Makine Teknisyeni Muzaffer Bütün'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Matkap uçlarının üretiminde birlikte çalıştığım Müh. Çağlar Yavaş başta olmak üzere sahip olduğu yüksek teknolojik imkânları bizlerden esirgemeyen Karcan Kesici Takım Ltd. şirketine teşekkür ederim.

Ticari ürünlerini herhangi bir karşılık beklemeksizin bizlere temin eden üniversiteleri bilimsel projelerde desteklemeyi kendilerine politika edinen Sandvik Coromant firmasına ve Satış Mühendisi Çağatay Uçar'a teşekkür ederim.

Matkap uçlarının kaplama çalışmalarındaki katkılarından dolayı değerli hocam Prof. Dr. Servet Turan ve Bilkent Üniversitesi öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Erman Bengü, Yüksek Lisans Öğrencisi Erdem Uzun, Doktora Öğrencisi Hüseyin Alagöz'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında her türlü teknik desteği sağlayan MDA İleri Teknoloji Seramikleri Ltd. Şti. firmasına ve Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca desteklerini benden esirgemeyen ve kişisel gelişimimde en önemli paya sahip olan aileme şükranlarımı sunarım.

Son olarak hayat arkadaşım ve meslektaşım Yasemin Çelik'e tez çalışmamda bana göstermiş olduğu sonsuz sabır ve destek için yürekten teşekkürler...

Ali Çelik

Ağustos 2013

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ ve AMAÇ	1
2. FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT (FRPC) MALZEMELER	3
3. FRP KOMPOZİTLERİN DELME SÜRECİNDEKİ	
TEMEL KAVRAMLAR	6
3.1. Delaminasyon	6
3.2. Matkap Uçları ve Delme Operasyonu	9
3.3. İtme Kuvveti ve Tork	12
3.4. Talaş Oluşum Mekanizması	16
4. DELAMİNASYONU BELİRLEYEN FAKTÖRLER	18
4.1. Kesme Koşulları ve Delaminasyon	19
4.2. Matkap Ucu Geometrik Özellikleri ve Delaminasyon	21
5. KESİCİ UÇ MALZEMELERİ	29
5.1. Karbür Malzemeler	29
5.2. Çok Kristal Elmas Malzemeler	32
6. AŞINMA	33
6.1. Kesici Uçlardaki Aşınma	35
6.2. WC-Co Esaslı Matkap Uçlarının Aşınma Mekanizmaları	37
6.3. Kaplanmış Karbür Uçların Aşınma Mekanizmaları	42
6.4. Çok Kristal Elmas (PCD) Uçlardaki Aşınma	45

7. Si₃N₄/SiAlON ESASLI SERAMİKLER	46
7.1. Kristallografik Yapı.....	46
7.2. Mikroyapı-Özellik İlişkisi.....	50
7.3. SiAlON Seramiklerinin Aşınma Davranışları.....	54
7.4. Uygulama Alanları.....	57
8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	59
8.1. SiAlON Malzemelerinin Üretimi.....	59
8.1.1. Hammaddeler ve kompozisyonlar.....	59
8.1.2. Öğütme ve granülleştirme.....	61
8.1.3. Şekillendirme.....	61
8.1.4. Sinterleme.....	62
8.1.5. Yüzey taşlama ve matkap ucu geometrileri.....	63
8.2. Malzeme Karakterizasyon Çalışmaları.....	66
8.2.1. Yoğunluk ölçümü.....	66
8.2.2. Mikroyapı analizi.....	66
8.2.3. Faz analizi.....	67
8.2.4. Mekanik testler.....	68
8.3. SiAlON Seramiklerinin Çatlak İyileşme Davranışlarının Belirlenmesi...	69
8.4. SiAlON Matkap Uçları için Geometri Belirleme Çalışmaları.....	70
8.5. SiAlON Matkap Uçlarının Kesme Performanslarının Belirlenmesi.....	72
8.6. WC/(Ta+W) Kaplamalı SiAlON Matkap Uçlarının Kesme Performanslarının Belirlenmesi.....	72
9. MALZEME ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYON SONUÇLARI	74
9.1. Malzeme Yoğunlukları.....	74
9.2. Malzemelerin Mikroyapısal Özellikleri.....	74
9.3. Malzemelerin Faz Analizi.....	78
9.4. Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	81
9.5. CFRP Kompozit Malzemenin Özellikleri.....	84
9.6. Sonuçlar.....	84

10. SiAION SERAMİKLERİNİN ÇATLAK İYİLEŞME	
DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ	86
10.1. Giriş.....	86
10.2. Isıl İşlemin Mikroyapı Üzerine Etkisi.....	89
10.3. Isıl İşlemin Mukavemet Üzerine Etkisi	97
10.4. Sonuçlar	98
11. GEOMETRİ BELİRLEME TESTLERİ SONUÇLARI	100
11.1. İtme Kuvveti Analizi.....	100
11.2. Eksenel Kuvvet Analizi	105
11.3. Tork Analizi	107
11.4. Uç Aşınması.....	111
11.5. Delik Kalitesi	112
11.6. Sonuçlar	119
12. PERFORMANS TESTLERİ SONUÇLARI	121
12.1. Uç Aşınması	121
12.2. İtme Kuvveti ve Tork Değişimleri	133
12.3. Delik Kalitesi.....	136
12.4. Sonuçlar.....	139
13. WC/(Ta+W) ÇOK TABAKALI KAPLANMIŞ	
SiAION MATKAP UÇLARININ PERFORMANSLARI	141
13.1. Giriş.....	141
13.2. Kaplama Tabakasının Mikroyapı Karakterizasyonu	142
13.3. Kaplama Tabakasının Altlığa Bağlanma Mukavemeti	143
13.4. Kaplamanın Matkap Ucu Aşınma Performansına Etkisi	146
13.5. Sonuçlar.....	149
14. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER	150
15. KAYNAKLAR	153

ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1. Polimer matris kompozitlerin delinmesinde önemli parametreler.....	2
2.1. (a) Eş yönlü fiber dağılımlı tabaka (UD), (b) Örgü fiber dağılımlı tabaka.....	4
2.2. (a) Eş yönlü tabakaların üst üste konulması ile oluşturulan tipik bir yarı izotropik plaka ve (b) bu plakanın optik mikroskop kesit görüntüsü.....	4
3.1. GFRP kompozit malzemede açılan deliğin (a) kesit (b) yüzey SE-SEM görüntüleri.....	7
3.2. (a) Soyulma delaminasyonu ve (b) itme delaminasyonunun şematik gösterimi.....	8
3.3. İlerleme hızının GFRP kompozit üzerinde oluşturduğu (a) soyulma ve (b) itme delaminasyonu üzerine etkisi.....	9
3.4. Standart bir matkap ucunun geometrik detayları.....	10
3.5. (a) Kademeli, (b) Brad point, (c) Slot ve (d) tipik düz kanallı matkap ucu geometrileri.....	11
3.6. Toplam itme kuvvetinin bileşenleri.....	13
3.7. Matkap ucunun keski kenarı ve kesici ağızları üzerine etkileyen itme kuvvetlerinin ilerleme hızı ile değişimi.....	13
3.8. İtme kuvveti ve tork değerlerinin matkap ucunun bir tam tur dönmesiyle değişimi.....	14
3.9. İki nokta açılı bir matkap ucunun geometrik yapısı ile belirlenen itme kuvveti ve tork değişimi.....	15
3.10. CFRP kompozit malzemelerin kesilmesinde talaş oluşum mekanizmaları.....	16
4.1. Delaminasyon analizi için dairesel plaka modelinin şematik gösterimi.....	18
4.2. Farklı çaplardaki matkap uçları için eşit kesme hızında itme kuvvetinin ilerleme ile değişimi.....	19
4.3. (a) 8 mm ve (b) 13 mm çapındaki matkap uçları için farklı ilerlemelerde kesme hızının itme kuvvetine etkisi.....	20

4.4. Çeşitli kesme hızlarında görülen (a) 8 mm, (b) 13 mm çapındaki matkap uçlarının oluşturduğu soyulma ve (c) 8 mm, (d) 13 mm itme delaminasyon değişimleri	20
4.5. Karbür esaslı bir matkap ucunda farklı ilerlemelerde elde edilen (a) itme kuvveti ve (b) tork değerlerinin doğrusal değişimi	21
4.6. Matkap ucunda (a) nokta açısı ve (b) web kalınlığının itme kuvveti ve tork üzerine etkisi	22
4.7. (a) 120° nokta açılı burgulu, (b) 85° nokta açılı burgulu, (c) Brad, (d) Dagger ve (e) kademeli matkap uçlarının görüntüleri	23
4.8. (a) Matkap uçlarının oluşturdukları itme kuvvetinin ilerleme ile değişimi ve (b) deliklerde elde edilen delaminasyon faktörleri.....	24
4.9. (a) Burgulu, (b) Slot tipi, (c) Brad tipi, (d) Core tipi, (e) Kademeli matkap uçları için delaminasyon analizlerinin şematik gösterimleri ve (f) kritik itme kuvveti kıyaslaması.....	25
4.10. Talaş yüzeyi modifiye edilen (Plane relief) matkap ucunun farklı açılardan görünüşü.....	27
4.11. Farklı ilerleme hızlarında geleneksel matkap ucu ve yüzeyi modifiye edilen matkap uçlarının (a) itme kuvveti ve (b) tork grafikleri	28
5.1. (a) Tipik bir WC-Co mikroyapısı (b) Farklı uygulamalarda kullanılan karbür malzemelerde WC tane boyutunun ve Co miktarının sertlik değerine etkisi.....	30
6.1. Aşınma modu ve mekanizmasına göre aşınma sabiti (k) değişimi.....	34
6.2. Çeşitli malzemelerde aşınmanın (a) aşındırıcı tane sertliği ve (b) aşındırıcı tane boyutu, yük ve darbe hız ile (erozif aşınma durumunda) ilişkisi	35
6.3. Uç aşınmasıyla gerçekleşen kesme kenarı yuvarlanması (CER).....	36
6.4. Aşınmış bir ucun kesme kenarlarının şematik gösterimi ve aşınma analizinde kullanılan kriterler	37
6.5. WC tek kristal, karbür (cWC), kobalt (Co) ve karbon fiber (CF) malzemelerinin mikrosertlikleri.....	39

6.6. WC-Co matkap ucunun (a) keski kenarında (b) serbest yüzeyinde, (c) kesme köşesinde meydana gelen aşınmalar ve (d) serbest yüzeye yapışan karbon kalıntısı	40
6.7. 12000 ve 15000 hızlarında WC-Co matkap ucunun flank yüzeyde gerçekleşen aşınmanın zamanla değişimi	40
6.8. Uç aşınmasının itme kuvveti üzerine etkisi	42
6.9. Aynı operasyon koşullarında MDF malzemesinin delme sürecinde test edilen (a) kaplanmamış ve (b) elmas kaplı karbür matkap uçlarının kesme kenarı görüntüsü	43
6.10. (a) Elmas film tabakasının 1728 delik sonrasında kırılma durumu ve b) tabaka kalınlığı	43
6.11. Farklı geometrilere ve kaplamalara sahip matkap uçlarının artan kesme uzunluğu ile değişen aksenal yük değerleri	44
6.12. PCD bir uçta artan delik sayısıyla şiddetlenen kırılma durumu	45
7.1. (a) β -Si ₃ N ₄ ve (b) α -Si ₃ N ₄ kristal yapısı	46
7.2. Periyodik bağ zincir teorisine (PBC) göre hesaplanan β -Si ₃ N ₄ tanelerinin şekli	47
7.3. (a) Sc ₂ O ₃ , (b) Y ₂ O ₃ , (c) Lu ₂ O ₃ ve (d) La ₂ O ₃ katkılı Si ₃ N ₄ malzemelerinde çatlak ilerlemesi	52
7.4. Si ₃ N ₄ seramiklerinin kullanılan katyon çapına bağlı olarak değişen kırılma tokluğu ve mukavemet değerleri	53
7.5. (a) Mikroyapısal özelliklerin (b) tane sınırı fazının SiAlON malzemelerinde kırılma direnci üzerine etkileri	54
7.6. SiAlON seramiklerinde aşınmanın (a) malzeme sertliği, (b) kırılma tokluğu, (c) z değeri ve (d) matris tanelerinin çapı ile olan ilişkisi	56
7.7. Farklı aşınma yöntemlerinde test edilmiş SiAlON malzemelerinin aşınma davranışlarının mekanik özellikleri ile ilişkisi	57
7.8. Farklı uygulamalar için üretilen Si ₃ N ₄ esaslı malzemeler	58
8.1. SiAlON granüllerinin izostatik preslenmesinde kullanılan kalıp düzeneğinin şematik gösterimi	62
8.2. SiAlON malzemelerin gaz basınçlı sinterleme çevrimi	63
8.3. Taşlama sonrasında SiAlON matkap uçlarının görüntüleri	63

8.4. (a) G-1, (b) G-2, (c) G-3 ve (d) G-4 geometrilerinde üretilen SiAlON matkap uçlarının geometrik detayları	65
8.5. a) Tepe açısı 136° olan kare piramit şeklindeki elmas Vickers ucu ve b) Numune yüzeyinde oluşturduğu iz	68
8.6. Delme testlerinde kullanılan 5 eksen CNC dik işleme merkezi ve kuvvet ve tork verilerinin ölçüldüğü dinamometrenin görüntüsü	71
9.1. (a) 25A, (b) 25A-SiC, (c) MDA1 ve (d) WC-Co malzemelerine ait BE-SEM mikroyapı görüntüleri	76
9.2. SiAlON malzemelere ait XRD spektrası	79
9.3. WC-Co malzemesine ait XRD spektrumu	80
9.4. WC-Co malzemesine ait EDX analizi sonucu	81
9.5. (a) 25A, (b) 25A-SiC, (c) MDA1 ve (d) WC-Co malzemelerinde çatlak ilerleme davranışları	83
9.6. Testlerde kullanılan UD-CFRP kompozit malzemenin optik mikroskop kesit görüntüsü	84
10.1. G-1 geometrisine sahip SiAlON matkap ucunda taşlama ile oluşturulan kanallar (A1+A2) ve bu kanalların toplam kesite oranı	86
10.2. Taşlama süreci ve sonucunda yüzey altında oluşan mikroçatlakların şematik gösterimi	87
10.3. SiAlON matkap ucunun serbest yüzeyinde taşlama sonrası oluşan mikro-pullanmalar	87
10.4. D54 grit elmas aşındırıcı ile taşlanan 25A malzemesinin taşlanmış yüzey BSE- SEM kesit görüntüleri (a) taşlama sonrası, (b) 700°C, (c) 1000°C, (d) 1300°C'de ısıl işlem sonrası	91
10.5. D126 grit elmas aşındırıcı ile taşlanan 25A malzemesinin taşlanmış yüzey BSE- SEM kesit görüntüleri (a) taşlama sonrası, (b) 700°C, (c) 1000°C, (d) 1300°C'de ısıl işlem sonrası	91
10.6. D54 grit elmas aşındırıcı ile taşlanan 25A-SiC malzemesinin taşlanmış yüzey BSE-SEM kesit görüntüleri (a) taşlama sonrası, (b) 700°C, (c) 1000°C (d) 1300°C'de ısıl işlem sonrası	92

10.7. D126 grit elmas aşındırıcı ile taşlanan 25A-SiC malzemesinin taşlanmış yüzey BSE-SEM kesit görüntüleri (a) taşlama sonrası, (b) 700°C, (c) 1000°C, (d) 1300°C'de ısıtım sonrası.....	92
10.8. (a) 25A ve (b) 25A-SiC numunelerinin farklı ısıtım sıcaklıklarında faz dönüşümlerini gösteren XRD spektralleri	93
10.9. 1000°C sıcaklıkta 1 saat süre ile uygulanan ısıtım sonrasında (a) 25A ve (b) 25A-SiC malzemelerinin oksitlenmiş yüzey BE-SEM görüntüleri.....	94
10.10. 1300°C sıcaklıkta 1 saat süre ile uygulanan ısıtım sonrasında (a) 25A ve (b) 25A-SiC malzemelerinin oksitlenmiş yüzey BE-SEM görüntüleri.....	96
10.11. (a) D126, (b) D54 grit aşındırıcı ile taşlanmış 25A, (c) D126, (d) D54 grit aşındırıcı ile taşlanmış 25A-SiC numunelerinin ısıtım sıcaklığına bağlı olarak değişen mukavemet değerleri.....	98
11.1. G-1 geometrisine sahip SiAlON (25A) matkap ucunun Test 1 koşullarında oluşturduğu itme kuvveti ve tork değişimi	101
11.2. G-2 geometrisine sahip SiAlON (25A) matkap ucunun Test 1 koşullarında oluşturduğu itme kuvveti ve tork değişimi	101
11.3. G-3 geometrisine sahip SiAlON (25A) matkap ucunun Test 1 koşullarında oluşturduğu itme kuvveti ve tork değişimi	102
11.4. G-4 geometrisine sahip SiAlON (25A) matkap ucunun Test 1 koşullarında oluşturduğu itme kuvveti ve tork değişimi	102
11.5. (a) Test 1, (b) Test 2, (c) Test 3, (d) Test 4 ve (e) Test 5 koşullarında matkap uçları üzerinde oluşan itme kuvvetlerinin değişimi	104
11.6. G-1, G-2, G-3 ve G-4 geometrilerdeki SiAlON matkap uçlarında (a) ilerleme ve (b) kesme hızı ile itme kuvvetinin değişimi	105
11.7. (a) G-1, (b) G-2, (c) G-3 ve (d) G-4 geometrilerine sahip uçların Test-1 koşullarında oluşturdukları itme kuvvetleri ve aksiyel kesme kuvvetleri..	106
11.8. Test 1 sırasında matkap uçlarının oluşturmuş olduğu tork değerleri	107
11.9. Test 2 sırasında matkap uçlarının oluşturmuş olduğu tork değerleri	108
11.10. Test 3 sırasında matkap uçlarının oluşturmuş olduğu tork değerleri	108
11.11. Test 4 sırasında matkap uçlarının oluşturmuş olduğu tork değerleri	109

11.12. Test 5 sırasında matkap uçlarının oluşturmuş olduğu tork değerleri	109
11.13.G-1, G-2, G-3 ve G-4 geometrilerdeki SiAlON matkap uçlarında (a) ilerleme ve (b) kesme hızı ile itme kuvvetinin değişimi	110
11.14. Test 1 koşullarında açılan 3 delikte G-1 matkap ucu üzerinde oluşan itme kuvvetlerinin değişimi	111
11.15. Test 1 sonrasında (a) G-1, (b) G-2, (c) G-3 ve (d) G-4 matkap uçlarının kesme kenarlarının SEM görüntüleri.....	112
11.16. G-1 matkap ucunun (a) Test-1, (b) Test-2, (c) Test-3, (d) Test-4 ve (e) Test-5 koşullarında oluşan delik çıkışı delaminasyonları.....	115
11.17. G-1 matkap ucu ile (a) Test-1, (b) Test-2, (c) Test-3 ve (d) Test-4 koşullarında açılan delik giriş görüntüleri	116
11.18. G-2 matkap ucu ile (a) Test-1, (b) Test-2, (c) Test-3 ve (d) Test-4 koşullarında açılan delik giriş görüntüleri	117
11.19. G-2 matkap ucu ile (a) Test-1, (b) Test-2, (c) Test-3 ve (d) Test-4 koşullarında açılan delik görüntüleri	117
11.20. G-2 matkap ucu ile (a) Test-1, (b) Test-2, (c) Test-3 ve (d) Test-4 koşullarında açılan delik görüntüleri	118
11.21. G-1, G-2, G-3 ve G-4 matkap uçlarının değişen ilerleme hızları ile oluşturdukları delik kaliteleri.....	118
11.22. Matkap ucu nokta açısının kuvvet ve tork değerlerine etkisi.....	119
11.23. G1, G2, G3 ve G4 matkap uçlarının değişen ilerleme hızları ile oluşturdukları delik itme kuvvetleri ve delaminasyon miktarları.....	120
12.1. (a)Aşınma sonrasında kesme kenarı görüntüsü ve (b) A-A' kesitinin şematik gösterimi.....	122
12.2. 25A matkap ucunun (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. delik sonunda aşınmış kenar SE-SEM görüntüleri	123
12.3. 25A-SiC matkap ucunun (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. delik sonunda aşınmış kenar SE-SEM görüntüleri.....	124
12.4. MDA1 matkap ucunun (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. delik sonunda aşınmış kenar SE-SEM görüntüleri.....	125
12.5. WC-Co matkap ucunun (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. delik sonunda aşınmış kenar SE-SEM görüntüleri.....	126

12.6. (a) 25A, (b)25A-SiC, (c) MDA1 ve (d) WC-Co matkap uçlarının kesme kenarlarının A-A' kesitinde gerçekleşen aşınma ilerlemesi	128
12.7. Ömür testleri sonrasında matkap ucu malzemelerinin artan kesme uzunluğu ile aşınma miktarlarının değişimi	128
12.8. MDA1 matkap ucunun (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. delik sonrasında aşınmış kenar BE-SEM görüntüleri.....	130
12.9. SiAlON seramiklerinin aşınma miktarının sertlikle değişimi.....	131
12.10. SiAlON matkap uçlarının CFRP kompozit malzemelerin delme sürecindeki aşınma ilerlemesi.....	132
12.11. (a) 25A, (b) 25AS, (c) MDA1 ve (d) WC-Co matkap uçlarında kuvvet grafiklerinde aşınma ile meydana gelen değişim.....	134
12.12. (a) 25A, (b) 25AS, (c) MDA1 ve (d) WC-Co matkap uçlarında tork grafiklerinde aşınma ile meydana gelen değişim.....	135
12.13. Matkap uçlarında aşınmayla meydana gelen kuvvet artış miktarları.....	135
12.14. 25A matkap ucuyla açılan (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. deliklerin optik mikroskop görüntüleri.....	137
12.15. 25A-SiC matkap ucuyla açılan (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. deliklerin optik mikroskop görüntüleri.....	137
12.16. MDA1 matkap ucuyla açılan (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. deliklerin optik mikroskop görüntüleri.....	138
12.17. WC-Co matkap ucuyla açılan (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. deliklerin optik mikroskop görüntüleri.....	138
12.18. Ömür testlerinde farklı malzemelerdeki matkap uçlarıyla açılan deliklerdeki delaminasyon miktarlarının değişimi	139
12.19. SiAlON matkap uçlarında delme süreci boyunca gerçekleşen aşınma mekanizmaları.....	140
13.1. SiAlON matkap uçlarının yüzeylerine uygulanan WC/(Ta+W) kaplamanın (a) üst ve (b) kesit BE-SEM mikroyapı görüntüleri.....	143
13.2. WC/(Ta+W) kaplanmış SiAlON numunelerin yüzeylerine (a) 0,1, (b) 0,5, (c) 2, (d) 5 ve (e) 10 kgf yüklerle uygulanan indentasyon izleri ve hasarlı bölümlerin SE-SEM görüntüleri	144

13.3. Farklı indentasyon yüklerinin kaplama tabakasında oluşturduğu çatlak uzunluklarının değişimi	145
13.4. (a) Kaplanmamış ve (b) kaplanmış matkap uçlarının 1. delik sonunda kenar görüntüleri.....	146
13.5. (a) Kaplanmamış ve (b) kaplanmış matkap uçlarının 5. delik sonunda kenar görüntüleri.....	147
13.6. (a) Kaplanmamış ve (b) kaplanmış matkap uçlarının 15. delik sonunda kenar görüntüleri.....	147
13.7. (a) Kaplanmamış ve (b) kaplanmış matkap uçlarının 35. delik sonunda kenar görüntüleri.....	148
13.8. (a) Kaplanmamış ve (b) kaplanmış matkap uçlarının 65. delik sonunda kenar görüntüleri.....	148
13.9. Kaplanmış ve kaplanmamış SiAlON matkap uçlarının delme sürecindeki aşınma davranışları.....	149

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. FRP kompozit malzemelerin özellikleri	5
4.1. Farklı geometrilerdeki matkap uçları için kritik delaminasyon kuvvet modelleri	26
5.1. Farklı WC-Co malzemelerinin özellikleri	30
7.1. Aşınma testleri gerçekleştirilen SiAlON seramiklerinin özellikleri	56
8.1. SiAlON matkap ucu üretiminde kullanılan tozlar ve özellikleri	60
8.2. SiAlON kompozisyonlarının özellikleri	61
8.3. Taşlama sürecinde kullanılan parametreler ve taş özellikleri	69
8.4. Kuvvet ölçümü testlerinde kullanılan kesme parametreleri	71
8.5. Performans testlerinde kullanılan kesme parametreleri	72
8.6. SiAlON matkap uçlarına uygulanan WC/(Ta+W) kaplama özellikleri	73
9.1. Matkap ucu malzemelerinin yoğunluk değerleri	74
9.2. SiAlON ve WC-Co malzemelerinin Vickers sertlik ve kırılma tokluğu değerleri	81
9.3. Delme testlerinde kullanılan kompozit malzemenin özellikleri	84

SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ

(C/G)FRP	: Karbon/Cam Fiber Takviyeli Polimer
FML	: Fiber Metal Kompozit Lamineler
PCD	: Çok Kristal Elmas
UD	: Eş Yönlü
EDM	: Electro Discharge Machining
SE	: İkincil Elektron
BSE	: Geri Yansıyan Elektron
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-ışını Kırınımı
EDX	: Enerji Saçılımlı X-ışını
LEFM	: Doğrusal Elastik Kırılma Mekaniği
HSS	: Yüksek Hız Çeliği
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
CER	: Kesme Kenarı Yuvarlanması
PEG	: Poli Etilen Glikol
CIP	: Soğuk İzostatik Pres
CNC	: Bilgisayar Destekli Kontrol

1. GİRİŞ ve AMAÇ

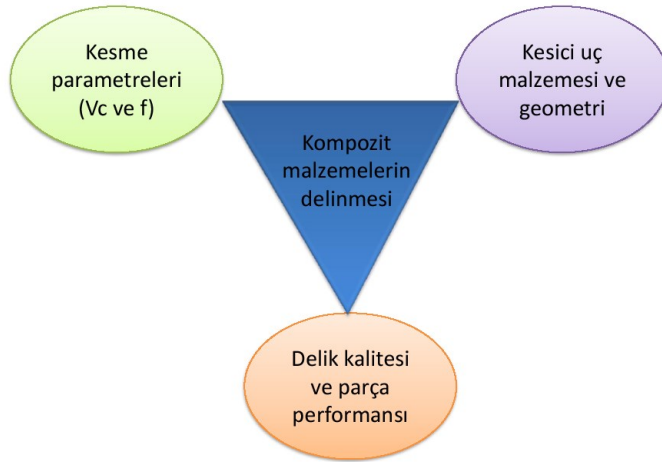
Son on yılda havacılık, uzay, otomotiv, spor gibi çeşitli sektörlerin yüksek performansa sahip, hafif malzemelere olan talebinin artması nedeniyle fiber takviyeli polimer kompozitler (FRPC) hızlı bir gelişme süreci göstermişlerdir. Fiber takviyeli polimer kompozitler temel olarak karbon fiber takviyeli polimer kompozitler (CFRP) [1], cam fiber takviyeli polimer kompozitler (GFRP) [2] ve fiber metal takviyeli kompozit lamineler (FML) [3] olarak sınıflandırılmaktadırlar. Bu malzemeler üstün özelliklerinden dolayı, pek çok alanda kullanılmakta olan geleneksel metalik malzemelerin yerini almaktadırlar [1].

Yapısal malzemeler olarak kompozit laminelerin diğer metal parçalara bağlanması kaçınılmaz olup [4], vidalama kalitesi ve verimi, açılan deliklerin kalitesine bağlıdır. Vida ya da cıvata ile bağlamada, yüksek bağlanma mukavemeti ve hassasiyet için hasar barındırmayan, hassas ölçülerde deliklerin elde edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, kompozit laminelerin anizotropik yapıları ve yüksek aşındırıcı özellikteki fiber takviye fazı nedeniyle, bu malzemeler işlenmesi zor malzemeler olarak tanımlanmaktadırlar [5,6]. Delme sırasında delaminasyon ve fiber çıkması gibi istenmeyen hatalar nedeniyle mukavemet düşmekte ve kompozit malzemenin uzun dönemde kullanım performansı azalmaktadır [7].

Delme sırasında meydana gelen hataların başında delaminasyon gelmektedir. Havacılık endüstrisinde kompozit plakaların delme süreci sonrasında uygunluk oranı % 40'lara kadar düşebilmektedir [8,9]. Sonuç olarak, delme sürecinde ortaya çıkan bu atık maliyeti en aza indirmek için Şekil 1.1'de verilen kesme koşulları, matkap ucu geometrisi ve malzemesi ve delik kalitesi parametrelerinin iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir [6].

İşlenmesi zor malzemeler sınıfında yer alan FRPC malzemelerin delme operasyonlarında, işleme sırasında oluşan zorlu kesme koşullarına dayanabilecek sınırlı sayıda malzeme bulunmaktadır. Bu malzemeler arasında üretim maliyetleri yüksek olan kaplamalı karbürler ve çok kristal elmas (PCD) uçlar yaygın

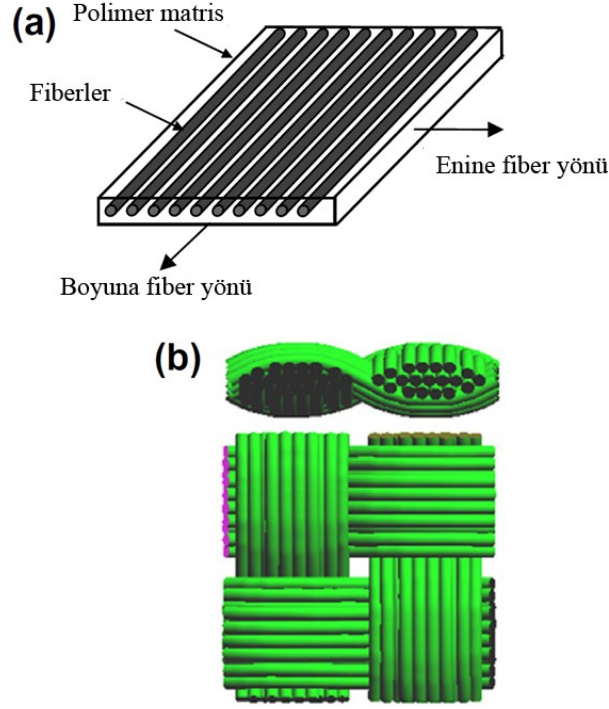
kullanılmaktadır. Gri dökme demirlerin işlenmesinde başarıyla kullanılan ve son yıllarda süperalaşımın tornalama operasyonlarında kullanımı yaygınlaşan SiAlON esaslı malzemeler kıyaslamalı olarak yüksek kırılma toklukları, yüksek sertlikleri ve yüksek kimyasal kararlılıkları sayesinde CFRP malzemelerin işlenmesinde önemli bir potansiyele sahip malzemelerdir. Bu çalışmada bir ilk olarak SiAlON esaslı malzemelerin havacılık sektöründe kullanılan en önemli malzemelerden biri olan CFRP malzemelerinin delme operasyonlarındaki performanslarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda SiAlON esaslı malzemelerin matkap ucu formunda üretimleri gerçekleştirilmiş, malzemelerin özelliklerine ve sürece uygun matkap ucu geometrik yapısı araştırılmış ve farklı özelliklerdeki SiAlON malzemelerinin CFRP kompozitlerin delme sürecindeki performansları kıyaslamalı olarak ortaya konulmuştur.



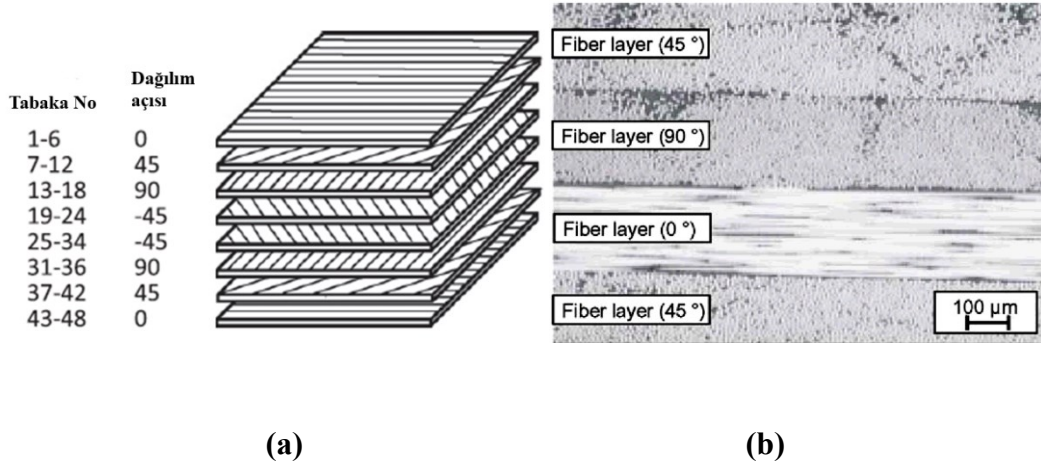
Şekil 1.1. Polimer matris kompozitlerin delinmesinde önemli parametreler [6]

2. FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT (FRPC) MALZEMELER

CFRP ve GFRP kompozit malzemeler, yüksek mekanik özellikleri sayesinde pek çok endüstriyel alanda kullanım bulan malzemelerdir. Fiber şeklindeki karbon ya da cam malzemenin polimer matrisi ile birleştirilmesi ile üretilmektedirler. Fiberlerin hafif, sık ve güçlü yapıları kompozit plakalara mukavemet kazandırmaktadır. Polimer matris ise fiberleri bir arada tutup yükü fiberlere iletmekte ve fiberleri dış ortamdan korumaktadır. Termosetler ve termoplastikler polimer matris olarak kullanılan plastik gruplarıdır [10]. Termoplastik polimerler daha yüksek mekanik özellikleri, çevre direnci, yüksek sıcaklık performansı ve kolay üretim teknikleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Fiberler genellikle eş yönlü (Unidirectional-UD) ya da örgü (Woven) pre-preg olarak adlandırılan ve 0,15 mm kalınlığında ince bir tabaka içerisinde üst üste yönlendirilirler [10]. Eş yönlü fiber dağılımlı bir “pre-preg” tabakası (Şekil 2.1a) fiber yönünde maksimum mukavemet sağlarken, fiber yönüne dik yönde minimum özellikler göstermektedir. Bu nedenle, malzeme yöne bağlı özellik (anizotropik) gösterir. Bununla birlikte iki yönlü fiber dağılımlı pre-preg tabaka (Şekil 2.1b) neredeyse bütün yönlerde maksimum mukavemete sahiptir. Fiber takviyeli polimer kompozit plakalar mükemmel özellikler elde etmek amacıyla pek çok pre-preg tabakanın bir araya getirilmesi ile elde edilmektedir. Sonuçta, eş yönlü tabakalar farklı fiber yönlenmelerinde üst üste konularak yarı izotropik kompozit plakalar üretilmektedir [10,11]. Şekil 2.2’de farklı yönlerde UD-tabakaların üst üste konulması ile elde edilen yarı izotropik plaka şekli verilmektedir.



Şekil 2.1. (a) Eş yönlü fiber dağılımlı tabaka (UD), (b) Örgü fiber dağılımlı tabaka (woven-ply) [10]



Şekil 2.2. (a) Eş yönlü tabakaların üst üste konulması ile oluşturulan tipik bir yarı izotropik plaka ve (b) bu plakanın optik mikroskop kesit görüntüsü [10-12]

Havacılık endüstrisinde yapısal parçalarda toplam ağırlığın azaltılması amacıyla metal alaşımların yerine kompozit plakaların kullanımı her geçen gün artmaktadır. GFRP kompozit malzemeler grenajlarda, depolama odaları

kapılarında, iniş takımı kapaklarında ve yolcu bölmelerinde kullanılmaktadır [1,10]. CFRP kompozit malzemeler ise kanat kutularında, yatay stabilizatörlerde ve kanat panellerinde kullanılmaktadır [1]. Yapısal parçalar (kanatlar, omurga ve burun gibi) kompozit plakalardan yapılmaktadır [3]. Boing 767'nin dış yüzeyinin %30'u kompozit plakalardan oluşmaktadır [10]. Boing 787 ve Airbus A350'de ise bu değer toplam ağırlığın %50'sini bulmaktadır [13-15].

Çizelge 2.1'de FRP kompozit malzemelerin uçak yapısal parçası olarak kullanımına olanak tanıyan mekanik özellikleri verilmektedir. Özellikle UD polimer kompozit malzemeler, sahip oldukları üstün mekanik özellikler ile dikkat çekmekte ve bu özelliklere bağlı olarak, işleme sürecinde kesici uç malzemesinden beklenen özelliklerin de yüksek olmasına neden olmaktadır.

Çizelge 2.1. FRP kompozit malzemelerin özellikleri [5]

FRP malzeme	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastik Modülü (MPa)	Kırılma uzaması, ϵ (%)	Yoğunluk (g/cm^3)
GFRP				
UD (Vf= % 60)	1000	45000	2,3	2,1
Örgü	100-300	10000-20000	-	1,5-2,1
Kısa fiberli	50-200	6000-12000	-	1,3-2,1
Kısa fiberli kalıplanmış plaka	10-20	500-2000	-	1,3-1,9
CFRP				
UD (Vf= %60)–yüksek mukavemetli	1200	145000	0,9	1,6
UD (Vf= %60) yüksek modüllü	800	220000	0,3	1,6

3. FRP KOMPOZİTLERİN DELME SÜRECİNDEKİ TEMEL KAVRAMLAR

FRP kompozitlerin delinmesinde lazer işleme, su jeti işleme ve EDM (Elektro Discharge Machining) gibi geleneksel olmayan yöntemler bulunsa da, matkap uçları ile geleneksel mekanik işleme operasyonları en yaygın kullanılan yöntem durumundadır. Yaygın biçimde kullanılmasının yanında, delme operasyonu en zorlu işleme süreçlerinden bir tanesidir. FRP kompozitlerin delme sürecinin geliştirilebilmesi, süreç üzerinde etkili olan parametrelerin iyi anlaşılmasına bağlıdır. Bu parametrelerden bazıları matkap ucu malzemesi ve geometrik özellikleri, delme sırasında oluşan itme kuvvetleri ve tork ve delme koşulları (kesme hızı, ilerleme hızı vb.) olup, bu parametreler delik kalitesini belirlemektedirler.

3.1. Delaminasyon

Delaminasyon, delme sonucunda tabakalar arasında oluşan ayrılma olarak tanımlanır ve delme sürecinde temel problem durumundadır. Şekil 3.1’de delaminasyonun gösterildiği ikincil elektron taramalı elektron mikroskobu (SE-SEM) görüntüleri verilmektedir. Delaminasyon, yalnızca boyutsal toleransların kaybedilmesine değil, aynı zamanda uzun kullanımda yorulma yükü altında malzemenin performansının önemli derecede etkilenmesine neden olmaktadır [7,16-18].

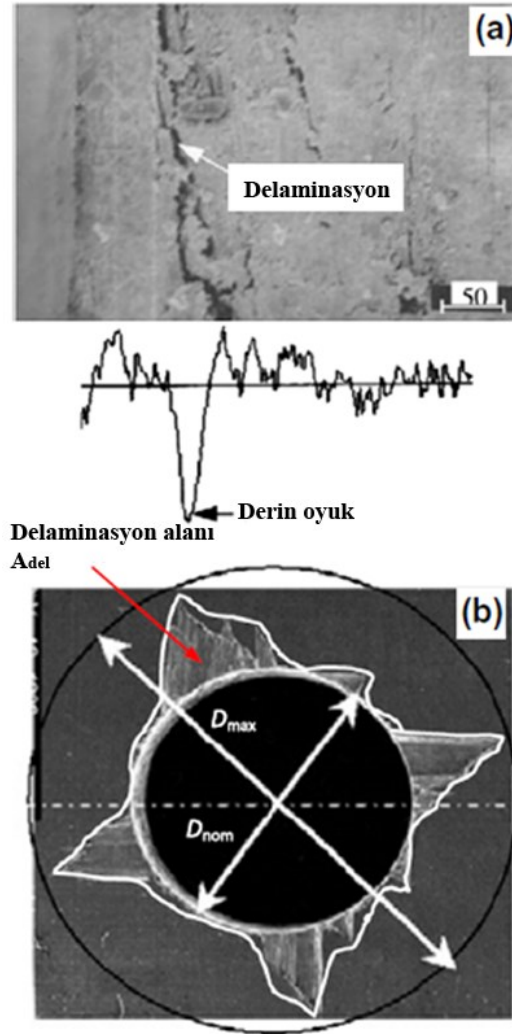
Açılan bir deliğin etrafında oluşan delaminasyon derecesinin ifade edilmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan ilki, bir boyutlu delaminasyon faktörü (F_d) olup, delaminasyon bölgesinin maksimum çapının açılan deliğin nominal çapına oranı olarak Eşitlik (3.1)’deki gibi ifade edilmektedir.

$$F_d = \frac{D_{mak}}{D_{nom}} \quad (3.1)$$

Burada, yalnızca yüzeydeki birkaç fiberin delaminasyon durumuna göre belirlenen F_d değeri bütün delme operasyonunun başarısını güvenilir bir şekilde göstermez [19]. Bu yüzden delaminasyon hasarının belirlenmesinde iki boyutlu delaminasyon faktörünün kullanılması (F_d) daha uygun görülmüş ve Eşitlik (3.2)'deki gibi ifade edilmiştir [21]:

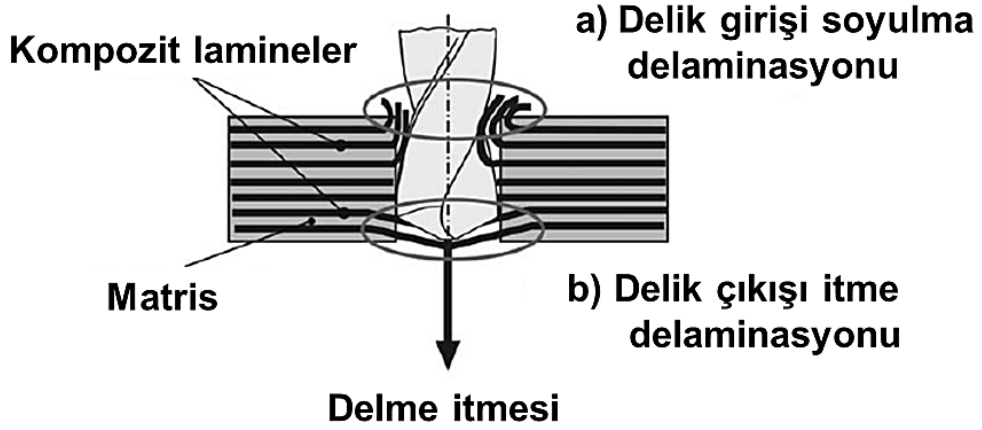
$$F_d = \left(\frac{A_{del} - A_{nom}}{A_{nom}} \right) \% \quad (3.2)$$

A_{del} , delaminasyona uğramış alan, A_{nom} ise deliğin nominal alanıdır.

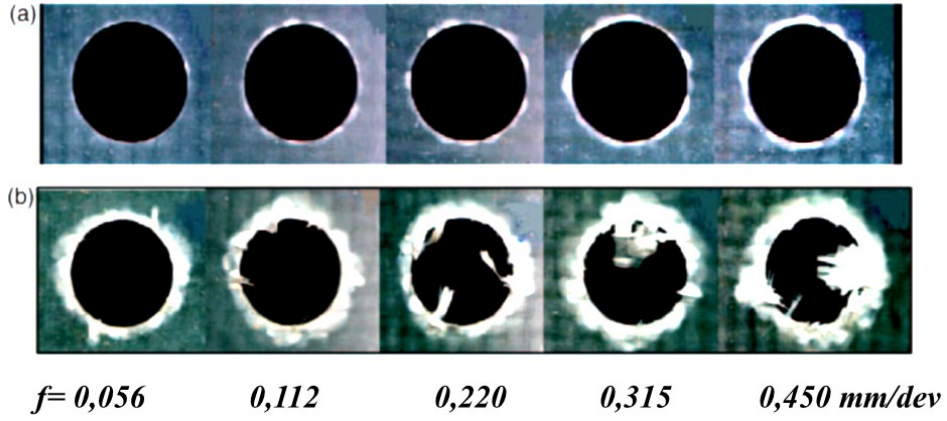


Şekil 3.1. GFRP kompozit malzemede açılan deliğin (a) kesit [20] (b) yüzey SE-SEM görüntüleri [21]

Delaminasyon, hem delik girişinde, hem de çıkışında gerçekleşmektedir. Şekil 3.2’de şematik olarak gösterilen soyulma ve itme delaminasyonları kompozit plakaların delinmesi sırasında oluşan delaminasyon çeşitleridir. Soyulma delaminasyonu deliğin girişinde oluşmaktadır (Şekil 3.2a). Matkap ucunun kompozit plaka ile teması sırasında matkap ucu kanallarının eğimi boyunca oluşan soyulma kuvveti, delik çevresinde tabakaların birbirinden ayrılmasına neden olur. İtme delaminasyonu ise delik çıkışında oluşur (Şekil 3.2b). Matkap ucu delik çıkışına ulaştığında ucun hemen altındaki kesilmeyen tabakalar, plaka kalınlığının azalmasına bağlı olarak deformasyona karşı daha duyarlı hale gelirler. Delme sırasında oluşan itme kuvvetleri, tabakalar arası bağlanma mukavemetinin üzerinde ise, itme delaminasyonu gerçekleşmektedir. Şekil 3.3’te görüldüğü gibi pratikte itme delaminasyonu, soyulma delaminasyonundan şiddetli gerçekleşmektedir [13, 20, 22, 23].



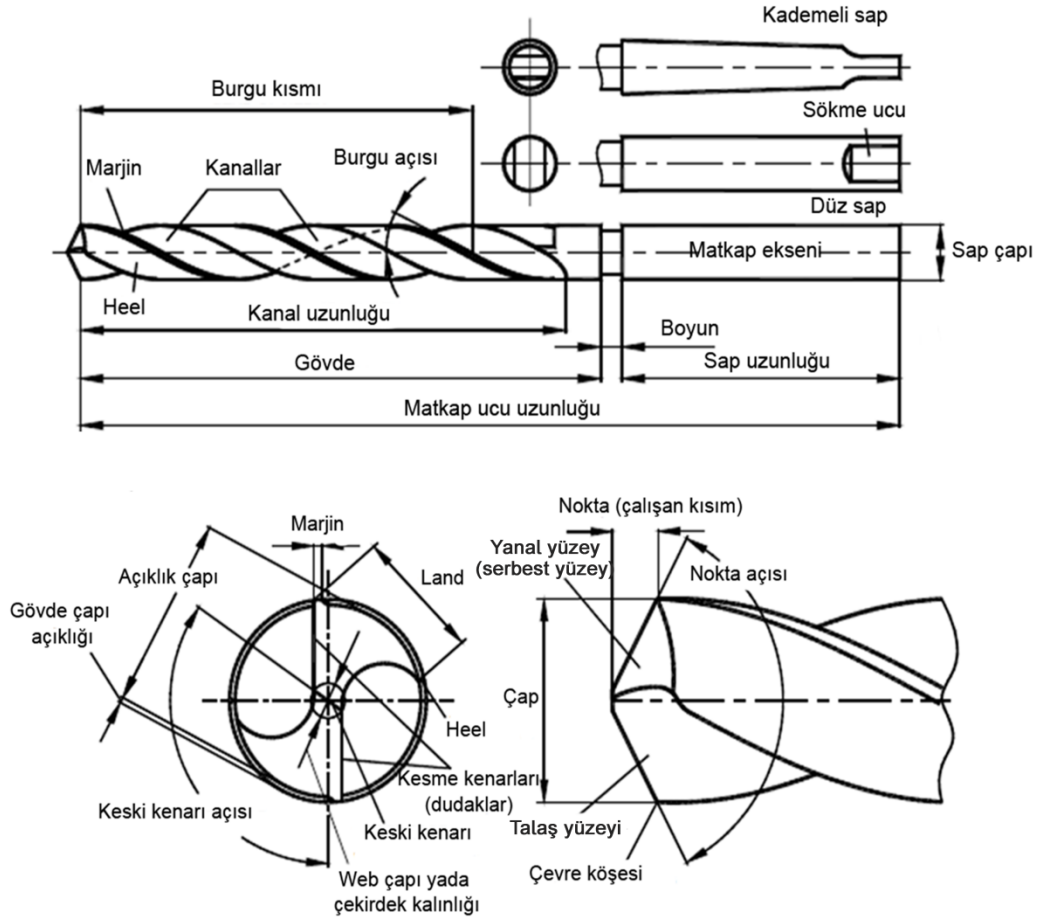
Şekil 3.2. (a) Soyulma delaminasyonu ve (b) itme delaminasyonunun şematik gösterimi [19]



Şekil 3.3. İlerleme hızının GFRP kompozit üzerinde oluşturduğu (a) soyulma ve (b) itme delaminasyonu üzerine etkisi [20].

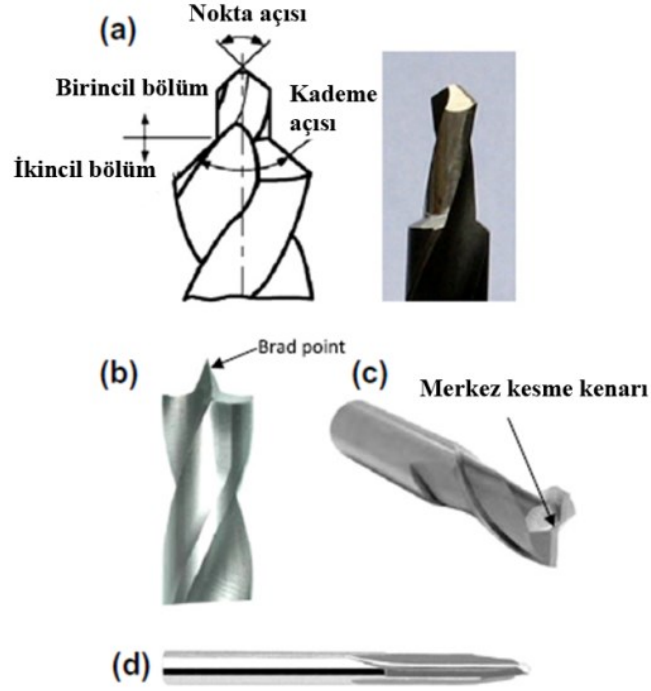
3.2. Matkap Uçları ve Delme Operasyonu

Geçtiğimiz on yıl boyunca uç ve kaplama malzemeleri önemli bir gelişme göstermiştir. Yeni, güçlü, yüksek hıza ve rijitliğe sahip tezgâhlar ve yüksek basınçlı soğutucularla birlikte delme hızlarında önemli artışlar kaydedilmiştir. Bununla birlikte son yıllarda, bilgisayar kontrollü hassas taşlama cihazlarının yaygınlaşmasıyla yeni matkap ucu tasarımları yaygınlaşmıştır. Matkap ucu geometrisi ve yüzey özellikleri, uç ve kaplama malzemelerinden en yüksek verimin alınabilmesi için geliştirilmesi gereken önemli bir parametredir. Şekil 3.4'te nokta açısı, marjin kalınlığı, keski kenarı, kanal profili ve sayısı gibi pek çok geometrik detaya sahip olan standart bir burgulu matkap ucu geometrisi verilmektedir. İki kanallı burgulu bir matkap ucu, nokta açısını oluşturan iki ana kesme kenarına sahiptir. Her bir ana kesme kenarı tek bir kesici uç gibi hareket etmektedir. Kanallar, oluşan talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılmasını sağlamaktadır [24].



Şekil 3.4. Standart bir matkap ucunun geometrik detayları [25]

Kompozit plakaların delinmesinde çeşitli geometrilere sahip farklı malzemelerde matkap uçları kullanılmaktadır. Geometrik özelliklerine göre literatürde bildirilen matkap uçları 6 grupta incelenebilir. Bunlar, (1) burgulu, (2) kademeli, (3) Brad point, (4) slot, (5) düz kanallı ve (6) çekirdek matkap uçları şeklindedir ve bu geometrilerden bazıları Şekil 3.5'te gösterilmektedir [26].



Şekil 3.5. (a) Kademeli [27], (b) Brad point, (c) Slot ve (d) tipik düz kanallı matkap ucu geometrileri [26]

D çapında N (devir/dk) hızında dönen ve f (mm/dev) ilerleme hızına sahip bir matkap ucu için kesme hızı (v_f) Eşitlik (3.3) ile ifade edilmektedir.

$$v_f = fN \quad (3.3)$$

Diş başına ilerleme (a_f), kanal sayısı (T) ve devirdeki ilerlemeye (f) bağlı olup, Eşitlik (3.4) ile tanımlanır.

$$a_f = \frac{f}{T} \quad (3.4)$$

Malzeme uzaklaştırma hızı (Z_w) ise Eşitlik (3.5) ile hesaplanmaktadır.

$$Z_w = v_f \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) = \frac{\pi f D^2 N}{4} \quad (3.5)$$

L_h kalınlığında bir kompozit plaka üzerinde 1 adet deliğin açılması için gereken zaman (t_m), plaka kalınlığının (L_h) yanında matkap ucunun konik uç

bölümünün temizlenmesi için gereken mesafeyi (L_e) de kapsamaktadır. L_e mesafesi Eşitlik (3.6), delme için gereken zaman ise (3.7) ile ifade edilmektedir.

$$L_e = \frac{D}{2 \tan \kappa} \quad (3.6)$$

$$t_m = \frac{L_h + L_e}{v_f} \quad (3.7)$$

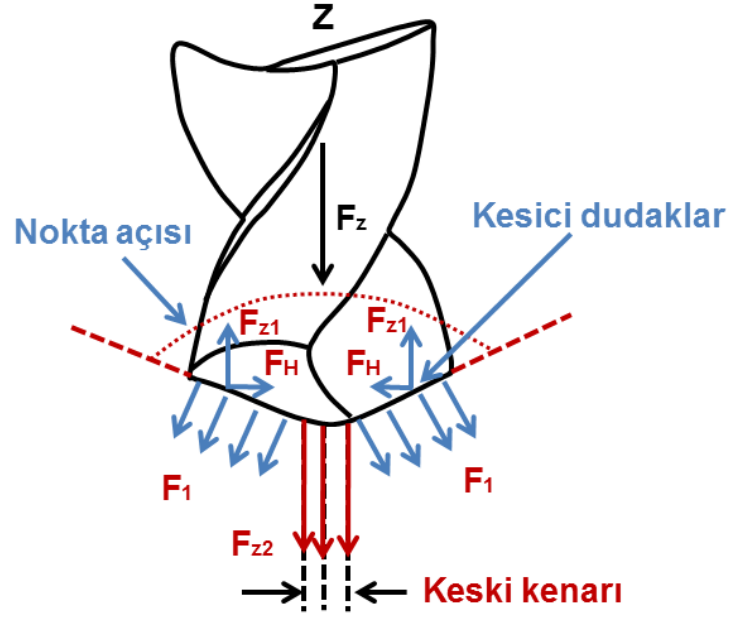
Eşitlik (3.6)'daki κ , matkap ucunun nokta açısının yarısına eşittir.

Delme sürecinde matkap ucunun kompozit malzeme ile temas uzunluğu (L_c) uç ömür testlerinde kullanılan önemli bir veri olup Eşitlik (3.8) ile ifade edilmektedir [27].

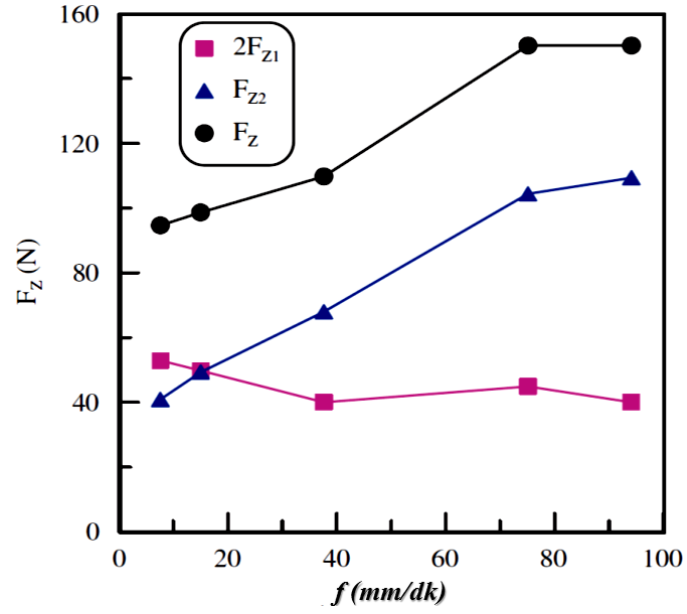
$$L_c = \frac{L_h}{f} \sqrt{f^2 + (\pi d)^2} \quad (3.8)$$

3.3. İtme Kuvveti ve Tork

İtme kuvveti, fiber takviyeli polimer kompozitlerin delinmesinde delaminasyonun temel nedeni olarak gösterilmektedir. Delme sırasında oluşan itme kuvveti (F_z), Şekil 3.6'da şematik olarak gösterildiği gibi F_{z1} ve F_{z2} olmak üzere iki bileşene ayrılır. F_{z1} kesme dudaklarının kompozit malzeme ile teması sonrasında oluşan, F_{z2} ise keski kenarının oluşturduğu itme kuvveti olarak tanımlanır ($F_z = 2F_{z1} + F_{z2}$). F_z değeri kompozit malzemenin delinmesi ile herhangi bir ön delik açılmadan ölçülebilir. İki kesme dudağının oluşturduğu itme kuvveti (F_{z1}) ise keski kenarı uzunluğuna eşit bir çap uzunluğuna sahip matkap ucuyla, pilot delik açılması yoluyla ölçülebilmektedir. İşlem sonucunda, keski kenarının toplam itme kuvveti içerisindeki katkı miktarı belirlenebilmektedir. Şekil 3.7'de bu işlemler sonucunda elde edilen itme kuvveti bileşenlerinin ilerleme hızı ile değişimleri verilmiştir.

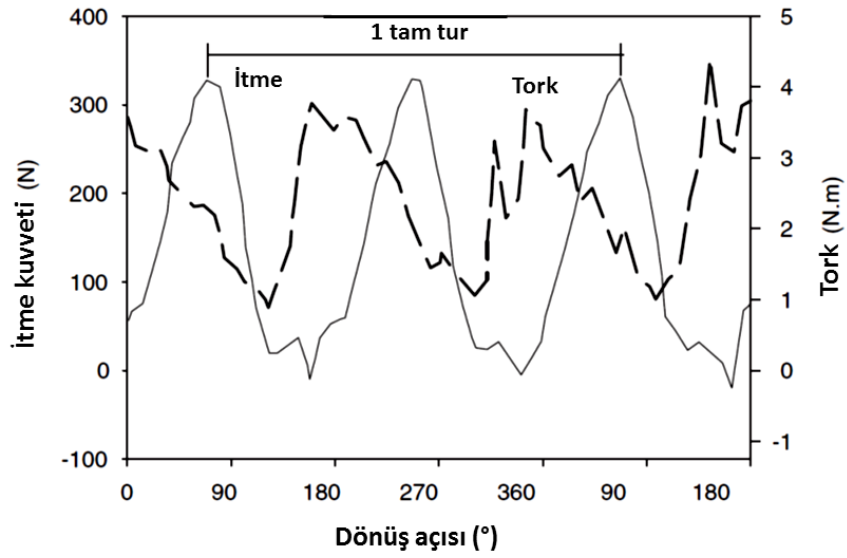


Şekil 3.6. Toplam itme kuvvetinin bileşenleri [28,29]



Şekil 3.7. Matkap ucunun keski kenarı ve kesici ağızları üzerine etkiyen itme kuvvetlerinin ilerleme hızı ile değişimi [29]

Eş yönlü (UD) kompozit plakaların delinmesinde fiber dağılım açılarının çeşitlilik göstermesi nedeniyle delme kuvvetleri çevrimsel bir davranış gösterir. Şekil 3.8’de iki kanallı bir matkap ucunun CFRP kompozit delme sürecinde bir tam turu sırasında oluşan itme kuvveti ve tork değişimi verilmektedir [30]. Fiber dağılımlarına göre oluşan itme kuvvetleri ve tork, çevrimsel ve tekrar eden bir grafik izlemektedir. İtme kuvveti şiddetinin en yüksek olduğu durumda delaminasyon gerçekleştiğinden maksimum değerler belirleyici durumdadır [31].



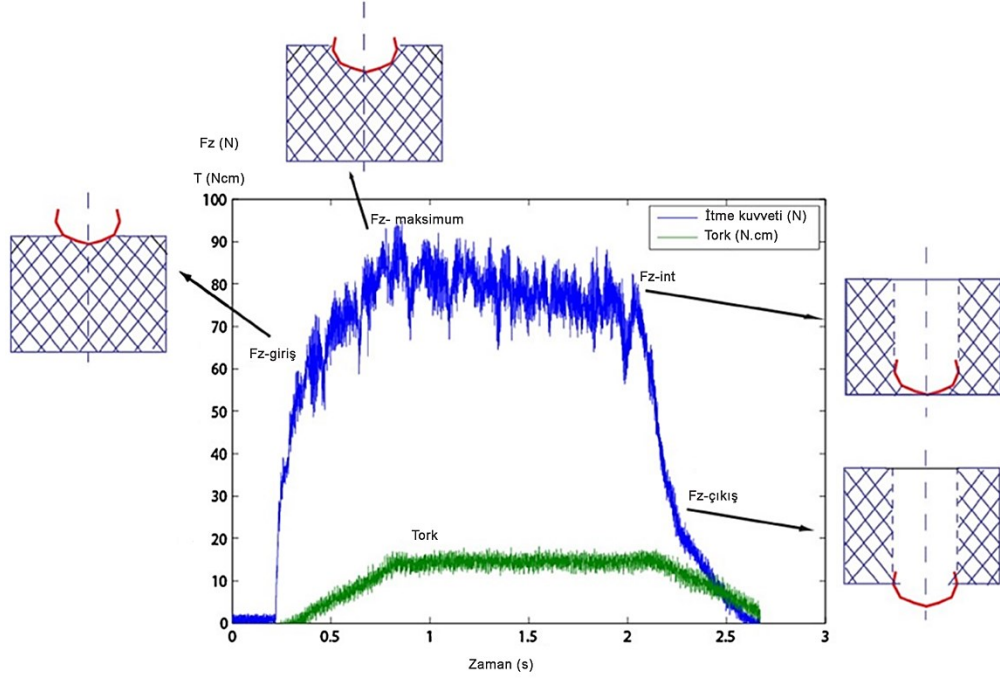
Şekil 3.8. İtme kuvveti ve tork değerlerinin matkap ucunun bir tam tur dönmesiyle değişimi [30]

Delme sırasında oluşan tork, ana kesme kenarları üzerine etkileyen kesme kuvvetleriyle oluşur ve şiddeti bu kuvvetler tarafından belirlenir (Eşitlik (3.9)).

$$M = F_c \frac{d}{2} \quad (3.9)$$

Burada F_c ana kesme kenarları üzerine etkileyen kesme kuvveti, d ise matkap ucu çap uzunluğudur [24].

Şekil 3.9’da, iki nokta açılı bir matkap ucunun geometrik yapısına göre değişen tipik bir itme kuvveti ve tork grafiği verilmektedir.

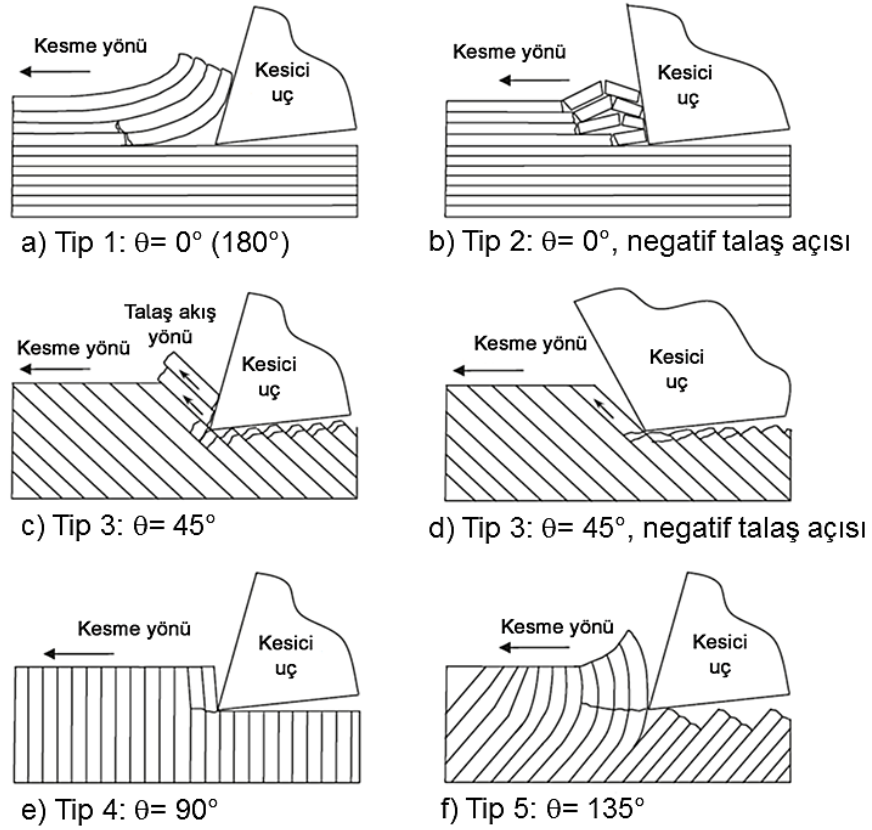


Şekil 3.9. İki nokta açılı bir matkap ucunun geometrik yapısı ile belirlenen itme kuvveti ve tork değişimi [32]

Matkap ucu iki farklı nokta açısına sahip olduğundan itme kuvveti eğrisi maksimum değerine ulaşırken iki farklı eğim ile artmaktadır. Tork değeri ise matkap ucunun uç bölümünün malzeme içerisine tamamen gömülmesiyle en yüksek değerine ulaşmaktadır. İtme kuvvetini belirleyen temel etken nokta açısıdır. Matkap ucunun delikten çıkmaya başlamasıyla kuvvet değerinde ani bir azalma meydana gelir. Matkap ucunun torku taşıyan en dış bölümü malzeme ile temas halinde olduğundan tork değerinin düşüşü kuvvet düşüşüyle aynı anda gerçekleşmez. Giriş bölümünde olduğu gibi delik çıkışında da iki farklı eğim söz konusudur. İtme kuvveti değeri matkap ucunun uç bölümünün malzemeyi terk etmesiyle hızlı bir şekilde düşer (F_{z-int}). İkinci eğimin sonunda görülen itme kuvveti, $F_{z-çıkış}$ olarak gösterilmiştir. F_{z-int} ve $F_{z-çıkış}$ itme kuvvetlerinin toplamı matkap ucunun kompozit malzemeye yaptığı itmenin şiddetini belirlemektedir [32].

3.4 Talaş Oluşum Mekanizması

Eş yönlü fiber takviyeli polimer kompozitlerin işlenmesinde talaş oluşumu, fiber dağılım yönleri ve talaş açısına göre 5 farklı şekilde gerçekleşmektedir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. CFRP kompozit malzemelerin kesilmesinde talaş oluşum mekanizmaları [24]

Delaminasyon türü talaş oluşumu (Tip 1) 0° fiber yönünde ve pozitif talaş açılarında gerçekleşmektedir (Şekil 3.10a). Kesici uç, işlenen parça üzerinde konumlandığında Mod 1 kırılma ve yüklenme meydana gelir. Çatlak kesici ucun uç noktasında oluşur ve fiber-matris ara yüzeyi boyunca ilerler. Uç işlenen malzeme içerisinde ilerledikçe, soyulan tabakalar talaş yüzeyinden kayar ve bir eğilme davranışı gösterir. Bunun sonucunda da kırılma gerçekleşir ve küçük parçalar halinde bir talaş oluşumu gözlenir. Kesme kuvvetleri delaminasyon, eğilme ve kırılma çevrimleri boyunca dalgalanma gösterir [24].

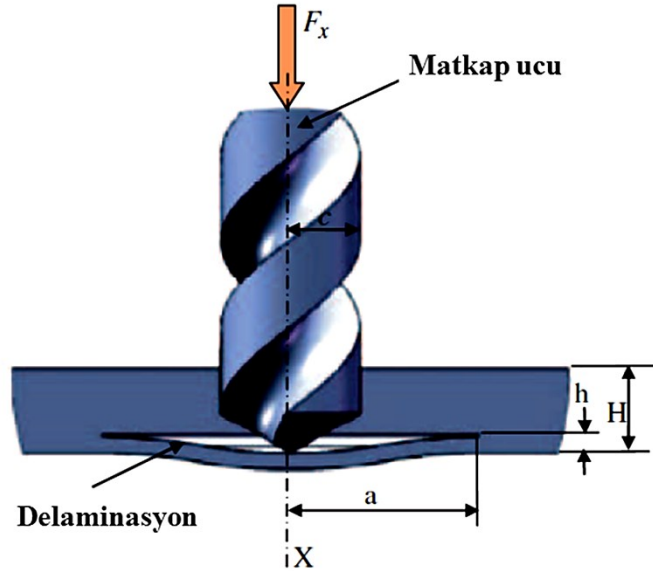
Fiber burulması şeklindeki talaş oluşumu (Tip 2) 0° fiber yönünde ve negatif talaş açılarında gerçekleşmektedir (Şekil 3.10b). Bu durumda fiberler yönleri boyunca basma yüklerine maruz kalırlar ve bu sayede burulma gerçekleşir. İlerleyen kesici uç Mod 2 (kayma) yüklenmesi meydana getirir veya fiber-matris ara yüzeyinde kayma ve kırılmalara neden olur. Burulma sonrasında fiberler, dağılım yönlerine dik yönde bir kırılma gösterirler. Kesme kuvvetleri Tip 2’de, Tip 1’e kıyasla daha dar bir aralıkta salınım gösterirler [24].

Fiberlerin kesilmesi sonucunda talaş oluşumu, fiber yönlerinin 0° ’den büyük, 90° ’den küçük olduğu durumlarda, bütün talaş açılarında oluşmaktadır (Şekil 3.10c-e). Talaş oluşum mekanizmasında fiber eksenine boyunca basma kuvvetlerinin oluşturmuş olduğu bir kayma ve bu süreci takip eden bir lamineler arası kırılma süreci söz konusudur. Talaş oluşumunda basma kuvvetlerinin etkili olduğu bölümde kesme düzleminin altı ve üstünde fiberlerde çatlak oluşumları meydana gelir. Kesme düzleminin altında kalan çatlaklar işlenmiş yüzeyde görülebilmektedir. 90° ’ye kadar olan tüm pozitif fiber dağılımlarında talaş akımı fiber dağılım yönüne paralel bir düzlemde gerçekleşir. Bu durum, talaş oluşumunun metallerde meydana gelen plastik kayma esasına benzemesine neden olmaktadır. Buradaki en önemli fark ise FRP kompozit malzemelerde plastik deformasyon sürecinin gerçekleşmemesidir. Malzeme uzaklaştırma, UD-kompozitlerin aynı düzlemde gerçekleşen kayma özellikleri ile gerçekleşmektedir. Talaşın, fiber kesilme çeşidi sürekli (Tip 3) ve süreksiz (Tip 4) olabilmektedir [24].

Büyük fiber dağılım açılarında ($105-150^\circ$) makro-kırılma süreci söz konusudur. Kompozit malzeme içerisinde ilerleyen kesici malzeme şiddetli bir deformasyon oluşturur ve fiberlerin delaminasyonuna neden olur. Kesici malzemenin uç noktasında oluşan basma gerilmeleri matris ve fiberlerin çatlmasına ve uzun ve süreksiz talaşların (Tip 5) oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 3.10f) [24].

4. DELAMİNASYONU BELİRLEYEN FAKTÖRLER

İtme kuvveti, delme sırasında oluşan delaminasyonu ve delik kalitesini belirlediği için, kompozit malzemelerin işlenmesinde en önemli parametre olarak kabul edilmektedir [20]. Delaminasyon bölgesinin boyutları itme kuvveti ile ilgili olduğundan, delaminasyon gerçekleşmesi için minimum bir kritik itme kuvveti değeri tanımlanmıştır [33]. Bu kritik itme kuvveti, ilk olarak Hocheng ve Dharan [18] tarafından geliştirilmiştir. Çalışmada, lineer elastik kırılma mekaniği (LEFM) ile burgulu bir matkap ucu için delaminasyona neden olan kritik itme kuvveti modellenmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Delaminasyon analizi için dairesel plaka modelinin şematik gösterimi [18]

Kompozit plaka üzerinde bazı noktalarda oluşan gerilme, tabakalar arası bağ mukavemetini zayıflattığı için delik çıkışında delaminasyon gerçekleşmektedir. Bu noktada Eşitlik (4.1)'de verilen kritik itme kuvveti delaminasyona neden olmaktadır.

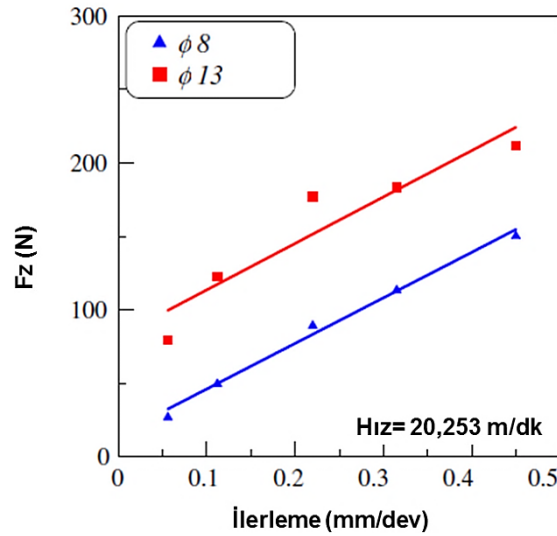
$$F_{crit} = \pi \left[\frac{8G_{IC}E_1h^3}{3(1 - \nu_{12}^2)} \right]^{1/2} \quad (4.1)$$

Burada E_I Young modülü, G_{IC} tabakalar arası kırılma tokluğu (Mod I'e göre), ν_{12} kompozit malzemenin Poisson oranıdır.

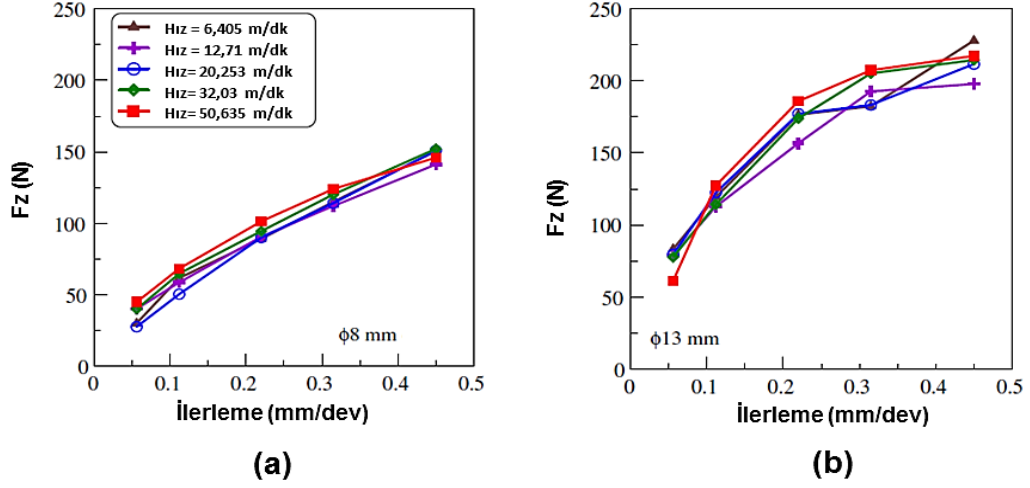
Delaminasyon kompozit malzemenin iç özellikleri dışında kesme sırasında kullanılan kesme ve ilerleme hızları, matkap ucu geometrik özellikleri ve matkap ucu malzemesinin kenar aşınması tarafından kontrol edilmektedir.

4.1 Kesme Koşulları ve Delaminasyon

Delaminasyon oluşumunda kesme hızından çok, ilerleme hızının belirleyici olduğu bilinmektedir. Khashaba ve ark. [20], GFRP kompozit malzemelerin delme sürecinde kesme koşullarının itme kuvveti ve delaminasyon üzerindeki etkilerini farklı çaplardaki matkap uçlarını test ederek belirlemişlerdir. Yapılan çalışmada ilerleme hızının oluşan itme kuvveti üzerinde belirleyici olduğu Şekil 4.2'de, kesme hızının ise belirgin bir etkisinin bulunmadığı Şekil 4.3'te görülmektedir. İlerleme hızının ve matkap çapının artmasıyla itme kuvvetinin artış göstermesi, deforme olmamış talaş kesitinin artmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak talaş oluşumuna karşı dirençle birlikte eksenel itme kuvveti de artış gösterir [20].

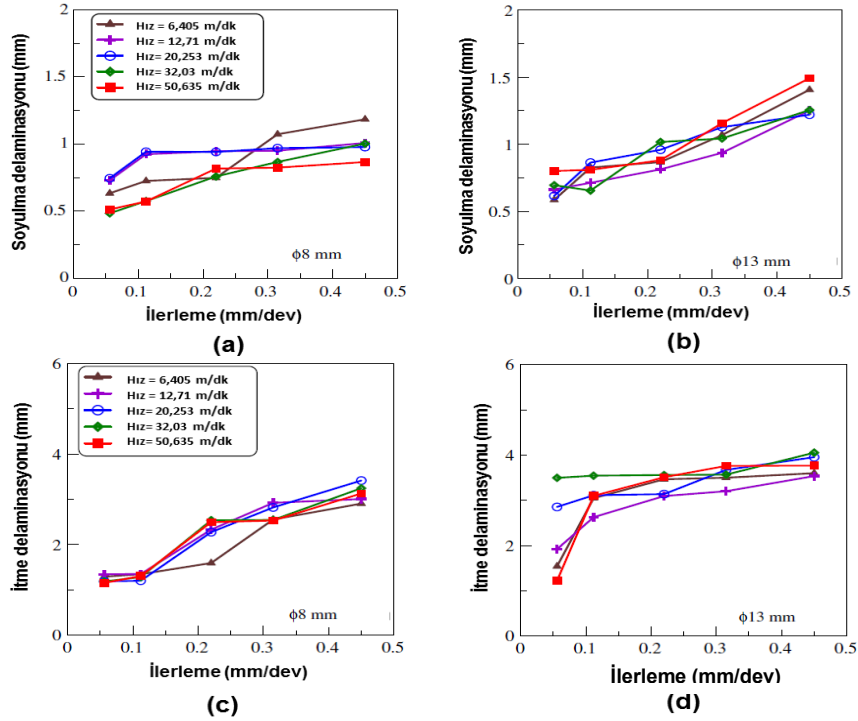


Şekil 4.2. Farklı çaplardaki matkap uçları için eşit kesme hızında itme kuvvetinin ilerleme ile değişimi [20]



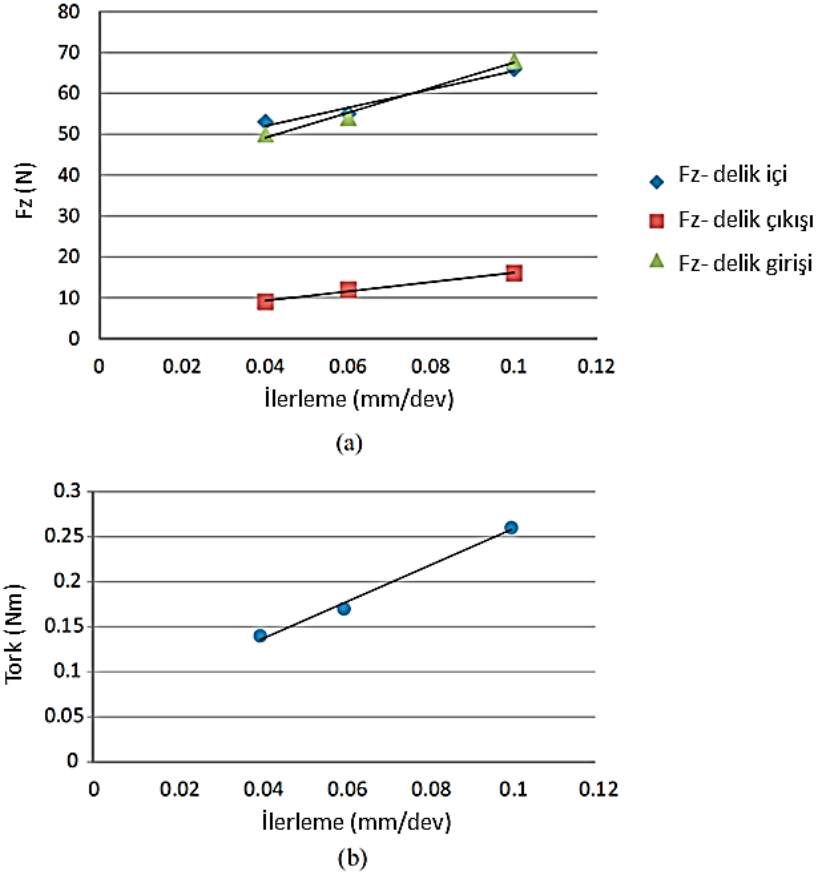
Şekil 4.3. (a) 8 mm ve (b) 13 mm çapındaki matkap uçları için farklı ilerlemelerde kesme hızının itme kuvvetine etkisi [20]

Şekil 4.4'te ilerleme miktarı ile delik giriş (a ve b) ve çıkışlarında (c ve d) oluşan delaminasyon miktarının arttığı görülmektedir. Matkap çapını artmasıyla birlikte itme kuvveti de artış göstermekte, bu durum delaminasyon miktarlarına da yansımaktadır.



Şekil 4.4. Çeşitli kesme hızlarında görülen (a) 8 mm, (b) 13 mm çapındaki matkap uçlarının oluşturduğu soyulma ve (c) 8 mm, (d) 13 mm itme delaminasyon değişimleri [20]

Karpat ve ark. [32], örgü yapıdaki CFRP kompozit malzemenin delme sürecinde WC-Co esaslı bir matkap ucunda, sabit kesme hızında (5000 dev/dk) ve farklı ilerleme değerlerinde oluşan itme kuvveti ve torkun doğrusal olarak değiştiğini ifade etmişlerdir. Çalışmada matkap ucunun delik girişinde, içerisinde ve çıkışında oluşturduğu itme kuvveti değerleri de belirlenmiştir (Şekil 4.5).

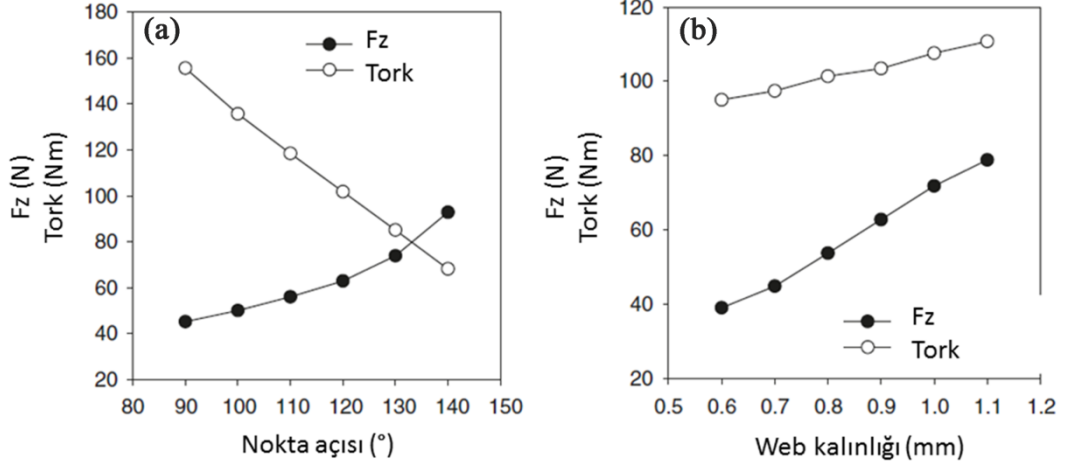


Şekil 4.5. Karbür esaslı bir matkap ucunda farklı ilerlemelerde elde edilen (a) itme kuvveti ve (b) tork değerlerinin doğrusal değişimi [32]

4.2 Matkap Ucu Geometrik Özellikleri ve Delaminasyon

Standart burgulu bir matkap ucunda itme kuvveti ve torku belirleyen geometrik parametreler nokta açısı, web kalınlığı (keski kenar uzunluğu) ve matkap çapıdır. Bu parametrelerden talaş oluşumuna karşı direncin artmasına

neden olan matkap çapı, itme kuvveti ve tork değerinin artmasına neden olmaktadır [20]. Nokta açısının ve web kalınlığının etkisi ise Şekil 4.6'da verilen grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Matkap ucunda (a) nokta açısı ve (b) web kalınlığının itme kuvveti ve tork üzerine etkisi (Matkap çapı: 5mm HSS, kesme hızı: 1370 dev/dk, ilerleme: 0,1 mm/dev) [34].

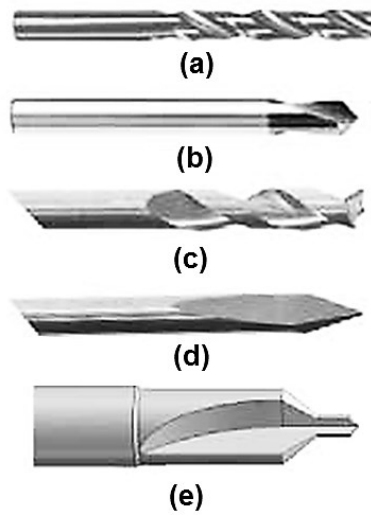
Nokta açısının artması sürtünme alanının artmasına neden olduğundan itme kuvveti de artış göstermektedir. Nokta açısının artmasıyla tork değerinde kaydedilen azalma, birincil kesme kenarı boyunca ortogonal talaş açısının artmasından kaynaklanmaktadır. Web kalınlığının artması, hem tork hem de itme kuvvetinin artmasına neden olmaktadır. Web kalınlığının artması keski kenar uzunluğunun artması ve ortogonal talaş açısının azalması anlamına gelmektedir [34].

Karnik ve ark. [35], 130, 115 ve 85° nokta açılına sahip karbür burgulu matkap uçlarını CFRP malzemelerin delme sürecinde test etmişler, matkap ucunun geometrik özelliklerinin sürece olan etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, minimum delaminasyonun yüksek kesme hızlarında düşük nokta açılı matkap uçlarında elde edildiğini göstermiştir. Benzer bir çalışmada Chen [34], burgu açısının artması ile itme kuvveti ve torkun azaldığını, web kalınlığının artması ile de itme kuvveti ve tork değerlerinin arttığını ifade etmiştir. Burgulu bir matkap

ucu için keski kenarının itme kuvveti üzerine olan etkisinin %40-60 oranlarını bulabileceği ifade edilmektedir [36, 28,37].

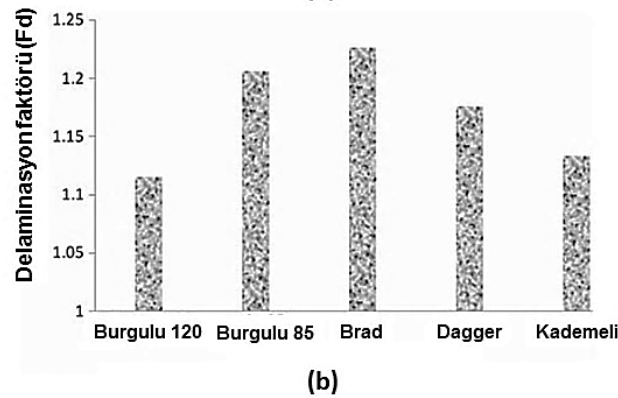
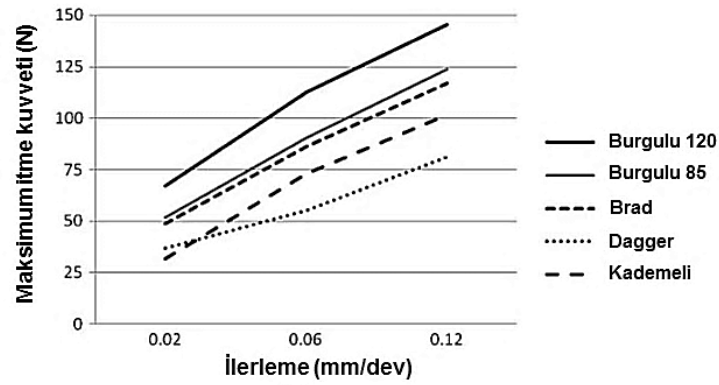
Kompozit malzemelerin delinmesinde kullanılan matkap ucu geometrisi delik kalitesinde önemli bir belirleyici olduğundan, matkap ucu geometrik özellikleri geliştirilmeye açık alanların başında gelmektedir. Son yıllarda, standart burgulu matkap uçları dışında özel geometrilere sahip matkap uçlarının kullanımı yaygın bir durum haline gelmiştir. Piquet ve ark. [38], 25° burgu açısına sahip 4,8 mm çapındaki ve 6° talaş ve serbest açısında bir burgulu matkap ucu ile aynı çapa sahip 3 kesme kenarı bulunan, burgu açısı ve talaş açısı 0°, serbest açısı 6° olan özel bir matkap ucu kullanarak elde edilen delik kalitelerini karşılaştırmışlardır. Her iki matkap ucunda ana kesme kenar açısı 59° olup, özel matkap ucunda 59°'den 0°'ye değişen bir ikincil kesme kenar açısı bulunmaktadır. Sonuçlar, özel geometriye sahip matkap ucunun daha az temas uzunluğu ile daha az delaminasyona neden olduğunu göstermiştir.

Durao ve ark. [39], iki farklı nokta açısına sahip (120° ve 85°) standart burgulu matkap uçları ile Brad tipi, Dagger tipi ve kademeli bir matkap ucunun performanslarını itme kuvveti, delik yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon açısından kıyaslamışlardır. Şekil 4.7'de, çalışmada kullanılan matkap uçlarının görüntüleri verilmektedir.



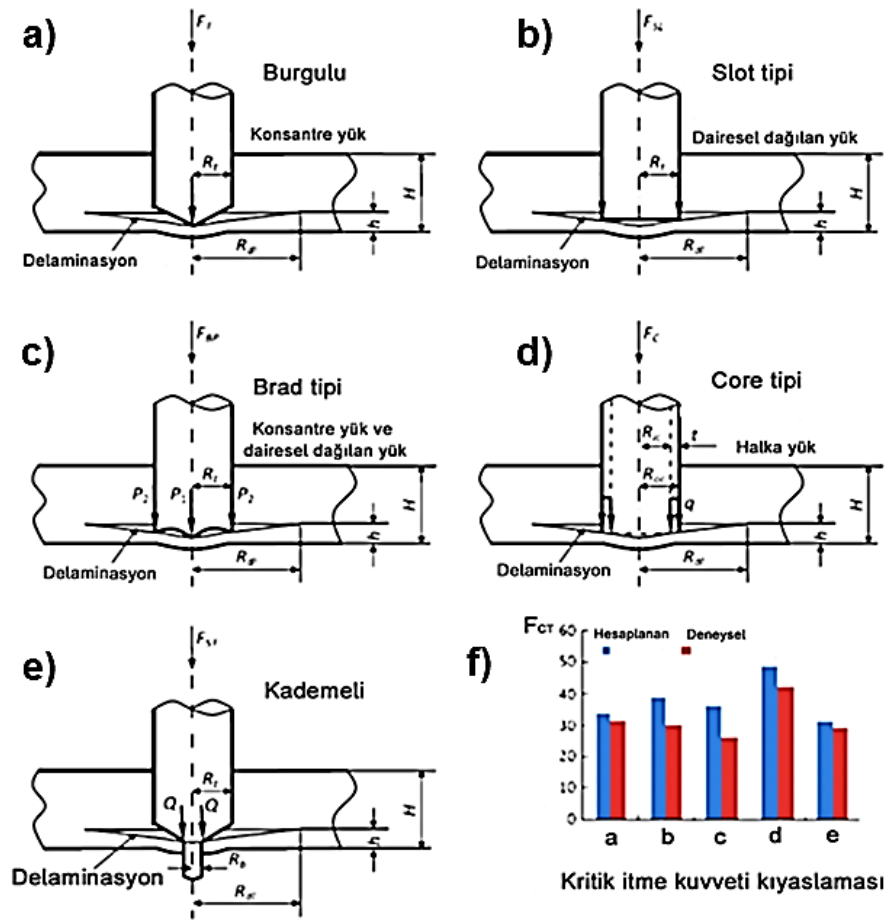
Şekil 4.7. (a) 120° nokta açılı burgulu, (b) 85° nokta açılı burgulu, (c) Brad, (d) Dagger ve (e) kademeli matkap uçlarının görüntüleri [39]

Testler sonrasında elde edilen itme kuvvetleri Şekil 4.8a'da, kompozit plakaların delaminasyon dereceleri Şekil 4.8b'de verilmektedir. Sonuçlar, ilerleme hızının azalmasıyla itme kuvvetinin azaldığı ve bu sayede delaminasyon riskinin de azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, düşük ilerleme hızlarında kesme bölgesindeki sıcaklık artışı ve ısıl kaynaklı hasar riski arttırmaktadır. 120° nokta açısına sahip burgulu matkap ucu en yüksek itme kuvvetini oluştururken, nokta açısının düşmesi itme kuvvetini de düşürmektedir. En düşük itme kuvveti ise Dagger tipi ve kademeli matkap uçlarında görülmektedir. Matkap uçlarının oluşturdukları delik kaliteleri incelendiğinde ise, 120° nokta açılı burgulu matkap ucu ile elde edilen deliklerin delaminasyon hasar kriterinin en düşük olduğu bulunmuştur. Bu durum, delaminasyonun yalnızca itme kuvvetine bağlı bir parametre olmadığını göstermektedir. Kademeli matkap ucu ise, oluşturduğu düşük itme kuvveti ve delaminasyon faktörü ile standart matkap ucuna alternatif olabilecek durumdadır [39].



Şekil 4.8. (a) Matkap uçlarının oluşturdukları itme kuvvetinin ilerleme ile değişimi ve (b) deliklerde elde edilen delaminasyon faktörleri [39]

Matkap ucu geometrisine bağılı gerçekleşen delaminasyonun tahmin edilebilmesi için çeşitli analitik modeller ileri sürülmüştür [18,33,40,41]. Bu modellerden ilki, Hocheng ve Dharan [18] tarafından burgulu bir matkap ucu için geliştirilmiş (Şekil 4.1) ve delaminasyona neden olan kritik itme kuvveti Eşitlik (4.1) ile ifade edilmiştir. Hocheng ve Tsao [41] ise, Şekil 4.9’da geometrik şekilleri verilen (kademeli, Brad tipi, Slot vb.) farklı matkap uçları için modeller geliştirmişlerdir. Elde edilen kritik itme kuvveti modelleri Çizelge 4.1’de özetlenmektedir.

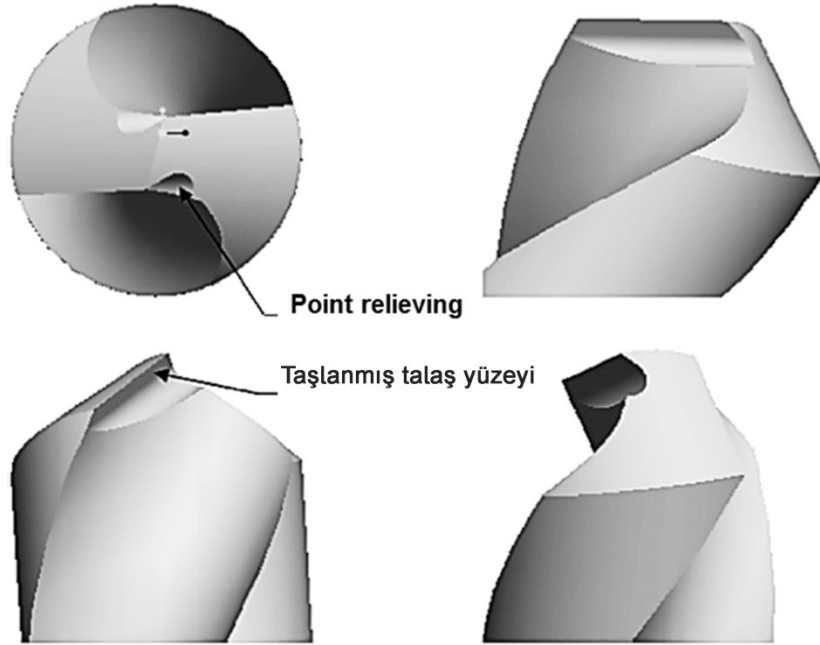


Şekil 4.9. (a) Burgulu, (b) Slot tipi, (c) Brad tipi, (d) Core tipi, (e) Kademeli matkap uçları için delaminasyon analizlerinin şematik gösterimleri ve (f) kritik itme kuvveti kıyaslaması [42]

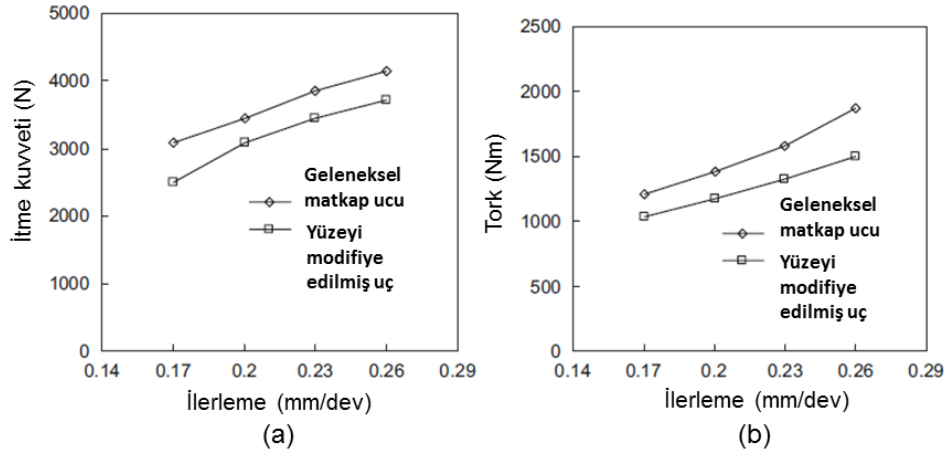
Çizelge 4.1. Farklı geometrilerdeki matkap uçları için kritik delaminasyon kuvvet modelleri [18,33,40,41]

No	Matkap ucu tipi	Şema	FCT model	Açıklamalar
				E - Elastik modülü
				ν - Poisson oranı
1	Burgulu	4.9 a	$F_{CT} = \pi \left[\frac{8G_{IC} E h^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{1/2}$	G_{IC} - lamineler arası kırılma tokluğu (Mod I)
				h - kesilmeden kalan tabaka kalınlığı
				S - R_t/R_{dl}
2	Slot tipi	4.9 b	$F_{CSL} = \frac{1}{\sqrt{1-2S^2+S^4}} F_{CT}$	R_t - matkap ucu yarıçapı
				R_{dl} - delaminasyon yarıçapı
3	Brad tipi	4.9 c	$F_{CBP} = \frac{1+\alpha}{\sqrt{1+\alpha^2(1-2S^2+S^4)}} F_{CT}$	α - konsantre yük (P_1) ile dairesel yük (P_2) oranı
				S - R_{oc}/R_{dl}
4	Core tipi	4.9 d	$F_{CBP} = \frac{\beta(2-\beta)}{\sqrt{[1-(1-\beta)^4] - \left(\frac{1}{2}\right)S^2[(1-(1-\beta)^6]}} F_{CT}$	β - Core matkap ucu kalınlığı
				R_{oc} - Core matkap ucu dış yarıçapı
5	Kademeli	4.9 e	$F_{CBP} = \frac{\sqrt{2}}{1-\nu} \left(\frac{[(1-\nu)+2(1+\nu)\Delta^2]^2}{(1+\nu)[2(1-\nu)(1+2\nu^2) - 12(12-4\nu^2+3\nu^2+3\nu^3)\Delta^2 - 8(1+3\nu)\Delta^2 \ln\Delta]} \right)^{1/2} F_{CT}$	
				Δ - R_b/R_t

Fiber takviyeli polimer kompozitlerin delinmesi için geliştirilmiş olan özel geometrilerin dışında, standart bir burgulu matkap ucunun kesme kenarında yapılacak değişiklikler de itme kuvveti ve delaminasyonun azaltılmasında etkilidir. Wang ve Zhang [43], Şekil 4.10’da gösterildiği gibi standart bir matkap ucunun keski kenarından başlayan ve ana kesme kenarlarının talaş yüzeyince uzanan bir taşlama operasyonu ile kesme kenarını modifiye etmişler ve sürece olan etkilerini incelemişlerdir. Şekil 4.11’de verilen grafiklerde de görüldüğü gibi, standart bir matkap ucuna kıyasla delme sırasında daha düşük itme kuvveti ve tork değerleri elde etmişlerdir.



Şekil 4.10. Talaş yüzeyi modifiye edilen (Plane relief) matkap ucunun farklı açılardan görünüşü [43]



Şekil 4.11. Farklı ilerleme hızlarında geleneksel matkap ucu ve yüzeyi modifiye edilen matkap uçlarının (a) itme kuvveti, (b) tork grafikleri [43]

5. KESİCİ UÇ MALZEMELERİ

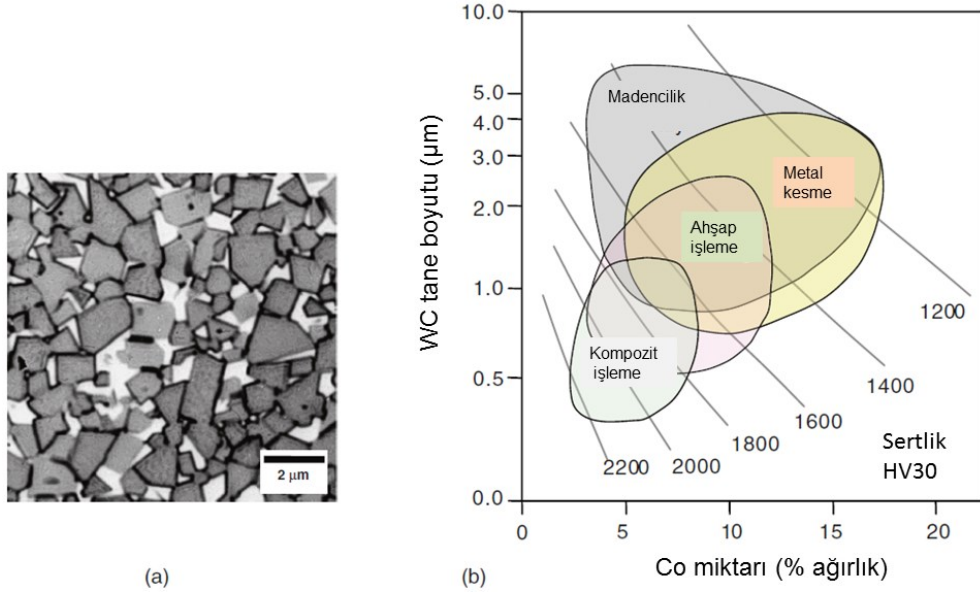
Fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin delinmesinde kullanılan matkap uçları için farklı malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler yüksek hız çelikleri (HSS), kaplamalı ya da kaplamasız karbür uçlar ve çok kristalli elmas (PCD) malzemeler olarak sıralanmaktadır. Her bir malzeme grubu sahip olduğu karakteristik mekanik ve ısıl özellikler sayesinde, farklı talaşlı imalat yöntemleri için uygun durumdadır. Sertlik, malzemenin aşınma davranışında önemli bir rol üstlenirken, kırılma direnci kesikli kuvvetler karşısında malzemenin ani kırılmalara karşı dayanımını arttıran bir özelliktir. Ancak, yüksek sertliğe sahip olan malzemeler oldukça düşük kırılma direncine, ya da yüksek kırılma dayanımına sahip olanlar ise yetersiz sertliğe sahip olup ideal malzemedir (hem sert hem tok) uzaktırlar [24].

Yüksek hız çelikleri (HSS), bilinen en eski kesici malzeme grubunu oluşturur. En yüksek kırılma direncine sahip olan bu malzemeler, orta derecede mukavemete ve düşük sayılabilecek sertlik değerine sahiptirler. Yeniden bilenebilme özellikleri ve düşük maliyetleri avantaj olarak görülse de yüksek sıcaklıklarda yumuşamaya bağlı mekanik dayanımlarının azalması, bu malzemelerin yüksek kesme hızlarında kullanımını kısıtlamaktadır. Yetersiz sertlikleri ve orta derece mukavemet değerleri ile fiber takviyeli polimerler gibi aşındırıcı malzemelerin işlenmesinde de tercih edilmezler [24].

5.1. Karbür Malzemeler

WC-Co esaslı malzemeler, sert karbür tanelerinin Co bağlayıcı metal fazı ile oluşturdukları ve mikroyapısı Şekil 5.1a'da verilen bir metal matris seramik kompozit malzemedir. Co fazı miktarı %20'ye kadar ulaşabilmektedir. Karbür tane boyutu ise 0,4-10 µm arasında değişmektedir. Farklı tane boyutundaki karbür fazının farklı oranlarda Co birleşimiyle oluşturulan mikroyapı çeşitliliği, bu malzemelerin geniş bir uygulama alanına sahip olmalarını sağlamaktadır

(Şekil 5.1b). Karbürlerin, kimyasal kompozisyona ve karbür tane boyutuna bağlı olarak değişen özellikleri Çizelge 5.1’de verilmektedir [24].



Şekil 5.1. (a) Tipik bir WC-Co mikroyapısı (WC taneleri gri, Co metaline ise beyaz görünmektedir)
 (b) Farklı uygulamalarda kullanılan karbür malzemelerde WC tane boyutunun ve Co miktarının sertlik değerine etkisi [24]

Çizelge 5.1. Farklı WC-Co malzemelerinin özellikleri [24]

Karbür türü	ISO sınıfı	Kompozisyon		WC tane boyutu	Sertlik (Rockwell)	Kırılma mukavemeti (MPa)	Tokluk (MPam ^{-1/2})
		WC	Co				
1	K30	90,5	9,5	1,7	90,4	2600	14
2	K20	94	6	1,7	92,1	2200	12
3	K10	96	4	1,3	92,9	2300	-
4	K10	96,5	3,5	1,2	93	1900	9
5		97	3	1,2	94	2100	-
6		97	3	0,7	93,9	3300	7
7		95	5	0,8	94	2300	-
8		97	3	0,8	94,1	2000	5,4
9		97,5	2,5	0,4	95,4	1800	4,5

Karbür malzemeler kullandıkları işleme operasyonuna göre değişen P, M ve K ISO sınıflandırmasıyla ifade edilmektedir. P grubu karbürler, karbon çelikleri ya da ferritik çelikler gibi uzun talaş yapısındaki malzemelerin işlenmesinde kullanılırlar. Bu operasyonlarda kesme kuvvetleri yüksek ve krater aşınması baskın durumdadır. M grubu karbürler, dökme demir veya ostenitik çelik gibi daha kısa talaş uzunluklarına sahip malzemelerin işlenmesinde kullanılırlar. Aşınmada ucun pullanması söz konusudur. K grubu karbürler ise demir dışı metallerin ve polimer ve diğer kompozitlerin işlenmesinde kullanılırlar [24].

WC tanelerinin büyümesinin engellenmesi ve yüksek sıcaklık kırılma mukavemetinin artırılması amacıyla yapıya Cr_3C_2 ilavesi yapılmaktadır. Cr_3C_2 , düşük sıcaklık fazı olan $\alpha-Co$ 'ın, yüksek sıcaklıkta kararlı faz olan $\epsilon-Co$ fazına dönüşümünü engeller ve sünek karakterin korunmasını sağlar [44].

Karbür malzemelerin aşınma dayanımlarının artırılması amacıyla sert seramik kaplama malzemeleri, çeşitli kalınlıklarda yüzeye uygulanırlar. Kaplamada, 900-1050°C sıcaklıklarda uygulanan kimyasal buhar biriktirme (CVD) ile daha düşük sıcaklıklarda uygulanan (400-450°C) fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemleri kullanılmaktadır. PVD yöntemi daha ince taneli kaplamanın ve yüksek kırılma tokluğu değerinin elde edilmesinin yanında, altlığa daha az tahribat verdiği için avantajlı bir yöntemdir. Fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin işlenmesinde sentetik elmas kaplamalar yaygın biçimde kullanılmaktadır. İnce elmas tabakasının sağladığı yüksek aşınma dayanımı ile bu malzemeler, fiber takviyeli polimer kompozitlerin delinmesinde kullanılan malzemelerin başında gelmektedir. CVD yöntemi kullanılarak üretilen ince elmas tabakaların altlık malzemesine tam bağlanmasını sağlamak, bu alanda yapılan çalışmaların odağını oluşturmaktadır. WC-Co içerisindeki Co, karbon atomlarını çözen iyi bir çözücü olduğundan elmasın Co varlığında yüzeye tutunması, oluşan grafit geçiş tabakası nedeniyle zayıf olmaktadır. Elmas tabakasının altlığa zayıf bağlanması, bu malzemelerin ticarileşmesinde en büyük problemi oluşturmaktadır [45].

5.2. Çok Kristal Elmas Malzemeler

Elmas bilinen en sert malzemedir ve kesme uygulamalarında uzun yıllardır kullanılmaktadır. Elmas yüksek ısıl iletkenlik, düşük sürtünme katsayısı ve pek çok malzemeye kesme sırasında yapışmaması özellikleriyle en ideal kesici malzemelerden bir tanesidir. Bununla birlikte, küçük boyutlu olmaları, kırılmaya duyarlılıkları ve yüksek maliyetleri tek kristal elmas malzemelerin kesici uç uygulamalarında kullanımını kısıtlamaktadır. Bu durum, tek kristal elmasları yalnızca çok yüksek hassasiyet istenen operasyonlarda kullanımıyla sınırlandırmaktadır [24].

Çok kristal elmas malzemeler, elmas parçacıklarının az miktarda kobalt metali ile birlikte çok yüksek sıcaklık ve basınç altında preslenmesi ile üretilmektedirler. Sinterlenmiş ürün, lazer ya da EDM yöntemi ile istenen ölçülerde kesilip karbür bir altlığa kaynaklanır. PCD'nin tek kristal elmasa göre avantajı, mekanik özelliklerin tüm yapı içerisinde düzgün dağılımıdır. En büyük dezavantaj ise, seramik ve karbür malzemelerden 10 kat daha fazla olan maliyetleridir. Bu malzemelerin bir diğer dezavantajı ise, yüksek sıcaklıklarda demirli alaşımlarla olan reaksiyona girme eğilimleridir [24].

PCD uçların performansı elmas kristal boyutuna bağlıdır. 2-30 μm boyutlarında elmas tanelerinde üretilen bu malzemelerde kırılma tokluğu ve sertlik, tane boyutu ile artış göstermektedir. İnce tane boyutundaki (2-5 μm) PCD uçlar orta derecede aşındırıcı olan malzemelerin (ahşap, alüminyum, plastikler vb.) işlenmesinde kullanılır. Orta tane boyutlu PCD'ler (10 μm) genel amaçlı kullanılırlar ve cam fiberler, seramikler, kauçuk, bakır ve karbon malzemelerin işlenmesinde yüksek performans sağlarlar. Kaba tane boyutlu (25-30 μm) PCD malzemeler ise, yüksek darbe dayanımları ile yüksek aşındırıcı etkiye sahip malzemelerin işlenmesinde kullanılırlar [24].

6. AŞINMA

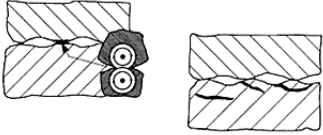
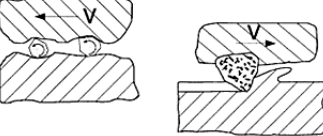
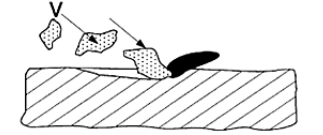
Aşınma, malzeme hareketine bağlı olarak sürekli bir hasar ile malzeme yüzeyinde gerçekleşen kayıp olarak tanımlanmaktadır. Aşınma, maliyet arttırıcı unsurların başında yer almakta olup, süreç malzeme özellikleri ve ortam koşullarıyla yakından ilişkilidir [46].

Bütün aşınma süreçlerine uygulanabilen basit ve evrensel bir model bulunmamaktadır. Kuru ortamda, yağlayıcı kullanılmadan, iki farklı malzeme yüzeyinin yük altında temas etmesi ikili (two-body) koşul olarak tanımlanır. Ara yüzeyde üçüncü bir malzeme varlığı ile aşınma engellenebilse ya da azaltılabilse de, eğer bu malzeme yağlayıcı ya da düşük sürtünme katsayısına sahip bir ince film değilse, aşınma önemli derecede artış göstermektedir. Bu durum üçlü (third body) koşul olarak tanımlanır [46]. Bazı araştırmalarda üçlü aşınmanın ikili aşınmaya kıyasla 10 kat daha az olduğu ifade edilmektedir. Bu düşüşün nedeni, üçüncül tanelerin serbest hareketlerinin %10'unun sürtünme kalan %90'ının ise yuvarlanma şeklinde gerçekleşmesidir [47].

Aşınmanın tanımlanmasında kullanılan Archard aşınma eşitliği (Eşitlik (6.1)), aşınma hacminin (w), temas yüzeyindeki yük (P) ve kayma mesafesi (s) ile doğru, aşınan yüzey sertliği (H) ile ters orantılı değiştiğini ifade etmektedir.

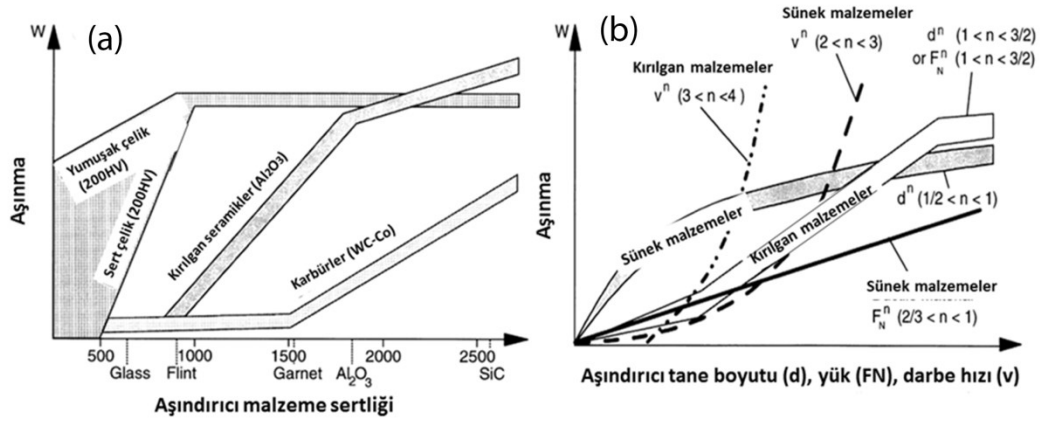
$$w = k \times \frac{Ps}{H} \quad (6.1)$$

Eşitlik 6.1'de yer alan k boyutsuz sabittir [46]. Şekil 6.1'de aşınma sabiti (k), aşınma mekanizması ve aşınma modu arasındaki ilişki gösterilmektedir. Gerçek bir tribo-sistemde birden fazla aşınma mekanizması olabildiği için k değerinde birkaç kata varan değişimler de gerçekleşebilmektedir.

Aşınma Modu	Aşınma Mekanizması	Aşınma sabiti $k = \frac{W_v \cdot H}{F_N \cdot s}$								
		10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰	
Kayma aşınması		Orta Şiddetli								
Abrasiv aşınma		3-Body 2-Body								
Erozif aşınma										

Şekil 6.1. Aşınma modu ve mekanizmasına göre aşınma sabiti (k) değişimi [47]

Şekil 6.2’de aşındırıcı ve aşınan malzeme özelliklerine göre farklı malzemelerin aşınma davranışları verilmektedir. Aşındırıcı malzemenin sertliğinin artmasıyla aşınma 1-2 kat daha artış göstermektedir. Aşınma sürecinde önemli uygulama parametreleri içerisinde, aşındırıcı tane boyutu, uygulanan yük ve erozif aşınmada çarpan parçaların hızı yer almaktadır. Kırılkan ve sünek malzemelerin aşınma hızları bu parametrelerle eksponansiyel olarak değişim göstermektedir. Alümina gibi kırılkan yapıdaki malzemelerde düşükten yüksek aşınma seviyesine geçiş, tane boyutunun, uygulanan yükün ve temas basıncının artmasıyla gerçekleşmektedir. Genel olarak küresel aşındırıcı taneler, köşeli tanelere kıyasla daha az aşınmaya neden olmaktadır. Şekil 6.2’de verilen ilişkiler genel davranışı göstermekle beraber, birden çok aşınma mekanizmasının geçerli olduğu karmaşık durumlarda bu davranışlar, değişim gösterebilir [47].



Şekil 6.2. Çeşitli malzemelerde aşınmanın (a) aşındırıcı tane sertliği ve (b) aşındırıcı tane boyutu, yük ve darbe hız ile (erozif aşınma durumunda) ilişkisi [47]

6.1. Kesici Uçlardaki Aşınma

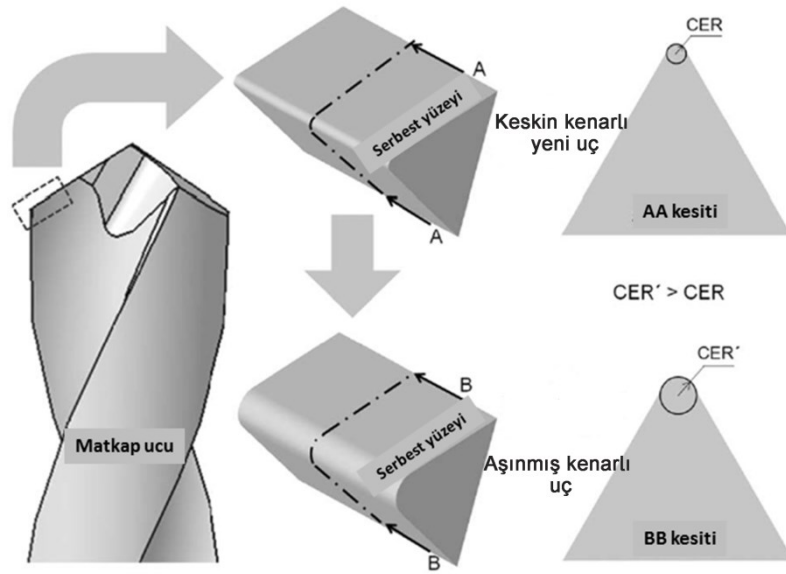
Kesme operasyonlarında kullanılan kesici malzemede görülen aşınma, uygulamaya göre çeşitlilik göstermektedir. Abrasif aşınma işlenen parçada sert tanelerin varlığında ve bu tanelerin kesme yüzeyi üzerinde oluşan yüksek basınç etkisi ile yüzeye batması şeklinde gerçekleşir. Difüzyon aşınması kesici uç malzemesinden işlenen malzemeye, ya da tam tersi yönde atomsal taşınımaya dayanan, yüksek sıcaklık ve basınç gerektiren malzeme kaybıdır. Erozif aşınma abrasif aşınmaya benzer şekilde gerçekleşir ancak aşındırıcı taneler akışkan bir ortam tarafından taşınır. Korosif aşınma ise yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen oksidasyon süreci ile ucun kimyasal yapısındaki bozunma sonucunda gerçekleşir. Kırılma (pullanma) ise, kırılğan yapıdaki kesici malzeme taneleri içerisinde oluşan, ilerleyen ve bir araya gelen mikroçatlaklar ve bunun sonucunda malzemenin kırılması şeklinde oluşur [24].

Fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin işlenmesinde en yaygın aşınma şekli, kesme kenarında meydana gelen sürekli abrasif aşınma ile kenarın yuvarlanmasıdır. Aşınmanın çoğunluğu, işlenen malzeme ile temas halinde bulunan yüzeyde (serbest yüzey) gerçekleşir ve bu aşınma “yanal (serbest) yüzey aşınması” olarak isimlendirilir. Bu aşınmanın en yüksek olduğu bölge, ucun en dış

bölümüdür. FRP kompozit malzemelerin işlenmesinde görülen diğer bir aşınma türü ise mikropullanmadır. Bu çeşit bir aşınma, kesme bölgesinde oluşan yük dalgalanmasına karşı koyabilecek kırılma tokluğuna sahip olmayan malzemelerin kesme kenarlarında yaygın biçimde görülmektedir [24].

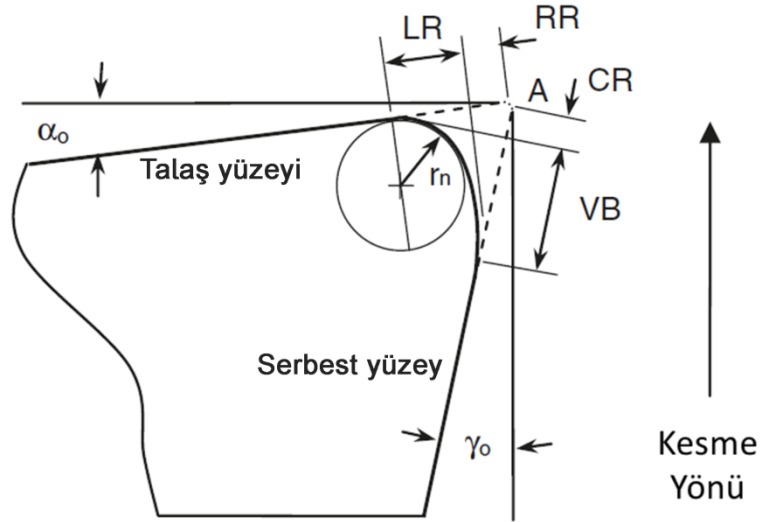
Kesme kenarında gerçekleşen aşınma miktarını ifade etmek süreç kontrolü açısından önemlidir. Aşınma, doğrudan kesici malzemenin kesme kenarından ölçülebildiği gibi, kesme kuvvetleri, kesme gücü gibi aşınma ile değişen parametrelerin ölçümü ile mümkündür. FRP kompozit malzemelerde kesici malzeme aşınması, hem kompozit malzeme ile (serbest yüzey), hem de talaş ile temas halinde bulunan (talaş yüzeyi) yüzeyde oluşur ve bu iki aşınmanın ölçülmesi optik mikroskop altında problemlili olabilmektedir [24].

Şekil 6.3'te CFRP kompozit malzemenin işlenmesi sonrasında uç kenarlarında oluşan yuvarlanma şematik olarak verilmektedir [19]. Uç aşınmasının ifade edilebilmesi serbest yüzeyde meydana gelen serbest yüzey aşınması (V_B) ile ifade edilebilse de, yalnızca bu parametrenin kullanımı aşınmanın doğru değerlendirilmesi için yetersiz kalmaktadır. Aşınmış kenarın yarıçapı (r_n), uçta gerçekleşen körelmenin ifade edilmesi için kullanılan bir gösterge olup, kesme kenarı yuvarlanması (CER) olarak isimlendirilir.



Şekil 6.3. Uç aşınmasıyla gerçekleşen kesme kenarı yuvarlanması (CER) [19]

CER, aşınmanın belirli bir noktasında kararlı kalıp değişmemektedir. Bu nedenle bu parametre ilerleyen aşınma durumlarının değerlendirilmesinde güvenilirliğini koruyamamaktadır. Şekil 6.4'te şematik olarak gösterilen serbest ve talaş yüzeylerindeki CR ve RR uzunlukları, bu gibi durumlarda aşınmanın kesin değerlendirilebilmesi için kullanılan ölçütlerdir.



Şekil 6.4. Aşınmış bir ucun kesme kenarlarının şematik gösterimi ve aşınma analizinde kullanılan kriterler [24]

6.2. WC-Co Esaslı Matkap Uçlarının Aşınma Mekanizmaları

FRP kompozit malzemelerin delme sürecinde baskın olan aşınma türü abrasif aşınmadır [48-51]. Kompozit malzemelerin işlenmesinde meydana gelen uç aşınma mekanizmaları, uç ile işlenen parça arasında oluşan ısıl-mekanik etkileşimlerin neden olduğu özellikler tarafından belirlenir. Bunlar:

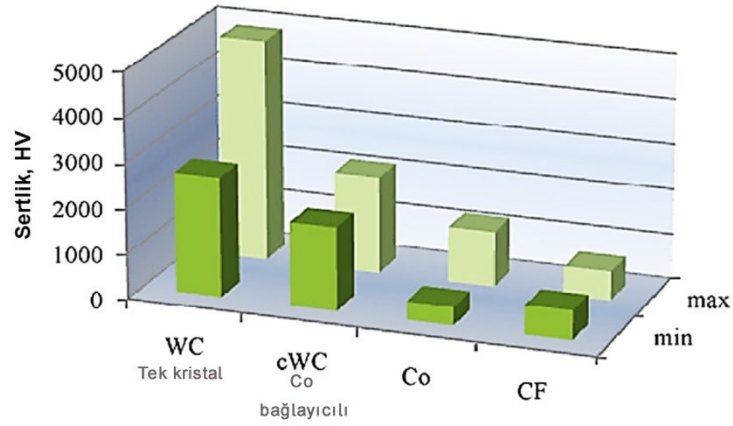
- Isıl etkiler**, CFRP malzemelerin işlenmesi sırasında kesme kenarında artan sıcaklık, bazı çalışmalarda 300°C olarak ifade edilen [34,52] kritik değeri aşmış fiber-matris ara yüzeyindeki kayma mukavemetini düşürebilir [53] ve matrisin yanıp fiberlerin sökülmesine neden olabilir. Oluşan sıcaklık artışı,

matris malzemenin yumuşamasına ve kesme kuvvetleri ve itme kuvvetinin azalmasına neden olmaktadır.

b) *Mekanik etkiler*, CFRP malzemelerin kesme süreci, metallerde görülen kayma prensibine zıt olarak kırılma esasına dayanmaktadır. Termoset matris malzemenin kırılğan yapısı fiberlerin de kırılmasına neden olup, toz şeklinde bir talaşın oluşmasına neden olmaktadır [34,54]. Bununla birlikte, malzeme yüzeyine batan matkap ucunun keski kenarı, fiberlerin kırılmasına neden olan bir diğer etkidir.

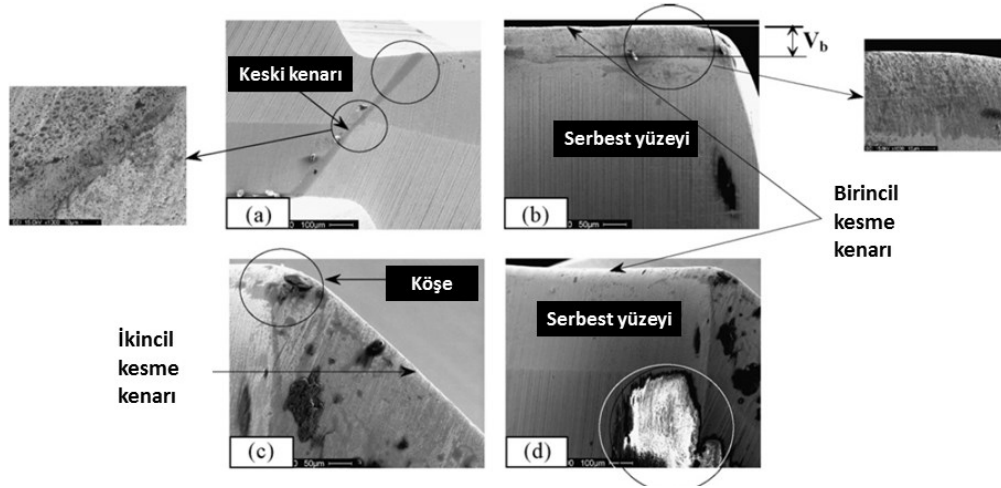
Bu iki duruma bağlı olarak WC-Co malzemelerinde uç aşınması iki şekilde gerçekleşmektedir:

- a) *Kesme kenarından kırılan WC tanelerinin neden olduğu şiddetli aşınma:*** Takviye fazının dağılımı, delme sırasında uç kenarında darbe etkisine neden olur ve oluşan bu darbeler ile WC taneleri üzerinde dinamik bir gerilme oluşur. Bu gerilmeler, WC taneleri içerisinde çatlak oluşumuna ve ilerlemesine ve en sonunda kırılmaya yol açar. Sonuçta, WC taneleri kesme kenarından kırılma ile uzaklaşmış olur [55]. Bu taneler üçlü aşınma moduna katılırlar ve ucun iki kenarı üzerinde kayma ve yuvarlanma hareketi gerçekleştirirler. Bu süreç ile ucun kenarlarında Şekil 6.5'te verilen malzeme sertlikleri farkından dolayı çizilmeler oluşur ve kırılma süreci şiddetlenir [5].
- b) *Hafif aşınma:*** Şekil 6.5'te görüldüğü gibi karbon fiberlerin WC tanelerine kıyasla düşük sertlikleri nedeniyle fiberler, WC tanelerini aşındıramazlar. Bunun yerine, daha düşük sertliğe sahip olan Co bağlayıcı fazı aşındırılır [56-58]. Bağlayıcı aşınması derinlere ulaştıkça, WC taneleri daha fazla temas yüzeyi oluşturur ve yorulma sonucunda kırılırlar. Az miktarda Co bağlayıcı fazının sistemden uzaklaşması, WC tanelerinde aşındırıcı fiberlerin neden olduğu çevrimsel yüklerle çatlak ilerlemesini hızlandırır.

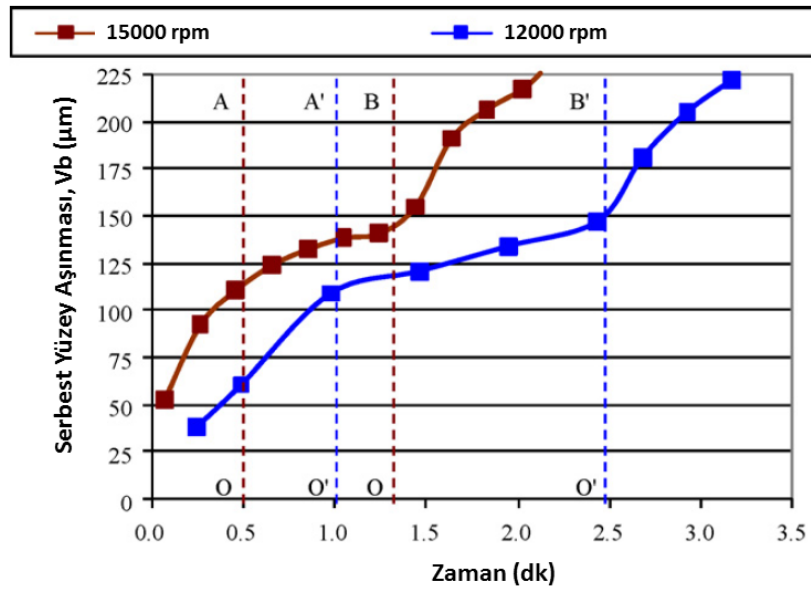


Şekil 6.5. WC tek kristal, karbür (cWC), kobalt (Co) ve karbon fiber (CF) malzemelerinin mikro sertlikleri

Rawat ve Attia [59] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, WC-Co esaslı matkap uçlarıyla iki farklı kesme hızı kullanılarak matkap uçlarında gerçekleşen aşınma durumları ve mekanizmaları incelenmişlerdir. Uçlarda farklı kesme bölgelerinde gerçekleşen aşınmalar Şekil 6.6'da, uçların kesme kenarlarında gerçekleşen aşınmanın zamanla değişimi ise 6.7'de verilmiştir. Daha önceden de ifade edildiği gibi, uç aşınması sert WC tanelerinin neden olduğu şiddetli aşınmayı takip eden, hafif aşınma şeklinde gerçekleşmektedir. Matkap ucunun keski kenarında, kesme kenarının yanıl yüzeyinde ve ikincil kesme kenarlarında abrasif aşınma görülmektedir. CFRP kompozitlerin işlenmesinde, her iki kesme kenarının yanıl yüzeyinde gerçekleşen aşınma daha şiddetli olmaktadır. Bununla birlikte, talaşın toz halinde olması ve delme sürecindeki ilerleme hareketi nedeniyle talaş yüzeyinde de belirli bir aşınma meydana gelmektedir.



Şekil 6.6. WC-Co matkap ucunun (a) keski kenarında (b) serbest yüzeyinde, (c) kesme köşesinde meydana gelen aşınmalar ve (d) serbest yüzeye yapışan karbon kalıntısı ($V=15000\text{rpm}$, $f=100\mu\text{m/dev}$) [59]

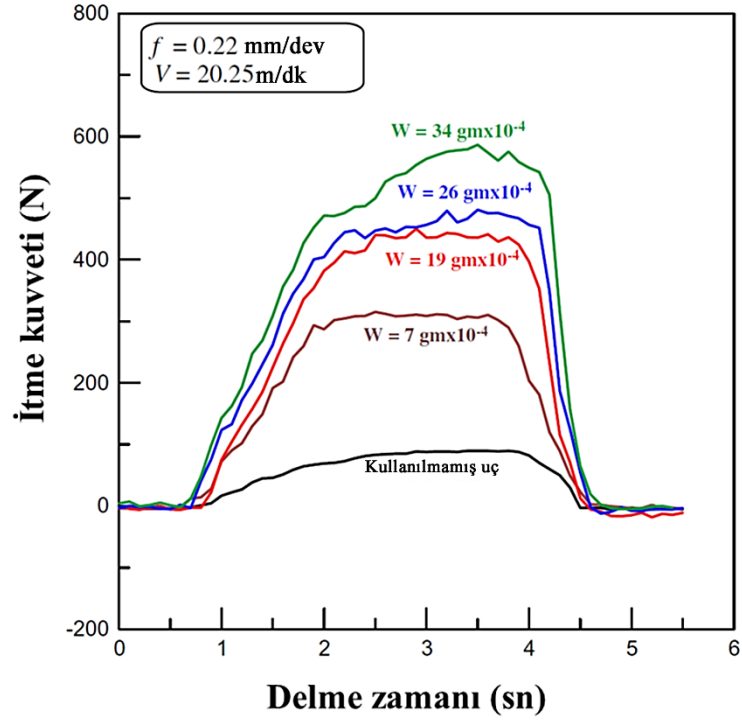


Şekil 6.7. 12000 ve 15000 hızlarında WC-Co matkap ucunun serbest yüzeyinde gerçekleşen aşınmanın zamanla değişimi [59]

Şekil 6.7'ye göre 15000 dev/dk hızında uçta WC tanelerinin pullanması ile gerçekleşen ilk aşınma bölgesi, ilk 30 sn. sonunda tamamlanmaktadır (OA bölgesi). Hızın 12000 dev/dk olması durumunda, bu süre yaklaşık 1 dk'ya (yaklaşık 200 delik) çıkmaktadır (O'A'). 15000 dev/dk için ikincil aşınma bölgesi OA ile OB arasında olup, bu aralıkta açılan delik sayısı 275, toplam kesme uzunluğu 1,62 m'dir. Hızın 12000 dev/dk değerine düşürülmesi ile açılan delik sayısı 512'ye ulaşmaktadır. 3. aşınma bölgesinde ise aşınma hızı belirgin biçimde artış göstermektedir. Uç ömrünün sonunda 15000 dev/dk hızında test edilen matkap ucu ile 544 delik açılırken, 12000 dev/dk hızda 650 delik açılmıştır [59].

15000 dev/dk hızında birincil kesme kenarında, Şekil 6.6d'de gösterilen bir karbon birikintisi bulunmaktadır. Hızın yüksek olmasıyla birlikte uçta meydana gelen aşınma, kesme bölgesindeki sıcaklığın atmasına ve matris malzemesinin yumuşamasına, fiber parçacıklarının kesme kenarına yapışmasına neden olmaktadır.

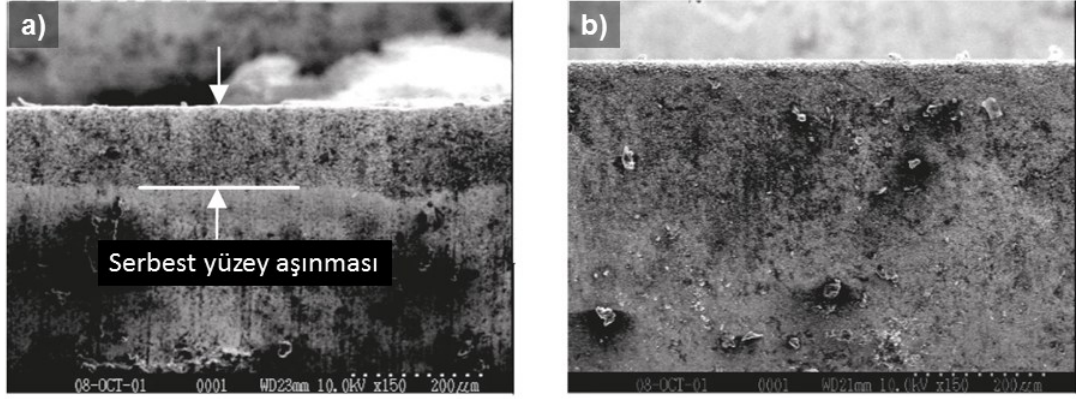
Kullanılan matkap ucunun aşınması yalnızca kesme kenarlarının doğrudan analiz edilmesi ile değil, aynı zamanda kesme sırasında oluşan kuvvetlerin ve elde edilen delik kalitelerinin değişiminden de takip edilebilmektedir. Kashaba ve ark. [23] uç aşınmasının itme kuvveti, tork, delaminasyon miktarı ve delik yüzey pürüzlülükleri üzerine etkilerini incelemiştir. Çalışmada 120° nokta açısı ve 30° burgu açısına sahip olan karbür matkap uçları sırasıyla 7, 19, 26 ve 34×10⁻⁴ g ağırlık kaybına kadar aşındırıcı silikon taneleri içeren GFRP malzemenin delinmesinde kullanılmışlardır. Şekil 6.8'de matkap ucunun kesme kenarlarında oluşturulan aşınmanın itme kuvvetine olan etkisi verilmektedir. Aşınma ile oluşan itme kuvveti artışı, delik çıkışında aniden azalmaktadır. Bu ani azalma, çıkışta delaminasyon oluşumuna neden olmaktadır. Kullanılmamış uçta ise delik giriş ve çıkışındaki kuvvet artışı düzenli olup delaminasyon miktarı en aza indirgenmektedir.



Şekil 6.8. Uç aşınmasının itme kuvveti üzerine etkisi [23]

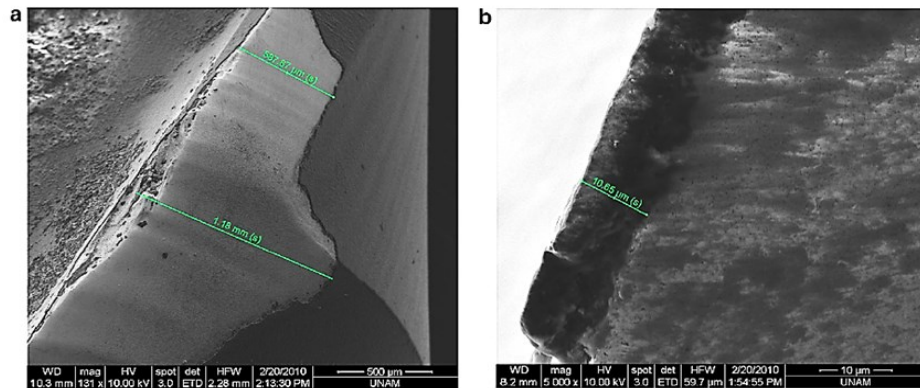
6.3. Kaplanmış Karbür Uçların Aşınma Mekanizmaları

Eğer kesme kenarında yetersiz mekanik mukavemete bağlı oluşan ani kırılma yok ise, FRP delme sürecinde kullanılan elmas kaplamalı karbür uçlarda iki aşınma mekanizması söz konusudur. Bunlar, kaplama tabakasının düzenli aşınması ve elmas film tabakasının kırılmaya bağlı olarak yüzeyden uzaklaşmasıdır. Elmas film tabakasının yüzeye tutunma mukavemeti yeterli ise aşınma, Şekil 6.9’da gösterildiği gibi düzenli şekilde gerçekleşir ve kaplanmamış karbür bir uca kıyasla yüksek kullanım ömrü elde edilir. Bu durum, elmas kaplamanın sahip olduğu yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek ısı iletkenlik özellikleri ile sağlanır. Düzenli aşınmada, kaplama tabakasındaki elmas taneleri sürekli aşınarak tabaka kalınlığı inceler ve kırılma ile birlikte hem altlık hem de kaplama hızlı bir biçimde aşınma gösterir [24].



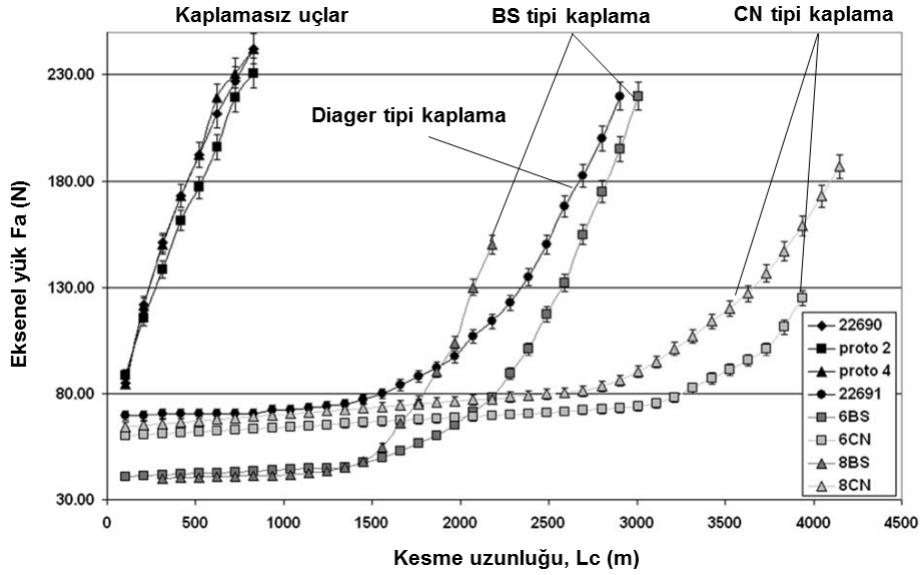
Şekil 6.9. Aynı operasyon koşullarında MDF malzemesinin delme sürecinde test edilen (a) kaplanmamış ve (b) elmas kaplı karbür matkap uçlarının kesme kenarı görüntüsü [24]

Elmas tabakasının yüzeye bağlanma mukavemeti yeterli olmadığı veya ince film üzerinde kalıntı gerilmelerin bulunduğu durumda, kesme kenarının uç bölümünde bölgesel kırılmalar başlar ve radyal çatlaklar oluşur. Yüksek basma gerilmesi altında bu çatlaklar, kaplama tabakasına nüfuz eder ve altlığa doğru ilerler. Sonunda ara yüzeye ulaşan çatlaklar, elmas kaplamanın büyük kitleler halinde delaminasyonuna neden olur. Kaplama tabakasının altlığa tutunma mukavemetinin düşük olmasından kaynaklanan kırılma durumu Şekil 6.10'da görülmektedir. Açılan 1728 adet delik sonrasında matkap ucunun serbest yüzeyinden, ikincil kesme kenarına kadar uzanan 10 µm kalınlığında olduğu görülen kaplama tabakası kırılmaktadır [32].



Şekil 6.10. (a) Elmas film tabakasının 1728 delik sonrasında kırılma durumu ve (b) tabaka kalınlığı [32]

Elmas kaplama kalitesi kaplamanın altlık ile bağlanma mukavemeti tarafından belirlenen bir unsur olup, uç ömrünü önemli ölçüde değiştirmektedir. Iliescu ve ark. [27] yapmış oldukları çalışmada, farklı geometrik özelliklerin yanı sıra, matkap uçlarının kaplama kalitelerini de uç ömürleri açısından birbirleriyle kıyaslamışlardır. Çalışmada, kaplamasız karbür uçlar ile birlikte, farklı firmalar tarafından farklı şekillerde kaplanan ve BS ve CN olarak kodlanmış aynı geometrilerdeki uçlar kıyaslanmıştır. Uçların delme süreci boyunca oluşturdukları eksenel kuvvetlerin değişimi Şekil 6.11’de verilmiştir.

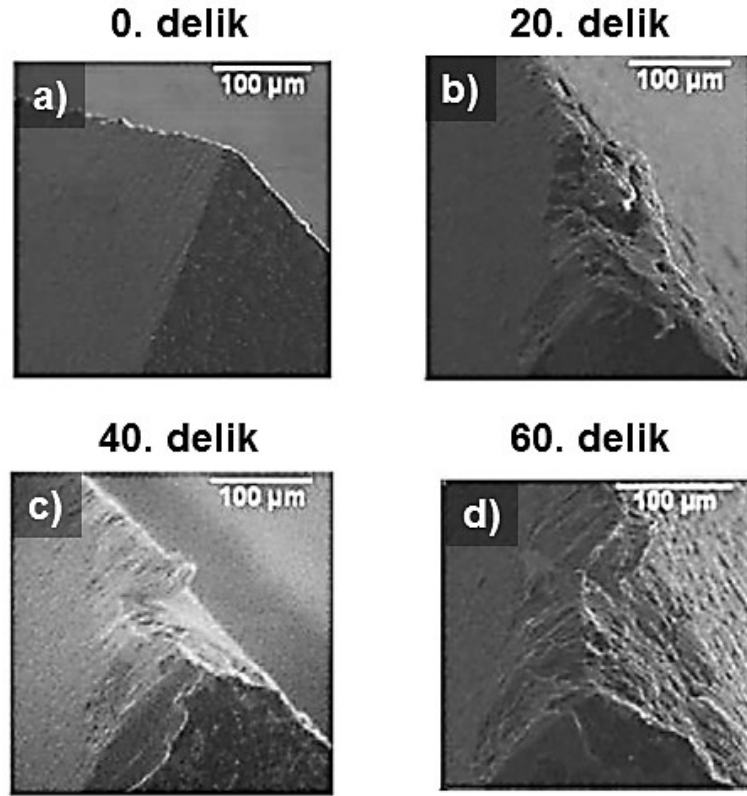


Şekil 6.11. Farklı geometrilere ve kaplamalara sahip matkap uçlarının artan kesme uzunluğu ile değişen eksenel yük değerleri [27]

Kaplamasız uçlarda, kesme operasyonunun başlangıcından itibaren aşınmaya bağlı kuvvet artışı gözlemlenirken, kaplama ile kullanım ömrünün belirgin ölçüde arttığı görülmektedir. CN ile gösterilen elmas kaplamalar 2800 m uzunluklara kadar kullanım ömrüne sahip iken, BS ile gösterilen kaplama ve referans olarak kullanılan 22691 diager tipi kaplama ise 1500 m kullanım ömrüne sahiptir [27].

6.4. Çok Kristal Elmas (PCD) Uçlardaki Aşınma

PCD uçlar kesme kenarına zayıf bir şekilde tutunan çok kristal elmas tanelerinin mikro-pullanmasını takip eden, düzgün serbest yüzey aşınması şeklinde aşınma gösterirler [60]. Kaba taneli PCD uçlar uzun kullanımlarda daha az serbest yüzey aşınması gösterdiklerinden daha fazla tercih edilmektedir. İnce PCD taneli uçlar ise mikro-pullanmaya karşı daha dirençlidirler [61,62]. PCD uçların aşınma mekanizmaları WC-Co esaslı matkap uçlarıyla benzerlik gösterir. Taneler arasında bulunan Co bağlayıcı fazının aşınması, PCD tanelerinin sistemden uzaklaşmasına neden olmaktadır. Malzemedeki homojenlik azaldıkça ve salınımlı kuvvetler arttıkça mikro-pullanma ve kırılma miktarı da artış gösterir. Şekil 6.12’de CFRP-Ti lamine kompozit plakanın delinmesinde kullanılan PCD bir ucun kesme kenarında 60. deliğe kadar oluşan kırılma görülmektedir.



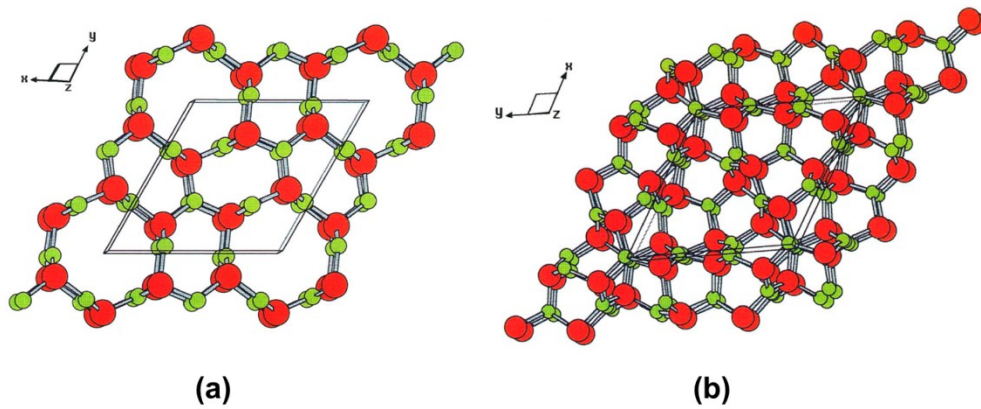
Şekil 6.12. PCD bir uçta artan delik sayısı ile şiddetlenen kırılma durumu ($V=2000$ dev/dk, $f=76,2$ µm) [63]

7. Si₃N₄/SiAlON ESASLI SERAMİKLER

7.1. Kristallografik Yapı

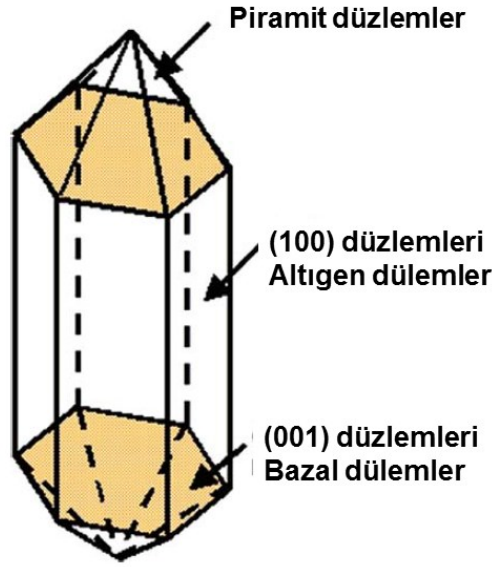
Si₃N₄ ve onun bir türevi olan SiAlON seramikleri mükemmel termomekanik özelliklerinden dolayı kesici uçlar, rulmanlar, turbo besleme sistemleri makine valfleri ve pek çok aşınma dayanımı gerektiren uygulama alanında kullanılan malzemelerdir. Bu malzemelerin kullanım alanlarının genişletilebilmesi yapısal bazı dezavantajlarının ortadan kaldırılabilmesine bağlıdır. Bu dezavantajlar içerisinde önceden tahmin edilmesi zor, kırılma yapıları ve çok yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerin kaybı bulunmaktadır [64].

Silisyum Nitrür hegzagonal yapıda iki kristallografik yapıda kararlıdır. β -Si₃N₄ yapısı fenasit (Be₂SiO₄) yapısı ile eş olup oksijen atomları azot ile, Be atomları ise Si ile yer değiştirmiştir. Bağlanma, SiN₄ tetrahedralarını oluşturup, köşelerde yer alan azot atomları tetrahedraları birbirine bağlar. Sonuç olarak β -yapısı Si ve N atomlarının oluşturduğu halka şeklindedir (Şekil 7.1a). Her halka ABAB.... sıralamasıyla üst üste dizilerek c yönünde sürekli kanallar oluşturur. α -Si₃N₄ yapısında dizilim ABCDABCD.... şeklinde olup CD tabakası AB tabakasına benzemekle birlikte c eksenini etrafında 180° döndürülmesi ile elde edilmektedir (Şekil 7.1b) [65].



Şekil 7.1. (a) β -Si₃N₄ ve (b) α -Si₃N₄ kristal yapısı. Si atomları kırmızı, N atomları ise yeşil renkte gösterilmiştir [66]

β - Si_3N_4 tanelerinin hesaplanan denge şekli, uç bölümleri piramit şeklinde biten altıgen prizmadır (Şekil 7.2.). Kristal büyümesi gaz fazında gerçekleşmektedir [67]. Kenarlar prizmatik düzlemler olarak isimlendirilirler ve bu düzlemlere paralel yönde gerçekleşen büyüme “a-ekseni boyunca” ya da “diametrik büyüme” olarak tanımlanır. Bazal düzlemler oksijence zengin tane sınırı fazı ortamında oluşurlar [68]. Bazal düzlemlere paralel gerçekleşen büyüme ise “c-ekseni boyunca” ya da “boyuna büyüme” olarak tanımlanır [69].



Şekil 7.2. Periyodik bağ zincir teorisine (PBC) göre hesaplanan β - Si_3N_4 tanelerinin şekli [67]

Periyodik bağ zincir teorisine göre hesaplanan kristal büyümesi, c-ekseni yönündeki büyümenin güçlü bir şekilde tercihli olduğunu göstermektedir [67]. Fakat bu model çok yüksek anizotropinin görüldüğü durumları ve gerçekte prizmatik ve bazal düzlemler tarafından adsorbe edilen maddeleri kapsamamaktadır. Si_3N_4 taneleri her zaman nadir toprak elementlerini içeren tane sınırı fazı tarafından çevrelendiklerinden, bu elementlerin kristal büyümesi üzerine olan etkileri halen bir soru işareti durumundadır. Ancak yapılan bazı deneysel çalışmalar sonucunda, katkı malzemesi nadir toprak elementinin iyonik çapının artmasıyla anizotropinin artış gösterdiği ifade edilmiştir [68]

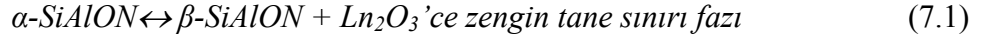
SiAlON seramikleri β -Si₃N₄ (β -SiAlON) ve α -Si₃N₄ (α -SiAlON) yapısı ile eş yapıda olup, tane sınırı fazının bir bölümünü kristal yapı içerisinde çözme avantajı ile yüksek sıcaklıklarda daha yüksek mekanik özelliklere sahip malzemelerdir. β -SiAlON yapısında Si ile Al atomları ve N ile O atomları yer değiştirmiş durumdadır ve yapı Si_{6-z}Al_zO_zN_{8-z} genel formülü ile gösterilir. Bu formüldeki z değeri 0 ile 4,2 arasında değişebilmektedir.

α -SiAlON ise α -Si₁₂N₁₆ birim hücresi ile eş yapıdadır ve Me_xSi_{12-(m+n)}Al_(m+n)O_nN_(16-n) formülü ile gösterilir. Me iyonları ile kararlı hale gelen α -SiAlON yapısında, Li, Ca, Mg, Y veya çeşitli nadir toprak elementleri bulunabilmektedir [65]. α -SiAlON faz bölgesi, iki boyutlu faz bölgesi uzantısının $Y_xSi_{3-(3x+n)}Al_{(3x+n)}O_nN_{4-n}$ ($0,08 < x < 0,17$ ve $0,13 < n < 0,31$) olan Y-Si-Al-O-N sisteminde yaygın biçimde çalışılmıştır. En düşük çözünürlük limiti 0,095 ile 0,1 nm yarıçapı olan katyonlar için $x \cong 0,08$ ve 0,20 iken 0,085 nm yarıçapı olan Yb gibi daha küçük katyonlar için $x=0,25$ 'tir [70]. α - faz bölgesi, Me iyon yarıçapının azalması ile artış göstermektedir. Bununla birlikte, Yb sistemlerinde α - faz bölgesinin en geniş olması, Yb⁺³ ve Yb⁺²'nin her ikisinin de sistemde bulunabilmesindedir [71-73].

Y-SiAlON sisteminde kompozisyonun değiştirilmesi ile çeşitli α -SiAlON: β -SiAlON oranlarında (α + β)-SiAlON kompozitlerin hazırlanması mümkün olmaktadır. α -SiAlON fazı mikroyapıda eş eksenli tane yapısında görülürken, β -SiAlON fazı boy/en oranı 4-10 arasında değişebilen uzamış taneler şeklinde görülmektedir. Yapılan çalışmalarda, Sm ve Y'nin birlikte kullanıldığı sistemlerde mikroyapı tasarımının daha kolay yapılabildiği görülmüştür [74,75]. α -SiAlON fazı kristal yapısı içerisinde tane sınırı fazının bir bölümünü çözerek toplam tane sınırı fazı miktarının azalmasını ve bu sayede malzemenin yüksek sıcaklık özelliklerinin iyileşmesini sağlar. Sonuç olarak, α -SiAlON, cam bulundurmeyen bir malzeme üretimine olanak tanıyan özelliği sayesinde yüksek sıcaklık yapısal ve diğer mühendislik uygulamalarında önemli bir malzeme durumundadır.

SiAlON kompozisyonunun az miktarda değiştirilerek α ve β -SiAlON faz oranlarının tasarlanabilmesi ile istenen özelliklere sahip Y-SiAlON seramikleri

üretilebilmektedir. Sertlik α -SiAlON faz miktar ile artarken, kırılma tokluğu değeri azalmaktadır. Yüksek α -SiAlON içeriği aynı zamanda malzemenin oksitlenme ve ısıl şok direncinin artmasını da sağlamaktadır. α -SiAlON fazı düşük sıcaklıklarda daha az kararlı olup nadir toprak elementlerince zengin bir tane sınırı fazı ve/veya iğnemsî yapıdaki β -SiAlON fazına eşitlik 7.1'de gösterildiği gibi dönüşmektedir.



Açığa çıkan yüksek miktardaki tane sınırı fazının etkisiyle malzemenin yüksek sıcaklık özellikleri olumsuz etkilenebilmektedir. Bununla birlikte, $\alpha' \leftrightarrow \beta'$ faz dönüşümü uygun bir ısıl işlem ile özelliklerin kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Isıl işlem sıcaklıklarının artmasıyla dönüşüm daha şiddetli hale gelmektedir. Sonuç olarak, herhangi bir ilave kullanmaksızın tek bir başlangıç kompozisyonundan yola çıkarak istenen değerlerde sertlik, mukavemet ve kırılma tokluğu özellikleri elde edilebilmektedir [65,73].

α -SiAlON fazının sağlamış olduğu yüksek sertlik avantajının yanında bu fazın β -SiAlON tanelerine benzer şekilde çubuksu bir yapıda üretilmeleri de mümkündür [76,77]. Çubuksu şekilde büyümüş olan α -SiAlON taneleri yüksek oranda geçici sıvı fazın varlığında elde edilebilmektedir. Çubuksu α -SiAlON tanelerinin Nd ve Sm sistemlerinde Yb ve Y sistemlerine kıyasla oluşma eğilimi daha fazladır. Bu durumun gerçekleşmesi, daha büyük katyonların kullanımında geçici sıvı faz miktarının daha fazla olmasına bağlıdır. Ca ile kararlı hale getirilmiş sistemlerde de çubuksu şekillerde α -SiAlON tanelerinin elde edildiği Wood ve ark. tarafından gösterilmiştir [78]. SiAlON kompozisyonunda Ca katyonunun aynı zamanda $\alpha' \leftrightarrow \beta'$ faz dönüşümünü engellendiği [79,80] ve tek kullanıldıklarında SiAlON yapısı içerisinde çözünemeyecek kadar büyük olan Sr ve La gibi katyonların çözünmesini sağladığı ifade edilmektedir [76,81].

7.2. Mikroyapı-Özellik İlişkisi

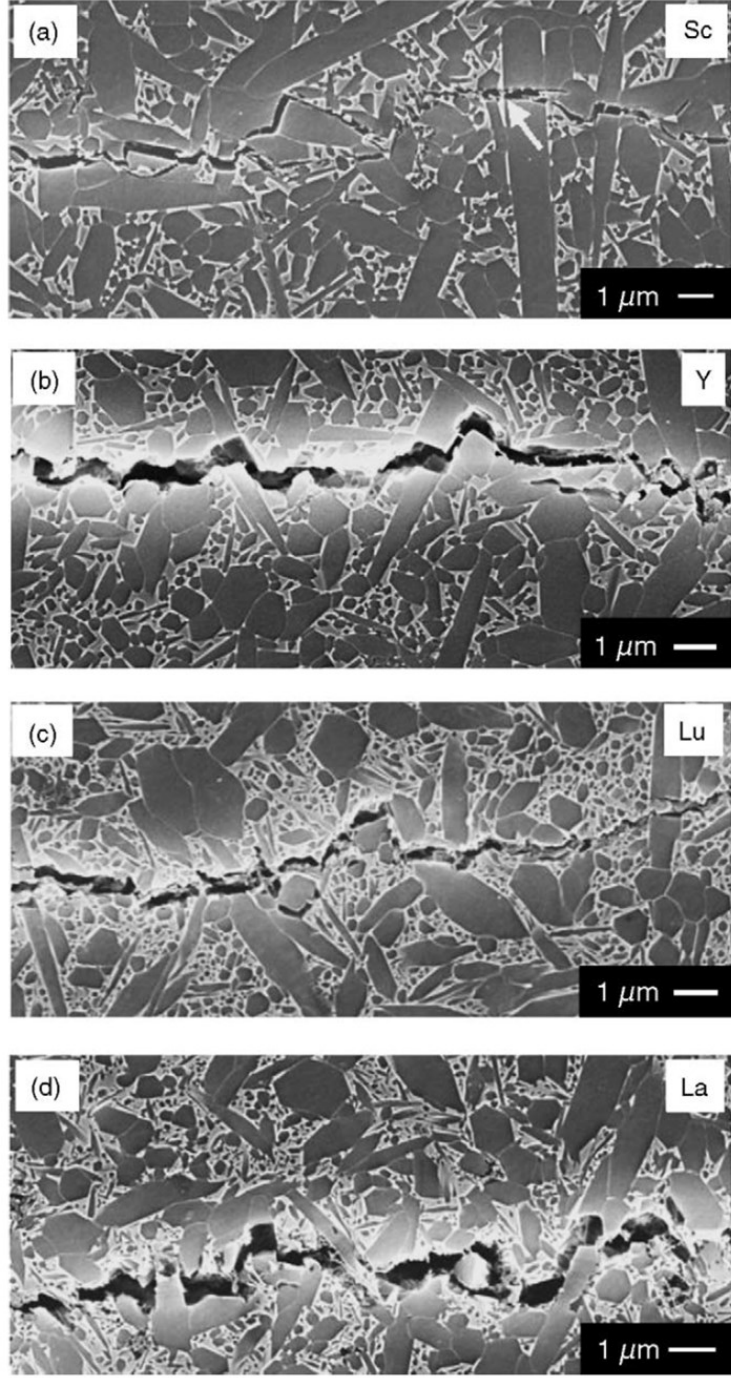
Si_3N_4 malzemelerinin mikroyapısında prizmatik $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ taneleri ile taneler arası fazı bulunmaktadır. Sinterleme ilavelerinin miktarı, tane sınırı fazının kimyasal bileşimini belirlediğinden kırılma tokluğu, mukavemet, sürünme direnci ve oksitlenme direnci gibi özellikleri de belirlemektedir [82]. Bununla birlikte $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ tanelerinin yapısı mukavemetin ve kırılma dayanımının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Beckher ve ark. [83] kırılma tokluğu değerinin ve kırılma mukavemetinin iki boyutta tane boyut dağılımı (bimodal) ile artış gösterdiğini bildirmişlerdir. Çok sayıda uzamış ve aynı boyutlarda $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ tanelerinden oluşan bir mikroyapıda kırılma dayanımının ve mukavemetin düşük olduğu bulunmuştur. Kullanılan tozların ortalama tane boyutundan daha büyük boyutlardaki $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ çekirdeklerinin kullanımıyla iki boyuta sahip bir mikroyapı elde etmek mümkün olmaktadır [83,84]. Buna alternatif olarak başlangıç Si_3N_4 tane boyutunun eşik değeri olan $0,3 \mu\text{m}$ 'nin altında tutulması bimodal tane boyut dağılımının elde edilmesini sağlamaktadır [85].

Tane morfolojisi ve tane sınırı fazı kimyasal özelliklerinin etkilerinin belirlenmesi amacıyla Klebe ve ark. [86] tarafından yapılan çalışmada β -tanelerinin aspekt oranının (boy/en) etkisi olmaksızın kırılma tokluğunun β -tanelerinin çapı ile artış gösterdiği sonucuna varılmıştır. İlave oksit kompozisyonunun Oswald irileşmesi ile gerçekleşen tane büyümesi sürecinde belirleyici olduğu bildirilmektedir. Buna ilave olarak, tane sınırı fazının kristalizasyonunun kalıntı çekme gerilmelerinin tane sınırlarına yönlendirilmesini sağladığı ve bunun sonucunda kırılma tokluğunun arttığı bulunmuştur. Çalışmada ayrıca, sinterleme ilavelerinin seçimi tane sınırı fazı yapısını ve tanelerin birbirlerinden ayrılma davranışını ve dolayısıyla kırılma direncini belirlediği ifade edilmektedir [70].

Becker ve ark. [87] gerçekleştirdikleri çalışmanın ikinci bölümünde ilave kompozisyonunun cam-tane ara yüzeyinde gerçekleşen ayrılma davranışına olan etkisini incelemiştir. Daha yüksek $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı ile daha çubuksu $\beta\text{-SiAlON}$ tanelerinin oluştuğu ve kırılma tokluğu değerinin artış gösterdiği ifade

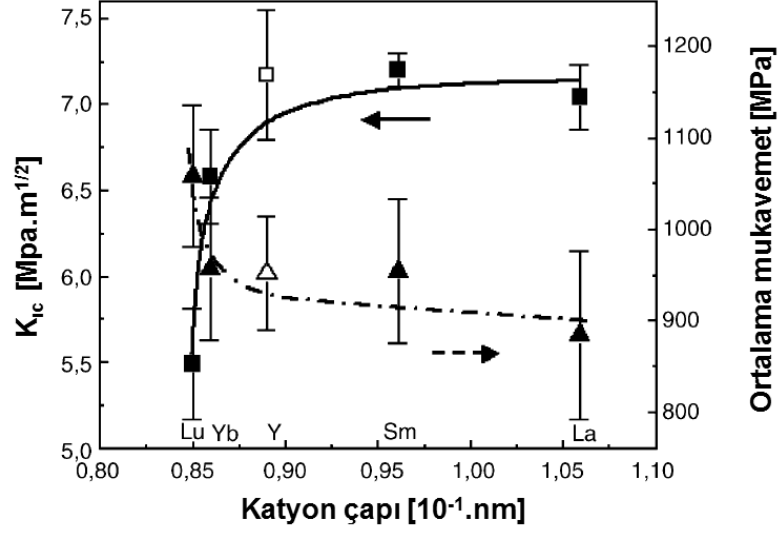
edilmektedir. Ara yüzeyin ayrılma mukavemeti β -Si_{6-z}Al_zO_zN_{8-z}'deki z değeri ile doğrudan ilişkili olup z değerinin 0'dan 0,2'ye artmasıyla hızlı bir şekilde artış göstermektedir. Al miktarındaki artış, tane sınırı fazı-tane ara yüzeyindeki kuvvetli Al-O bağlarının yoğunluğunu arttırmakta ve bu nedenle kırılma tokluğu değeri azalmaktadır. Daha yüksek z değerlerinde ise ara yüzey mukavemeti azalmakta ve kırılmaya karşı direnç azalmaktadır [87-88]. Tane sınırı fazı içerisinde bulunan nadir toprak elementinin çapının etkisini belirlemek amacıyla yapılan çalışmada daha küçük çaptaki atomların büyük çapa sahip atomlarla yer değiştirmesi ile ara yüzey ayrılma uzunluğunun artış gösterdiği bulunmuştur.

Tane sınırı fazı kimyası taneler arası bağlanma mukavemetini etkilemektedir. Bu etkinin araştırılması amacıyla Satet ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada farklı sinterleme ilaveleri kullanılarak hazırlanan seramikler, tane boyutu etkisinin ortadan kaldırılması için benzer tane boyut ve şekillerde farklı sinterleme koşullarında üretilmişlerdir [69]. Bütün malzemelerdeki tane sınırı fazı miktarı sabit tutulmuş ve sinterleme sonrasında tane sınırları amorf olacak şekilde soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin tane sınırı fazı ısıl genleşme katsayıları da Lu'dan La'a doğru ihmal edilebilir bir artış göstermektedir ((6,5'ten 7,5'e) × 10⁻⁶ K⁻¹). Bu ihmal edilebilir değişim, kalıntı gerilmelerin etkisini de en aza indirmektedir. Şekil 7.3'te Sc, Y, Lu ve La oksitleri ile katkılanmış olan SiAlON malzemelerinde Vickers ucu ile oluşturulan çatlakların ilerleme davranışları görülmektedir. Sc ve Lu katkılı numunelerin tane içi kırılma miktarının, Y ve La katkılı numunelere kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum, Sc ve Lu katkılı malzemelerin ara yüzey mukavemetinin daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



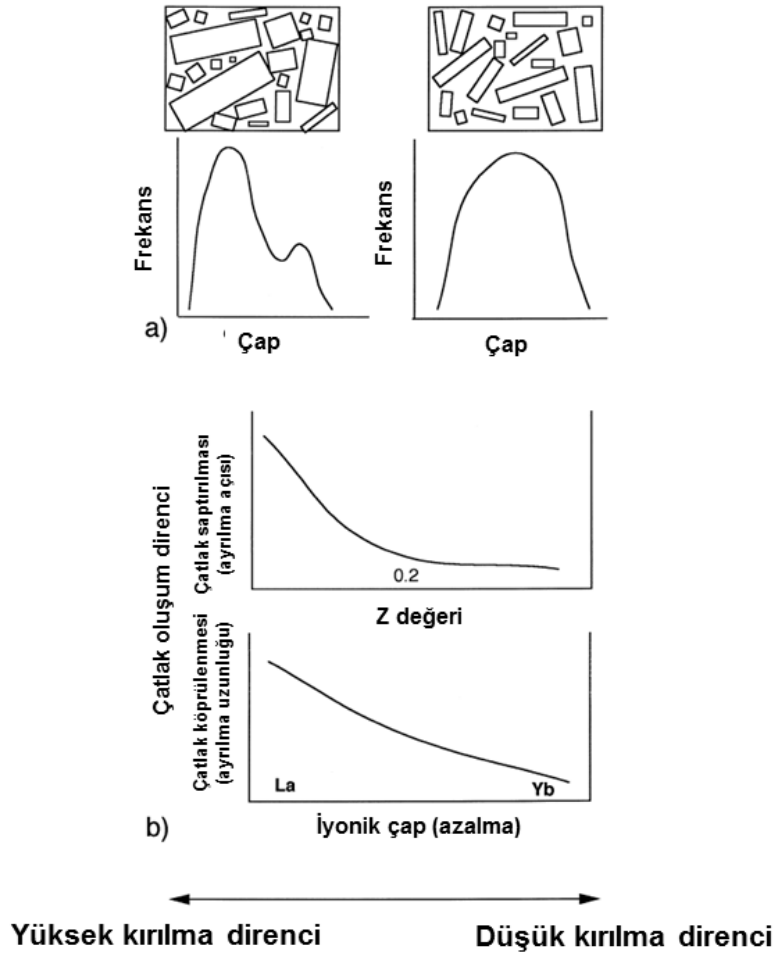
Şekil 7.3. (a) Sc_2O_3 , (b) Y_2O_3 , (c) Lu_2O_3 ve (d) La_2O_3 katkılı Si_3N_4 malzemelerinde çatlak ilerlemesi [69]

Numunelerin kırılma tokluğu ve 4 nokta eğme mukavemeti değerleri ise Şekil 7.4'te verilmektedir. Ölçülen kırılma tokluğu ve eğme mukavemeti değerleri yalnızca tane sınırı fazı içerisindeki katyon türünden etkilenmektedir.



Şekil 7.4. Si₃N₄ seramiklerinin kullanılan katyon çapına bağlı olarak değişen kırılma tokluğu ve mukavemet değerleri [69]

Elde edilen sonuçlar özetlenecek olursa, malzemenin mekanik özelliklerinin visker şeklindeki β-SiAlON tanelerinin varlığından daha fazlasıyla ilgili olduğunu göstermektedir. Bimodal tane boyut dağılımının pozitif etkisinin yanında tane sınırı fazı-tane ara yüzey özellikleri de aynı derecede öneme sahiptir (Şekil 7.5).



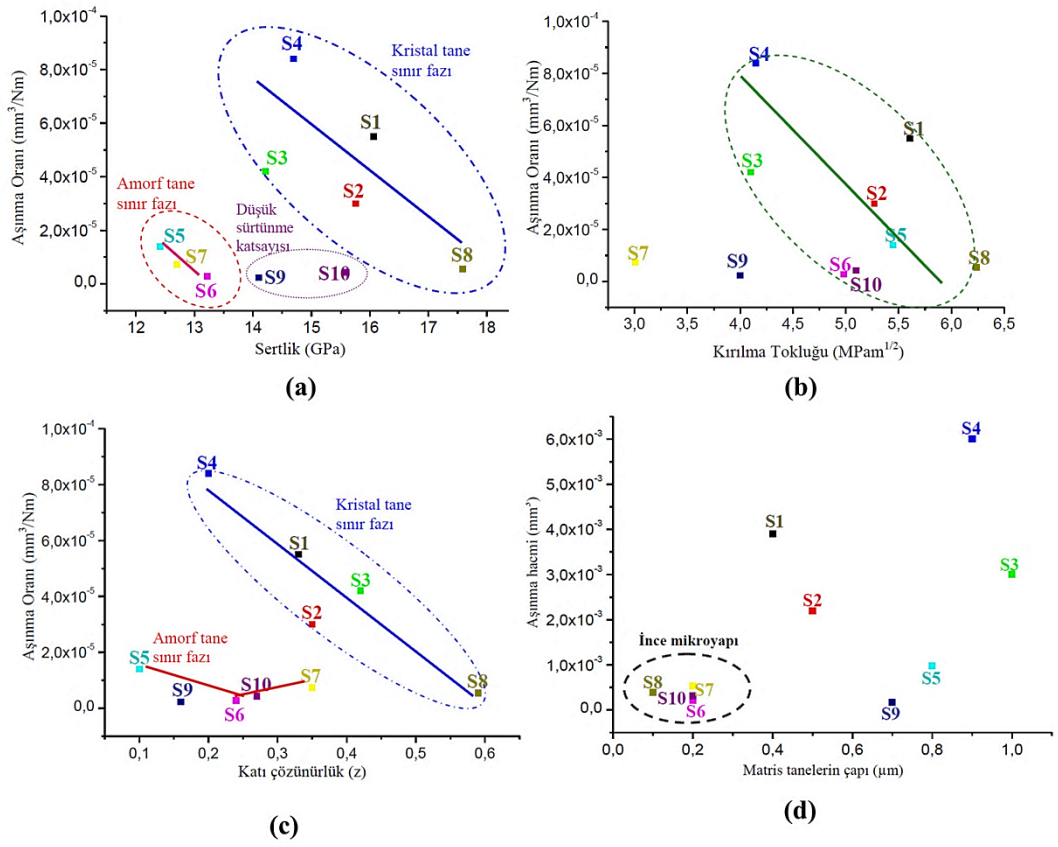
Şekil 7.5. (a) Mikroyapısal özelliklerin (b) tane sınırı fazının SiAlON malzemelerinde kırılma direnci üzerine etkileri [64]

7.3. SiAlON Seramiklerinin Aşınma Davranışları

SiAlON esaslı malzemeler metal malzemelerin talaşlı işlenmesinde torna ucu olarak yaygın biçimde kullanılmaktadırlar. Bu nedenle, bu malzemelerin aşınma davranışları genellikle farklı metal malzemelerin işlenmesi süreçlerinde ortaya konulmuştur. Gri dökme demirlerin işlenmesinde uzun yıllardır kullanılan bu malzemeler son yıllarda süperalaşımların [89,90] işlenmesinde de kullanılmaktadırlar. Malzemelerin göstermiş oldukları aşınma mekanizması ise işlenen malzemeye göre farklılık göstermektedir.

Nitrür esaslı seramikler süperalaşımların 500 m/dk hızlara kadar işlenmesinde kullanılmaktadırlar. Kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklık ucun plastik deformasyona uğramasına yol açmaktadır. Uçtaki abrasif aşınma, işlenen parça ile kesici uç kesme kenarı arasında kalan sert karbür fazlarının etkisiyle gerçekleşmektedir. Bu malzemeler yüksek sıcaklıklarda yüksek sertliğe sahip olmalarına karşın, hidrostatik koşullar oluştuğunda plastik deformasyon davranışı gösterirler. Isıl yumuşama ile işlenen malzemeye doğru uç malzemesinden atomsal taşınım hızlanır ve Cr_3Ni_2Si , Al_2O_3 ve $Ni_{31}Si_{12}$ gibi karmaşık yapıda bileşikler oluşmaktadır. Çok sert özellikte olan bu malzemeler ucun abrasif aşınmasını hızlandırmaktadırlar [91].

CFRP kompozitlerin işlenmesi metalik malzemelerin işlenmesinden oldukça farklıdır. Metal malzemelerde kayma esasına dayanan bir malzeme uzaklaştırma süreci geçerli iken, CFRP malzemelerde kırılma esasına dayalı bir talaş oluşum süreci söz konusu olup kesme bölgesi sıcaklığı $300^{\circ}C$ 'yi geçmemektedir [34,52]. Bu nedenle, SiAlON malzemelerinin $300^{\circ}C$ 'nin altında göstermiş oldukları aşınma davranışları, CFRP işleme süreci koşullarındaki davranışlarının tahmin edilebilmesi için önem taşımaktadır. SiAlON seramiklerinin mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin tribolojik davranışlarına etkileri Kumar ve ark. tarafından incelenmiştir [92]. Farklı mikroyapısal ve mekanik özelliklere sahip olan 8 farklı SiAlON malzemesinin aşınma testleri (ball on disk) sonucunda, Şekil 7.6'da verilen aşınma hızı-sertlik, kırılma tokluğu ve z değeri ilişkileri elde edilmiştir. Sonuçlar, tane sınırı fazının kristal ya da amorf halde bulunmasının aşınma dayanımı üzerinde etkili olduğunu, kristal tane sınırı fazına sahip malzemelerde sertlik, kırılma tokluğu ve z değerinin artmasının aşınma dayanımını önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir (Şekil 7.3a, b ve c). Çalışmada ayrıca, ince mikroyapıya sahip olan malzemelerin aşınma oranlarının daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 7d) [92,93].



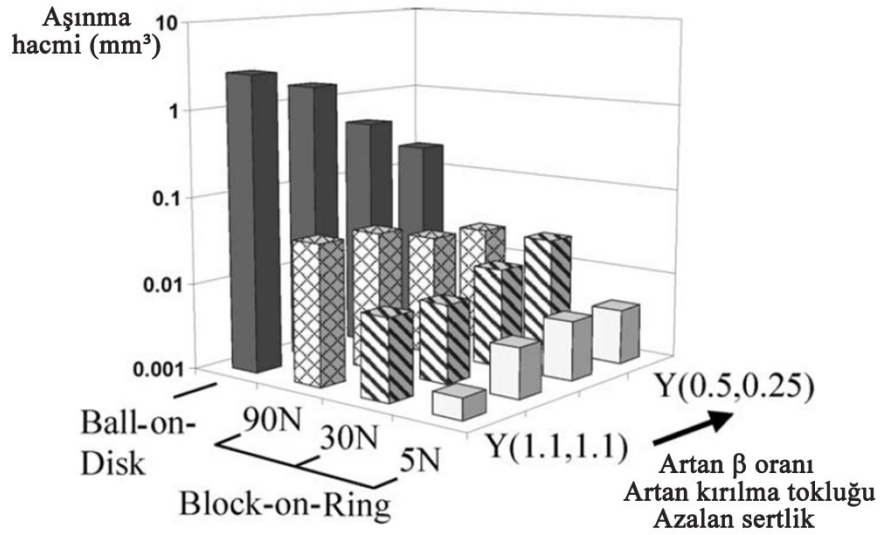
Şekil 7.6. SiAlON seramiklerinde aşınmanın (a) malzeme sertliği, (b) kırılma tokluğu, (c) z değeri ve (d) matris tanelerinin çapı ile olan ilişkisi [92]

Jones ve ark. özellikleri Çizelge 7.1’de verilen α ve α/β -SiAlON kompozit malzemelerinin aşınma davranışlarını iki farklı yöntemde test etmişler ve malzeme özellikleri ile aşınma davranışı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır [94].

Çizelge 7.1. Aşınma testleri gerçekleştirilen SiAlON seramiklerinin özellikleri [94]

Numune	m	n	β -oranı (%)
1	1,1	1,1	0
2	1,0	0,5	3
3	0,70	0,35	25
4	0,50	0,25	49

Test sonuçları, düşük yükler uygulandığında malzemede aşınmanın sertlik, yüksek yüklerde ise kırılma direnci tarafından belirlendiğini göstermektedir (Şekil 7.7). Ball on disk testlerinde ise çevrimsel yüklerin malzemeyi oluşturan tanelerin içerisinde oluşan mikroçatlakların oluşumuna neden olduğu ve malzemenin bu çatlakların ilerlemesi sonrasında pullanma şeklinde uzaklaştığı ifade edilmiştir. Bu nedenle mikroçatlak oluşumuna direnci yüksek olan, yüksek tokluğa sahip malzemelerde aşınma daha az gerçekleşmektedir [94].



Şekil 7.7. Farklı aşınma yöntemlerinde test edilmiş SiAlON malzemelerinin aşınma davranışlarının mekanik özellikleri ile ilişkisi [94]

7.4. Uygulama Alanları

Si_3N_4 esaslı malzemelerin kullanımında iki önemli özellik ön plandadır. Bunlardan ilki ısıl şok dayanımı ve yüksek refrakter özelliği, diğeri ise yüksek kırılma tokluğu, mukavemeti ve aşınma dirençleri gibi spesifik özellikleridir [65].

1950'li yıllarda Si_3N_4 , SiC refrakter malzemelerin bağlayıcı bileşeni olarak dolaylı bir kullanım görse de, 1960'lardan sonra gaz türbinlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek sıcaklık sertliği, sürünme, ısıl şok ve oksitlenme direnci

gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Şekil 7.5'te farklı uygulamalarda kullanılmak üzere üretilen Si_3N_4 esaslı malzemeler görülmektedir.



Şekil 7.5. Farklı uygulamalar için üretilen Si_3N_4 esaslı malzemeler [65]

1970'lerde metallerin yüksek hızlarda işlenebilme ihtimali gündeme geldikten sonra, 1980'lerde $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiAlON}$ esaslı kesici uç malzemeleri bu alanda ticarileştirilmiştir. Bu malzemelerle dökme demirler, sert çelikler ve süperalaşım, WC-Co esaslı malzemelere kıyasla 5 kata kadar yüksek hızlarda işlenebilmektedirler. En önemli kullanım alanları, otomotiv sektöründe dökme demirlerin ve havacılık sektöründe süperalaşımın işlenmesidir. Bu malzemelerin Al_2O_3 esaslı malzemelere kıyasla en önemli avantajları yüksek kırılma toklukları ve hızlı sıcaklık değişimlerinde sağlamlıklarını korumalarıdır [65].

8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

SiAlON seramiklerinin CFRP kompozit malzemelerin delme süreçlerindeki performanslarının belirlenmesi hedeflenen bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalar,

- SiAlON malzemelerinin üretimi,
- Karakterizasyon çalışmaları,
- SiAlON seramiklerinin çatlak iyileşme davranışlarının belirlenmesi,
- SiAlON matkap uçları için geometri belirleme çalışmaları,
- SiAlON matkap uçlarının CFRP malzemelerin delme sürecindeki performanslarının belirlenmesi
- WC/(Ta+W) kaplamalı SiAlON matkap uçlarının performanslarının belirlenmesi şeklindedir.

8.1. SiAlON Malzemelerinin Üretimi

8.1.1. Hammaddeler ve kompozisyonlar

Kesme sırasında oluşan çevrimsel kuvvetlere bağlı olarak matkap uçlarının ani bir şekilde kırılmalarının engellenmesi, SiAlON malzemelerin hatasız bir şekilde üretimine bağlıdır. Bu durum, üretim sürecinde yüksek kaliteye sahip mikronaltı tane boyutlarında ve yüksek saflıklarda Si_3N_4 ve ilave oksit tozların (Y_2O_3 , Yb_2O_3 vb.) kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Çizelge 8.1'de SiAlON matkap uçlarının üretiminde kullanılan tozların özellikleri verilmektedir.

Çizelge 8.1. SiAlON matkap ucu üretiminde kullanılan tozlar ve özellikleri

Malzeme	Kaynak	İçerdiği safsızlıklar	İçerdiği fazlar
Si_3N_4	UBE-Japonya	Ağırlıkça % 1,4 O	%95 α - Si_3N_4 %5 β - Si_3N_4
AlN	Tokuyama-Japonya	Ağırlıkça %1,6 O	%100 AlN
Al_2O_3	Sumitomo-Japonya	% 0,01 Fe_2O_3 , % 0,06 SiO_2 , % 0,04 Na_2O , % 0,05 MgO	% 99,8 Al_2O_3
Yb_2O_3	Shin-Etsu-Japonya	Ağırlıkça 99,9 % saf	%100 Yb_2O_3
Sm_2O_3	Aldrich-Almanya	Ağırlıkça 99,9 % saf	% 100 CeO_2
SiC (UF 15)	H.C. Starck- Almanya	---	α -SiC

Çalışmada, matkap ucu üretimi için %25 α ve %75 β -SiAlON fazlarını içeren ve $z= 0,2$ (Si_3N_4 içerisindeki Al_2O_3 çözünürlüğü) olan 25A ve %50 α ve %50 β -SiAlON fazlarını içeren ve $z= 1,2$ olan MDA1 α/β -SiAlON kompozit malzemeler tasarlanmıştır. Sinterlemede sıvı faz oluşturma görevinin yanı sıra, α -SiAlON fazının kararlılığının korunmasında önemli rol üstlenen Y_2O_3 , Yb_2O_3 , Sm_2O_3 ve CaO bileşenleri SiAlON kompozisyonunu oluşturmaktadır. Bu iki kompozisyona ilave olarak, 25A malzemesinin ağırlıkça %17,5 oranında SiC partikül takviyesi yapılarak elde edilen 25A-SiC kompozisyonu, SiC ilave fazının malzeme özellikleri ve süreç üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla tasarlanmıştır. Çizelge 8.2’de tasarlanan SiAlON kompozisyonlarının özellikleri verilmektedir.

Çizelge 8.2. SiAlON kompozisyonlarının özellikleri

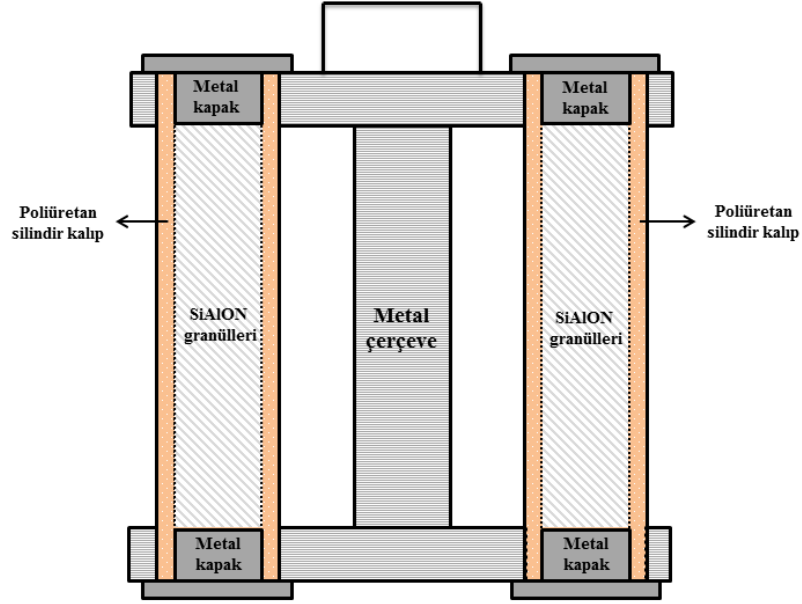
	25A	25A-SiC	MDA1
$\alpha:\beta$	25:75	25:75	50:50
z değeri	0,2	0,2	1,2
İlave oksit sistemi	Y ₂ O ₃ -Sm ₂ O ₃ -CaO	Y ₂ O ₃ -Sm ₂ O ₃ -CaO	Yb ₂ O ₃ -Sm ₂ O ₃ -CaO
İlave oksit miktarı (ağırlıkça%)	4,5	3,7	5

8.1.2. Öğütme ve granülleştirme

Ana bileşen Si₃N₄ ve diğer oksit bileşenlerden oluşan SiAlON yığına, boyut küçültme ile sinterleme etkinliğinin artırılması ve homojenliğin sağlanması amacıyla, öğütme işlemi uygulanmıştır. Öğütmede, SiAlON yığını atritör değirmen haznesine öğütücü Si₃N₄ bilyeler ve su ile birlikte yüklenmiştir. İşlem sonrasında yığın, çamur halinde iken toplam katı ağırlığının yaklaşık %6'sını oluşturan proses ilaveleri ile karıştırılmıştır. Çamur içerisindeki proses ilavelerinin dağılımı %2 akrilik emülsiyon bağlayıcı, %2 polietilen glikol (PEG) plastikleştirici ve %2 yağlayıcı şeklindedir. Karışım, giriş sıcaklığı 250°C ve çıkış sıcaklığı 130°C olan püskürtmeli kurutucuya (LTC-2 Nubilosa) beslenerek ortalama tane boyutu 100 µm ve nem içeriği %1'in altında olan granüllere dönüştürülmüştür.

8.1.3. Şekillendirme

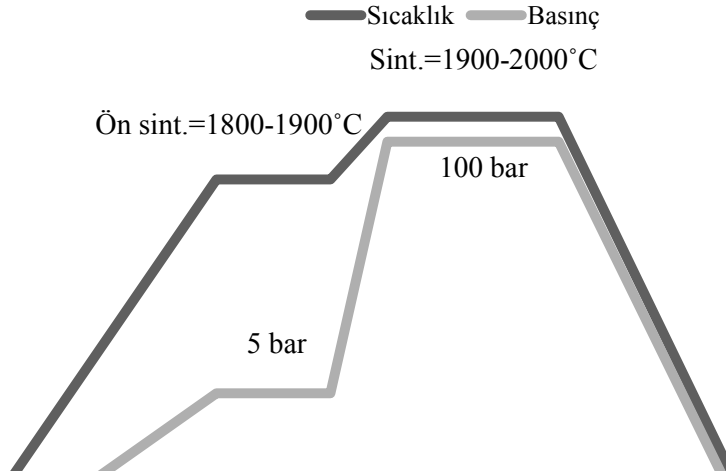
SiAlON granülleri, bu aşamada matkap ucu formunun kazandırılmasındaki ilk şekillendirme süreci olan soğuk izostatik presleme cihazında (MSE-CIP 200) silindir çubuklar şeklinde preslenmişlerdir. Presleme işleminde, Şekil 8.1'de şematik olarak gösterilen kalıp düzeneği kullanılmış, SiAlON granülleri elastik özellikteki poliüretan kalıp içerisinde, 200 MPa basınç uygulanarak şekillendirilmiştir.



Şekil 8.1. SiAlON granüllerinin izostatik preslenmesinde kullanılan kalıp düzeneğinin şematik gösterimi

8.1.4. Sinterleme

Çubuklar, 650°C'de hava ortamında 1 saat süre ile gerçekleştirilen bağlayıcı giderme işlemini takiben, gaz basınçlı sinterleme fırınında (FCT-FPW180/2200) sinterlenmiştir. Bu sinterleme tekniği, yüksek yoğunlukta malzeme elde edilmesine olanak tanımaktadır. Numunelerin sinterlenmesinde, maksimum 100 bar azot gazı basıncı ve 1940°C sıcaklık uygulanmıştır (Şekil 8.2).



Şekil 8.2. SiAlON malzemelerin gaz basınçlı sinterleme çevrimi

8.1.5. Yüzey taşlama ve matkap ucu geometrileri

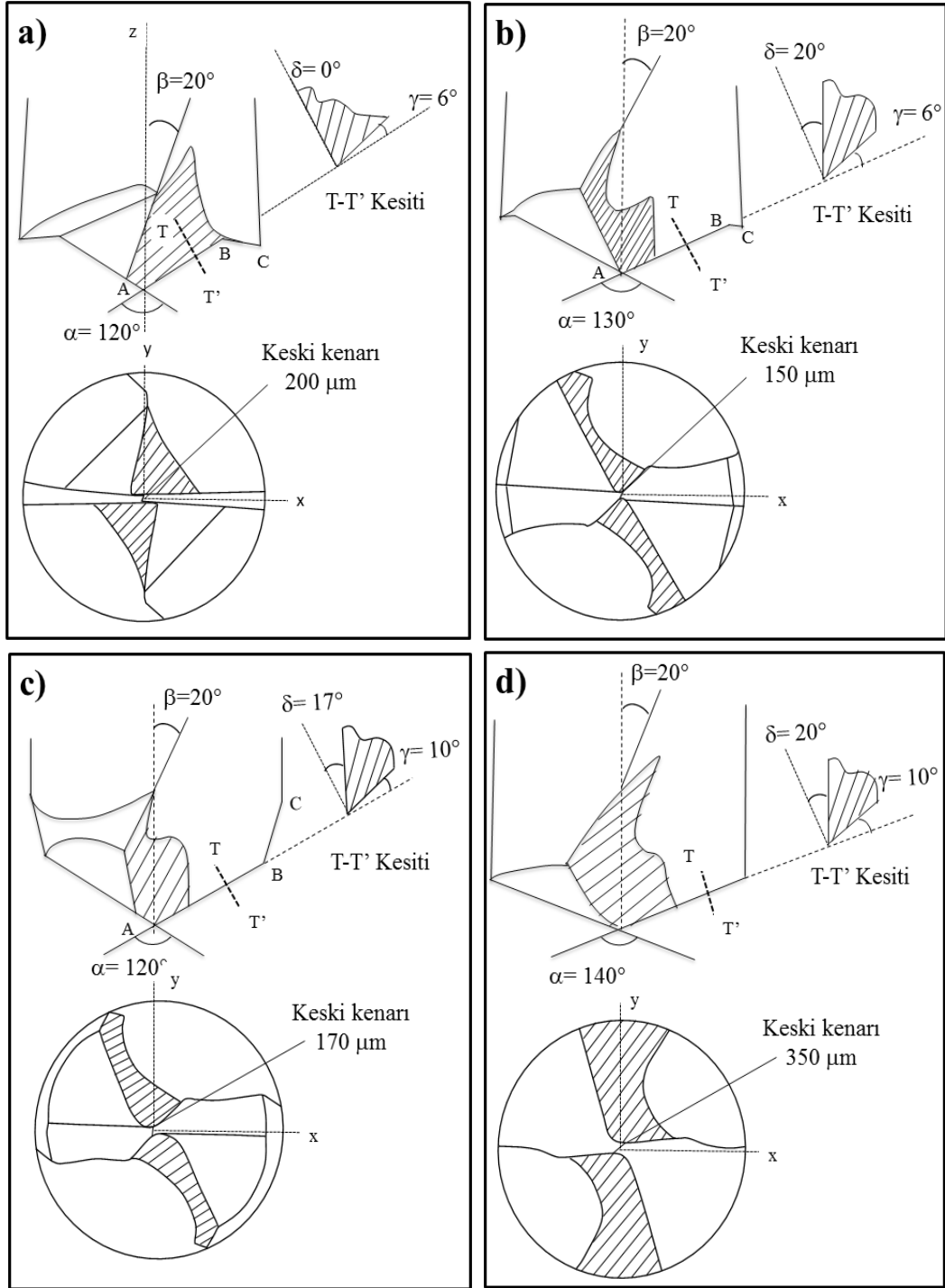
Çubuk şeklinde sinterlenen SiAlON malzemeler, Karcan Kesici Takım Ltd. firmasının CNC taşlama cihazında (Walter Mini Power), reçine bağlı elmas taşlarla (Wendt- D-46 Grid), 4 farklı geometride taşlanmıştır. İşlem sonrasında elde edilen SiAlON matkap uçlarının görüntüleri Şekil 8.3'te verilmektedir.



Şekil 8.3. Taşlama sonrasında SiAlON matkap uçlarının görüntüleri

Şekil 8.4a'da detayları verilen matkap ucu geometrisi, seramik malzemeler için yüksek hızlarda CFRP kompozit malzemelerin delinmesi amacıyla geliştirilmiştir [95]. Bu geometrik yapının kullanım koşulları için, 600-1000 m/dk kesme ve 0,05-0,20 mm/dev ilerleme hızlarının uygun olduğu ifade edilmekte ve bu koşullarda kesme kenarlarının sahip olduğu geometrik detaylar sayesinde yüksek üretim hızlarında yüksek kalitede deliklerin elde edilebileceği öne sürülmektedir [95].

Şekil 8.4b ve c'de detayları verilen G-2 ve G-3 geometrileri ise CFRP kompozit malzemelerin delinmesinde kullanılmakta olan Sandvik Coromant firmasına ait ticari uçlardır [96]. G-2, kesme kenarlarında sahip olduğu geometrik detaylar açısından G-1'e benzemekle birlikte, yüksek talaş ve serbest açıları ile daha keskin bir kenara sahiptir. Bu geometri, delme sırasında meydana gelen hatalardan bir tanesi olan fiber sökülmesinin engellenmesi amacıyla geliştirilmiştir. G-3 geometrik yapısı ise, CFRP kompozitlerin delinmesinde temel ölçüt olan delaminasyonun en aza indirgenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Bu nedenle, kesme kenarının en dış bölümü taşlanarak nokta açısı 120°'den 30°'ye düşürülmüştür [96]. G-4 geometrisi, kesici ağızların içe doğru yay şeklinde değiştirildiği standart ticari bir matkap ucu formudur (Şekil 8.4d).



Şekil 8.4. (a) G-1 [95], (b) G-2 [96], (c) G-3 [96] ve (d) G-4 geometrilerinde üretilen SiAlON matkap uçlarının geometrik detayları (β : burgu açısı, δ : talaş açısı, γ : serbest yüzey açısı)

8.2. Malzeme Karakterizasyon Çalışmaları

8.2.1. Yoğunluk ölçümü

Sinterleme sonrasında malzemelerin yoğunlukları Arşimet prensibine göre ölçülmüştür [97]. Numuneler su içerisinde yaklaşık 2 saat süre ile kaynatılarak, yüzeyde bulunan açık porozitenin içerisine su dolması sağlanmakta ve bu durumda ölçülen numune ağırlıkları, yaş ağırlık (W_3) olarak kaydedilmektedir. Yaş ağırlıklarının yanı sıra, numunelerin su içerisinde asılı vaziyetteki ağırlıkları (W_2) ve kuru durumdaki ağırlıkları (W_1) Eşitlik (8.1) ve (8.2)'de kullanılarak sırasıyla yığınsal yoğunluk ve % açık porozite değerlerine ulaşılmıştır.

$$\text{Yığınsal yoğunluk } \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{W_1}{(W_3 - W_2)} \times \rho_{su} \quad (8.1)$$

$$\text{Açık porozite } (\%) = \frac{(W_3 - W_1)}{(W_3 - W_2)} \times 100 \quad (8.2)$$

8.2.2. Mikroyapı analizi

Mikroyapı analizleri için malzemelerden temsili numuneler kesilmiş ve yüzeylerinin parlatılması amacıyla kalıba alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesilen numuneler sıcak kalıplama cihazı ile (Struers-LaboPress 3) bakalit kalıp içerisine, 180°C sıcaklık ve 20 kN yük uygulanarak alınmıştır. Kalıplama işleminden sonra numunelerin yüzeyleri otomatik parlatma cihazında (Struers-TegraPol 25) sırasıyla, 9, 6, 3 ve 1 µm elmas partikülleri içeren solüsyonlar ve bu solüsyonlara uygun parlatma diskleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SiAlON numuneler elektronik iletkenliğe sahip olmadıkları için, elektron mikroskobu analizlerinde yüzeylerinin iletken özellik kazandırılması gerekmektedir. Bu amaçla, parlatma işlemi sonrasında numune yüzeyleri altın-paladyum alaşımı ile vakum altında kaplanmıştır. Mikroyapısal analizler (Zeiss Supra 50VP) FEG-taramalı elektron

mikroskobu ve bu mikroskoba bağılı geri yansıya elektron detektörü, kimyasal analizler ise enerji saçılımlı X-ışınları (EDX) detektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

8.2.3. Faz analizi

Numunelerin içerdikleri fazlar Rigaku Rint 2200 marka, hedef metali bakır olan bir X-ışını tüpünden üretilen ($\lambda_{\text{CuK}\alpha}=1,54$ nm) X-ışınları ile ($2\theta = 20-40^\circ$) taranarak bulunmuştur. İşlem sonunda elde edilen X-ışını spektrumundan, α -SiAlON için (102) ve (210) düzlemlerinden, β -SiAlON için ise (101) ve (210) düzlemlerinden yansıyan X-ışınlarının şiddet değerleri, Eşitlik 8.3'te kullanılarak β -SiAlON oranı hesaplanmıştır.

$$\frac{I_\beta}{I_\beta + I_\alpha} = \frac{1}{1 + K [(1/w_\beta) - 1]} \quad (8.3)$$

Eşitlikte I_β ve I_α sırasıyla β ve α -SiAlON için X-ışını şiddet değerleri, K oran sabiti ((101) β -SiAlON ve (102) α -SiAlON düzlemlerinden yansıyan şiddetler için 0,518; (210) β -SiAlON ve (210) α -SiAlON düzlemlerinden yansıyan şiddetler için 0,544), w_β ise β -SiAlON için hacimsel yüzdendir.

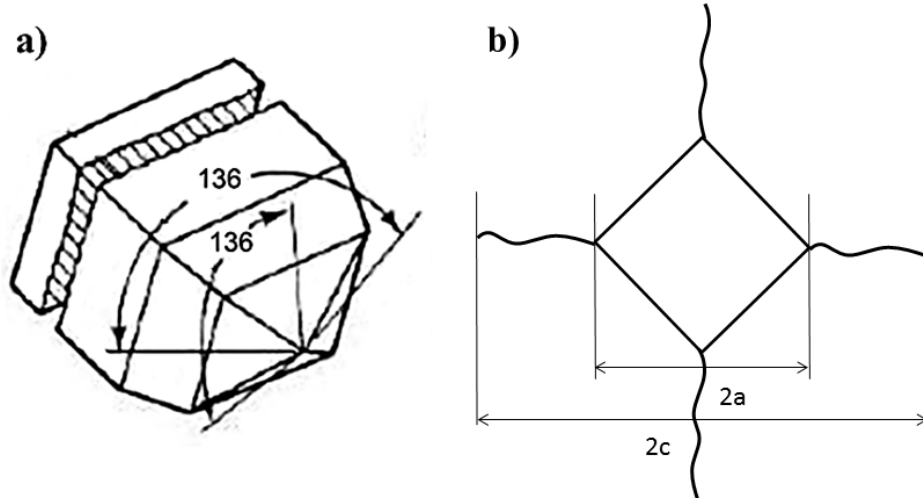
β -SiAlON, β -Si_{6-z}Al_zO_zN_{8-z} formülü ile ifade edilmekte ve bu formülde z Si₃N₄ yapısı içerisinde çözünen Al₂O₃ miktarını göstermektedir. Malzeme özellikleri üzerinde önemli etkisi olan z değeri X-ışınları spektrumundan, α ve β -Si₃N₄ birim hücre kafes parametreleri (a ve c) ve dolayısıyla pik konumlarının Al₂O₃ çözünürlüğüne bağılı olarak değişiminden Eşitlik 8.4 ve 8.5 kullanılarak hesaplanmış ve bu iki değerlerin ortalaması alınarak bulunmuştur.

$$z_a = \frac{a - 7,6044}{0,031} \quad (8.4)$$

$$z_c = \frac{c - 2,9075}{0,026} \quad (8.5)$$

8.2.4. Mekanik testler

Malzeme sertlikleri Vickers mikro-sertlik ölçme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 8.5a'da şematik olarak gösterilen ve tepe açısı 136° olan kare piramit şeklindeki mikro elmas uç, yüzeyi parlatılmış olan numuneye 10 kg yük ve 10 sn. süre ile uygulanmıştır. Numune yüzeyinde oluşan izin (Şekil 8.5b) ölçülerinden numune sertlikleri hesaplanmıştır (Eşitlik 8.6).



Şekil 8.5. (a) Tepe açısı 136° olan kare piramit şeklindeki elmas Vickers ucu ve (b) numune yüzeyinde oluşturduğu iz

$$HV10 = \frac{2F \times \sin \frac{136}{2}}{(2a)^2} \rightarrow HV10 = 1,854 \frac{F}{(2a)^2} \quad (8.6)$$

Formülde F , uygulanan kuvveti (N), $2a$ ise oluşan izin ortalama köşegen uzunluğunu (μm) ifade etmektedir. Kırılma tokluğu değeri ise indentasyon sonucunda oluşan çatlakların uzunluklarının ölçülüp Charles & Evans [98] tarafından geliştirilen Eşitlik (8.7)'de kullanılması ile hesaplanmıştır.

$$K_{1c} = \frac{0,15 \times k \times \left(\frac{c}{a}\right)^{-3/2} \times HV10 \times \sqrt{a}}{\Phi} \quad (8.7)$$

Eşitlikte Φ ve k düzeltme faktörleri (sırasıyla 3 ve 3,2), c çatlakların ortalama uzunlukları, a oluşan izin köşegen uzunluğunun yarısı, HV10 ise sertlik değeridir.

Uygulanan yük ile numune yüzeyinde oluşan iz ve çatlak ölçülerinde yüksek hassasiyet sağlanabilmesi amacıyla ölçümler, SEM görüntüleri kullanılarak Image J programında gerçekleştirilmiştir.

8.3. SiAlON Seramiklerinin Çatlak İyileşme Davranışlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada, SiAlON matkap ucu üretiminde kullanılan 25A ve 25A-SiC kompozisyonları kullanılmıştır. 25A ve 25A-SiC granülleri mukavemet ölçümleri için taşlama sonrası nihai boyutları 4×3×50 mm olan çubuklar şeklinde, aksel preste 220 MPa basınç uygulanarak şekillendirilmişlerdir. 650°C sıcaklıkta ve hava ortamında gerçekleştirilen bağlayıcı giderme işlemi sonrasında malzemeler, yaklaşık 1940°C maksimum sinterleme sıcaklıklarında gaz basınçlı sinterleme fırınında sinterlenmişlerdir. Elde edilen çubuk şeklindeki numuneler, her bir yüzeyden 500 µm talaş alınarak numune eksenine dik yönde taşlanmışlardır. Taşlama işleminde kullanılan aşındırıcı özellikleri ve taşlama parametreleri Çizelge 8.3'te verilmektedir.

Çizelge 8.3. Taşlama sürecinde kullanılan parametreler ve aşındırıcı özellikleri

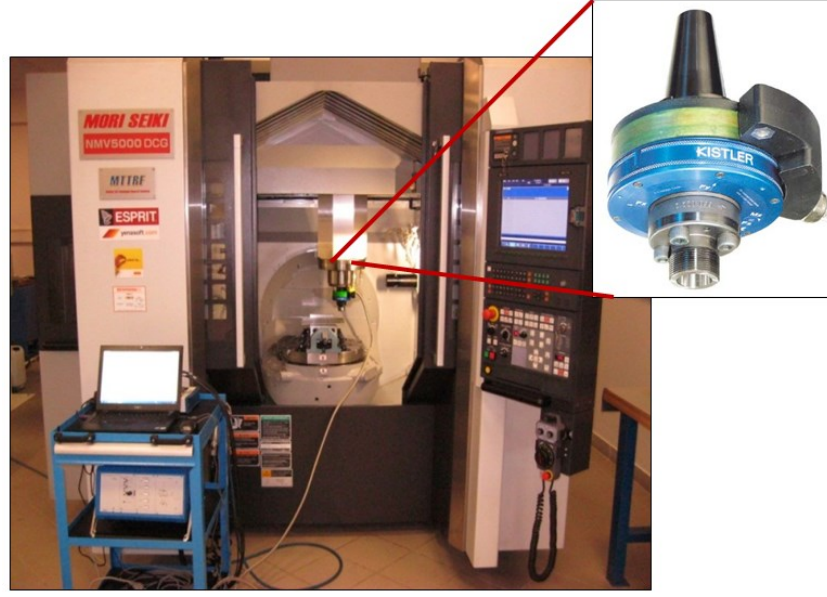
Elmas aşındırıcı gritleri	D54, D126
Taş dönme hızı (dev/dk)	3500
Taşlama derinliği (µm)	25
Taş çapı (mm)	400
Tabla ilerleme hızı (m/sn.)	1

İki farklı aşındırıcı ile taşlanan numunelerin çatlak iyileşme davranışlarının belirlenmesi amacıyla, 700-1300°C sıcaklıklarda hava ortamında 1 saat süre ile

ıslı işlem uygulanmıştır. Taşlama ve ıslı işlem sonrasında numunelerin 4 nokta mukavemet ölçümleri mekanik test cihazı ile (Instron- M10-25590-1) ASTM standartlarına (C1161-02c) uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. 4 yüzeyi de sırasıyla 15, 9, 6 ve 1 µm boyutlarında elmas süspansiyonlar ve bu süspansiyonlara uygun aşındırıcı disklerle parlatılmış olan numuneler, taşlama hataları olmadan elde edilebilecek mukavemet değerlerinin belirlenmesinde kullanılmışlardır. Isıl işlem öncesi ve sonrasında, numune yüzeylerinde taşlama hatalarının belirlenebilmesi için numune kesitleri, 30 µm kalınlığında elmas tel ile hassas kesilmiş ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Yüzeyde taşlama ile oluşan mikroçatlak ve hataların daha belirgin hale getirilebilmesi amacıyla, numune yüzeyleri kimyasal yöntemle dağlanmışlardır. Dağlamada, ağırlıkça %20 oranında NaOH içeren çözeltili 20 dk. süre ile numune yüzeylerine uygulanmıştır. Kesitleri parlatılan numunelerin yüzeyleri FEG-SEM (Zeiss-Supra 50-VP) ile analiz edilmiştir. Isıl işlem ile meydana gelen faz dönüşümleri XRD (Rigaku Rint 2000) yöntemi ile belirlenmiştir. Taşlanmış ve ıslı işlem görmüş numunelerin yüzeylerinin pürüzlülük değerleri yüzey profilometresi (Mahr GmbH) ile belirlenmiştir.

8.4. SiAlON Matkap Uçları için Geometri Belirleme alışmaları

SiAlON malzemeler için uygun geometrik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, seçilen 4 farklı matkap ucu geometrisi, aynı koşullarda test edilerek kıyaslanmıştır. Delme testleri Koç Üniversitesi Üretim Otomasyonu Araştırma Merkezi laboratuvarında, şekil 8.6'da görüntüsü verilen 5 eksen CNC dik işleme merkezi (Mori Seiki NMW-5000) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ve tork verileri Kistler 9123C tipi döner dinamometre ve yüksek hız veri toplama sistemi ile ölçülmüştür.



Şekil 8.6. Delme testlerinde kullanılan 5 eksen CNC dik işleme merkezi ve kuvvet ve tork verilerinin ölçüldüğü dinamometrenin görüntüsü (Koç Üniversitesi Üretim Otomasyonu Araştırma Merkezi Laboratuvarı)

Testlerde kullanılan kesme parametreleri Çizelge 8.4'te verilmektedir. Koşullar, ilerleme miktarının (Test 1-4) ve kesme hızının (Test 5) delme sürecine olan etkilerinin belirlenmesine yönelik seçilmiştir.

Çizelge 8.4. Kuvvet ölçümü testlerinde kullanılan kesme parametreleri

Test No	Kesme hızı [(dev/dk)/(m/dk)]	İlerleme [(mm/dev)/(mm/sn.)]
1	8000/160	0,05/6,66
2	8000/160	0,10/13,32
3	8000/160	0,15/20
4	8000/160	0,20/26,60
5	4000/80	0,20/13,33

8.5. SiAlON Matkap Uçlarının Kesme Performanslarının Belirlenmesi

Aynı geometriye sahip 3 farklı SiAlON (25A, 25A-SiC ve MDA1) ve Karcan Kesici Takım Ltd. firması tarafından CFRP malzemelerin işlenmesine yönelik üretilen ve bu çalışmada referans olarak kullanılan WC-Co matkap uçları Çizelge 8.5'te verilen kesme koşullarında test edilmişlerdir. Açılan 1, 5, 15, 35 ve 65. delik sonrasında uçların birincil kesme kenarlarında oluşan aşınma ve buna bağlı gerçekleşen kuvvet ve tork değişimleri kıyaslanmıştır.

Çizelge 8.5. Performans testlerinde kullanılan kesme parametreleri

Kesme Hızı (dev/dk)/(m/dk)	İlerleme (mm/dev)/(mm/sn.)	Delik yüksekliği (mm)	Delik sayısı	Kesme Uzunluğu (m)*
20000/400	0,05/16,6	10	1	4
			5	20
			15	60
			35	140
			65	260

*Eşitlik 3.8'e göre hesaplanmıştır.

8.6. WC/(Ta+W) Kaplamalı SiAlON Matkap Uçlarının Kesme Performanslarının Belirlenmesi

G-1 geometrik yapısında üretilen 25A matkap uçları, Bilkent Üniversitesi'nde fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi ile WC, W ve Ta hedef malzemeleriyle, PVD cihazında (CemeCon AG) kaplanmıştır. Süreç sonunda elde edilen kaplama özellikleri Çizelge 8.6'da verilmektedir.

Çizelge 8.6. SiAlON matkap uçlarına uygulanan WC/(Ta+W) kaplama özellikleri

Kaplama Yöntemi	PVD
Fazlar (XRD)	WC, W ₂ C, W, Ta
Kaplama tabaka sayısı	24
Kaplama Kalınlığı (µm)	~2
Kaplama Sertliği (@0,001 N) (GPa)	~30

Kaplama tabakasının mikroyapı karakterizasyonu taramalı elektron mikroskobu (Zeiss-Supra 50VP) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaplama tabakasının altlık ile bağlanma mukavemeti indentasyon metoduyla belirlenmiştir. Testler, tepe açısı 136° olan elmas kare piramit bir Vickers ucu ile 0,1, 0,5, 2, 5 ve 10 kgf yükler uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her bir yük değeri için 3 adet ölçüm alınmıştır. Kaplanmış olan uçlar kaplamasız uçlar ile Çizelge 8.5'te verilen kesme koşullarında ($V= 20000$ dev/dk, $f= 0,05$ mm/dev) aynı sayıda delikler açılarak (1, 5, 15, 35 ve 65) test edilmiştir. Testler sonrasında elde edilen aşınmış kenarların analizleri 3 boyutlu optik yüzey tarayıcı (GF-Messtechnik GmbH) ve SEM ile gerçekleştirilmiştir.

9. MALZEME ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYON SONUÇLARI

9.1. Malzeme Yoğunlukları

Sinterleme sonrasında malzemelerin matkap ucu olarak kullanılabilmesindeki ilk ve en önemli ölçüt, yoğunlaşma miktarlarıdır. Yapı içerisinde kalan boşluklar matkap ucunun ani kırılmasına ya da hızlı bir aşınma süreci göstermesine yol açmaktadır. Sinterleme sonrasında numunelerin sahip olduğu yığınsal yoğunluk, % açık porozite ve % teorik yoğunluk değerleri Çizelge 9.1’de verilmiştir. Sonuçlar malzemelerin bu uygulama için hedeflenen yoğunluk değerlerine (>99,5) ulaşıldığını göstermektedir.

Çizelge 9.1. Matkap ucu malzemelerinin yoğunluk değerleri

	Yığınsal Yoğunluk (g/cm ³)	Açık Porozite (%)	Teorik Yoğunluk (%)
25A	3,255	0	100
25AS	3,244	0	100
MDA1	3,240	0,1	99,7
WC-Co	14,85	0	100

9.2. Malzemelerin Mikroyapısal Özellikleri

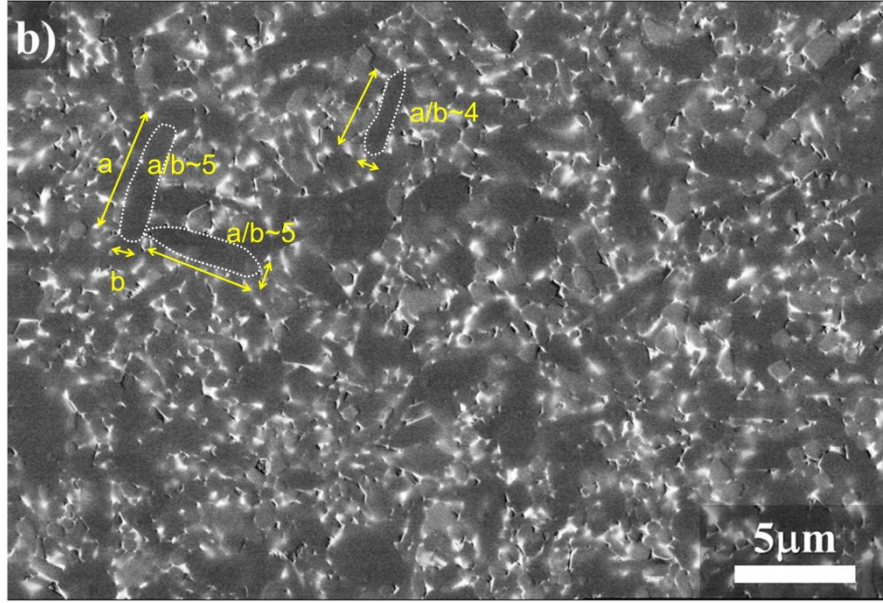
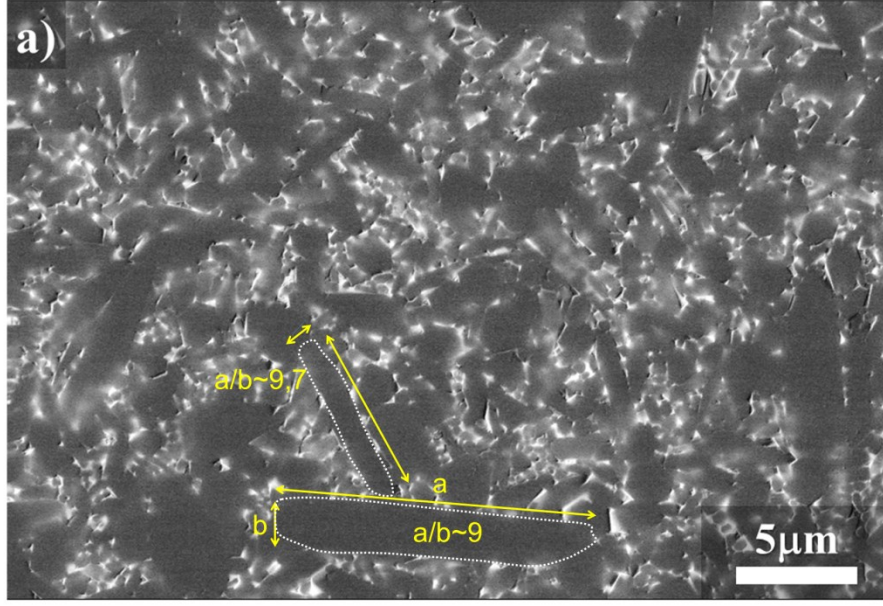
Tane yapısı, şekli, boyutları ve boyut dağılımları gibi mikroyapısal özellikler malzemenin mekanik özelliklerini belirlemektedir. Şekil 9.1’de SiAlON ve WC-Co malzemelerine ait mikroyapı görüntüleri verilmektedir. SiAlON malzemelere ait mikroyapı görüntülerinde koyu gri ve çubuksu görünümdeki taneler β -SiAlON, daha açık gri, kıyaslamalı olarak küçük ve eş eksenli taneler α -SiAlON ve taneleri bağlayan beyaz renkli noktasal bölgeler ise tane sınırı fazını göstermektedir. 25A malzemesinin mikroyapısı, boyları 10 μ m, aspekt oranları ise

(boy/en) 9 olan prizmatik β -SiAlON taneleri ve bu tanelerin etraflarında mikronaltı boyutlara sahip α ve β -SiAlON tanelerinden oluşmaktadır (Şekil 9.1a).

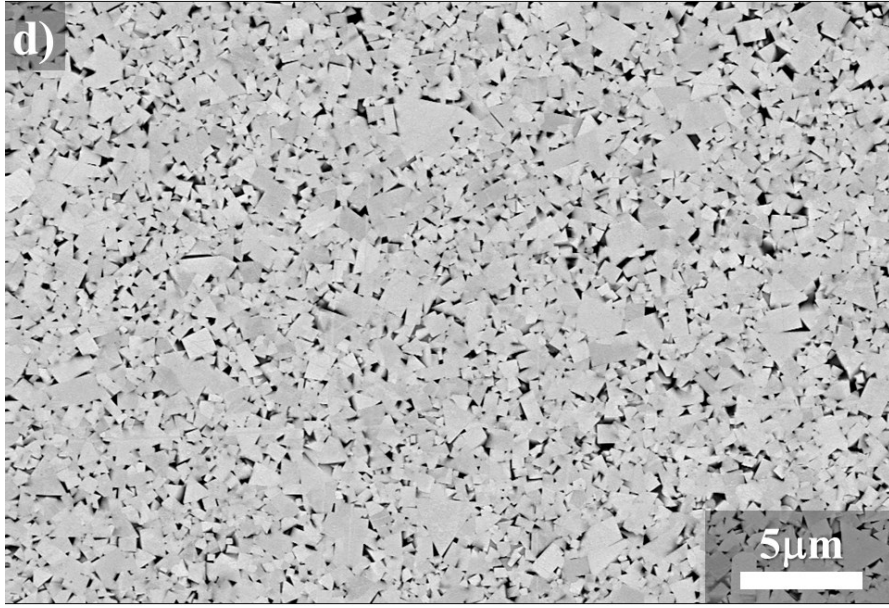
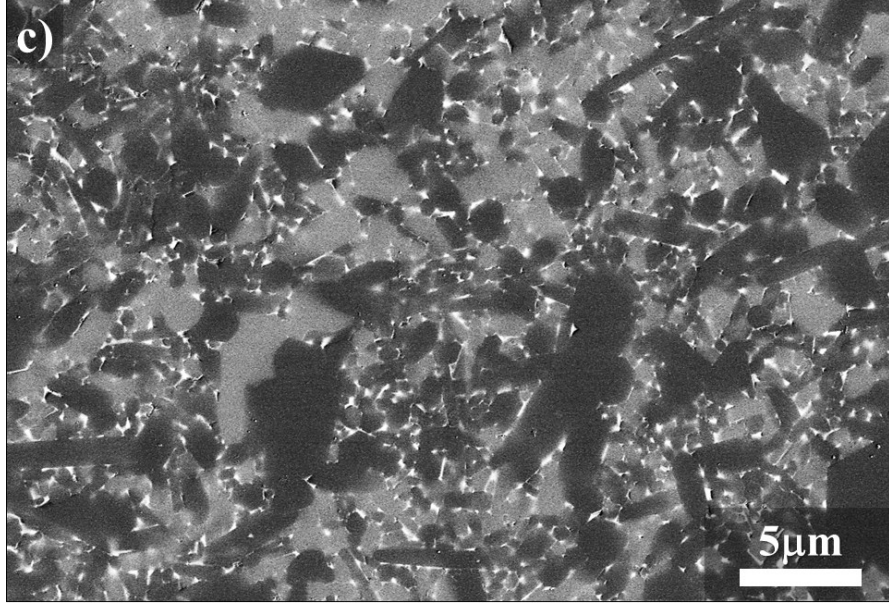
25A malzemesinin SiC takviyesi yapılmış şekli olan 25A-SiC malzemesinin mikroyapısında ise β -SiAlON tanelerinin aspekt oranları yaklaşık olarak yarı yarıya azalarak tane boyut dağılımının daha tek boyutlu bir şekil aldığı görülmektedir (Şekil 9.1b). Boyutları 0,1-0,5 μm arasında değişen SiC taneleri şekil ve boyut açısından α -SiAlON taneleriyle benzer olduklarından ayırt edilmesi güçtürler. SiC tanelerinin β -SiAlON taneleri etrafında yer alarak tane büyümesini engelleyici bir etki gösterdikleri ve buna bağlı olarak malzemenin sertliğini arttırırken kırılma tokluğunu azalttıkları pek çok çalışmada ifade edilmektedir [99-102]. SiC partikül takviyesinin mikroyapı üzerinde oluşturduğu bu değişimin, malzemenin mekanik özellikleri ve kesme performansı üzerinde de etkili olacağı düşünülmektedir.

Şekil 9.1c'de mikroyapı görüntüsü verilen MDA1 malzemesi 25A malzemesinden, içerdiği yüksek α -SiAlON miktarı, tanelerin boyutları ve boyut dağılımları açısından belirgin şekilde farklıdır. Sinterleme ilavesi olarak kompozisyon içerisinde yer alan yüksek orandaki oksit bileşenler α -SiAlON yapısı içerisinde önemli bir çözünürlük gösterdiği için tane sınırında bulunan faz miktarı daha azdır. Yüksek oksit çözünürlüğü nedeniyle α -SiAlON taneleri daha büyük ve parlak görünmektedir. α ve β -SiAlON taneleri birbirlerine benzer boyutlardadır.

Şekil 9.1d'de, bu çalışmada referans olarak kullanılan WC-Co malzemesinin mikroyapı görüntüsü verilmektedir. Açık gri renkte, köşeli bir yapıda ve mikronaltı tane boyutuna sahip (0,1-1 μm) WC taneleri ve daha koyu görünümdeki, WC tanelerini bağlayan Co metalik fazı malzemenin mikroyapısını oluşturmaktadır. WC-Co malzemesinin performansı özellikle WC tanelerinin boyutlarına ve içeriğindeki bağlayıcı Co fazı miktarına göre değişmektedir. Bu malzemedeki gibi, WC tanelerinin mikronaltı boyutlarda olması aşınma direncini arttırmaktadır [103].



Şekil 9.1. (a) 25A, (b) 25A-SiC, (c) MDA1 ve (d) WC-Co malzemelerine ait BE-SEM mikroyapı görüntüleri

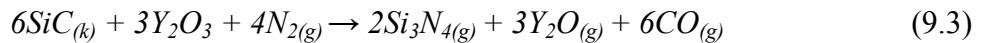
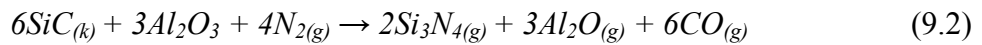
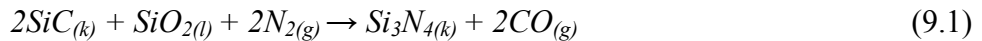


Şekil 9.1. (Devam) (a) 25A, (b) 25A-SiC, (c) MDA1 ve (d) WC-Co malzemelerine ait BE-SEM mikroyapı görüntüleri

9.3. Malzemelerin Faz Analizi

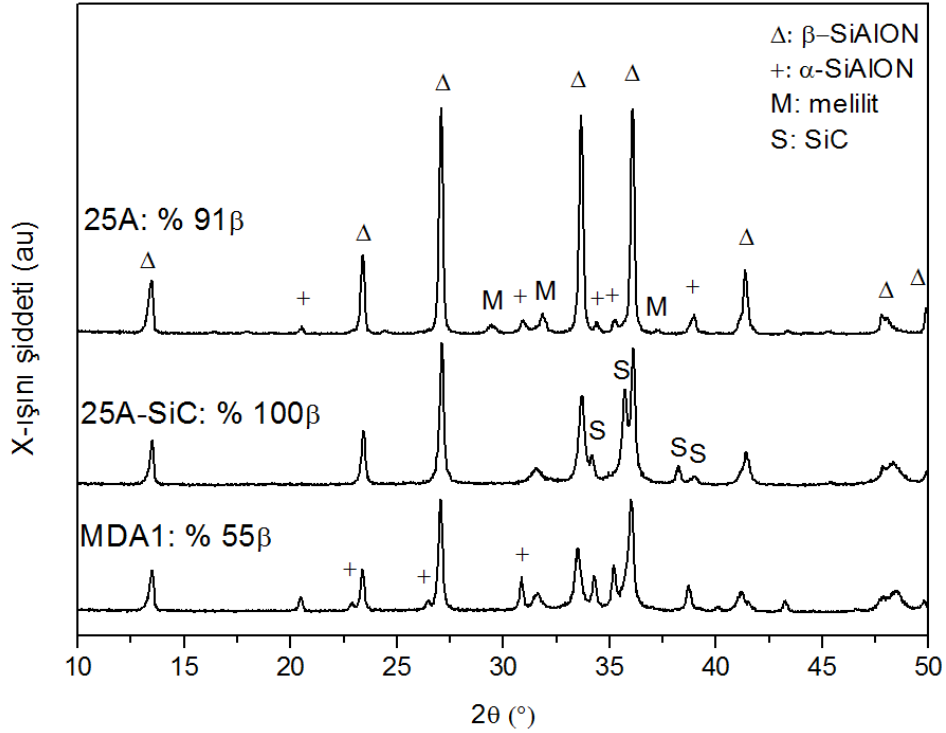
Malzemelerin mikroyapı görüntülerinden içerdikleri fazlar hakkında elde edilen bilgilere ilave olarak, farklı özelliklere sahip olan bu fazların yapıda hangi oranlarda bulunduğu performans üzerinde belirleyici bir diğer parametredir. Şekil 9.2’de SiAlON malzemelere ait XRD spektrası verilmektedir. %75 oranında β -SiAlON içerecek şekilde tasarlanmış olan 25A malzemesinde β -SiAlON miktarının daha yüksek olması (%91 β), bu malzemenin gerekenden yüksek bir sıcaklıkta sinterlemesinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, 25A malzemesinin tane sınırlarında kristal tane sınırı fazının (Y-melilit (Y/Sm₂Si₃O₃N₄)) oluştuğu görülmektedir. Melilit fazının oluşumu kullanılan katkı elementinin iyon çapına bağlı olup, iyon çapının azalması ile melilit katı çözümlenmesinin çözünürlük limiti azalmaktadır. Buna göre büyük iyonik çapa sahip olan Nd ve Sm gibi katyonlar Al ile yer değiştirebilirken, Y-melilit en az miktarda Al çözebilmektedir. Yb ve La ise azotça zengin melilit fazının kararlılığını sağlayamamaktadır [73]. Yüksek ergime noktaları (Y-melilit için ~1900°C) ve azotça zengin sıvı faz bölgelerindeki kompozisyonları ile bu tane sınırı fazı, SiAlON seramikleri için ideal olarak görülmektedir [104]. Bu fazın refrakter özellikte olması özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında malzemeye önemli bir aşınma [105] ve sürünme [106] direnci kazandırmaktadır.

25A malzemesine SiC ilave edildiğinde α -SiAlON kararlılığı bozulmakta ve sistem tamamen β -SiAlON fazına dönüşmektedir. XRD sonuçları, Şekil 9.1 b’de verilen mikroyapı görüntüsünde açık gri şeklinde görülen tanelerin α -SiAlON yerine, SiC taneleri olduklarını göstermektedir. SiC fazının SiAlON yapısı içerisinde bulunması ile sinterleme ilavesi ve SiAlON yapıcı oksitlerin, Eşitlik 9.1-9.3 ile verilen reaksiyonlara göre gaz fazında sistemden uzaklaştığı Zhou ve ark. tarafından bildirilmiştir [107].



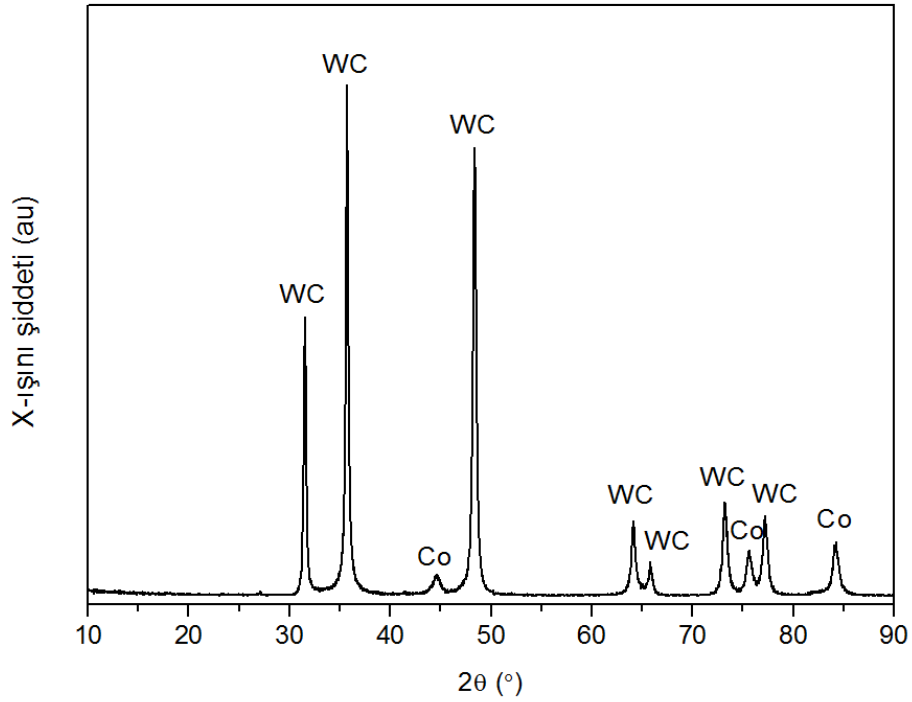
25A-SiC malzemesinde yoğunlaşma süreci tamamlanmış olsa da α -SiAlON oluşumu için gerekli oksitler eksik olduğundan yapıda α -SiAlON bulunmamaktadır. Sistemde β -SiAlON fazını kararlı yapan bir diğer etken ise SiC tanelerinin yüzeylerinde bulunan fazla miktardaki SiO_2 'nin sistemin camsı faz miktarını ve oksijen dengesini değiştirmesidir. Bu durumda β -SiAlON fazı daha kararlı hale gelmektedir. Sistemin oksijen dengesindeki bu değişim ile azotça zengin olan Y-melilit fazının kararlılığı da bozulmakta ve tane sınırları fazı kristal yapıdan amorf yapıya dönüşmektedir.

MDA1 malzemesi %45 oranında α -SiAlON içeriğine sahiptir. Bu malzeme, iyonik çapından dolayı, azotça zengin melilit fazını kararlı hale getiremeyen Yb kasyonu içermekte olup, tane sınırı fazı amorf yapıdadır. β -SiAlON fazına kıyasla sertliği daha yüksek olan bu fazın aşınma dayanımına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

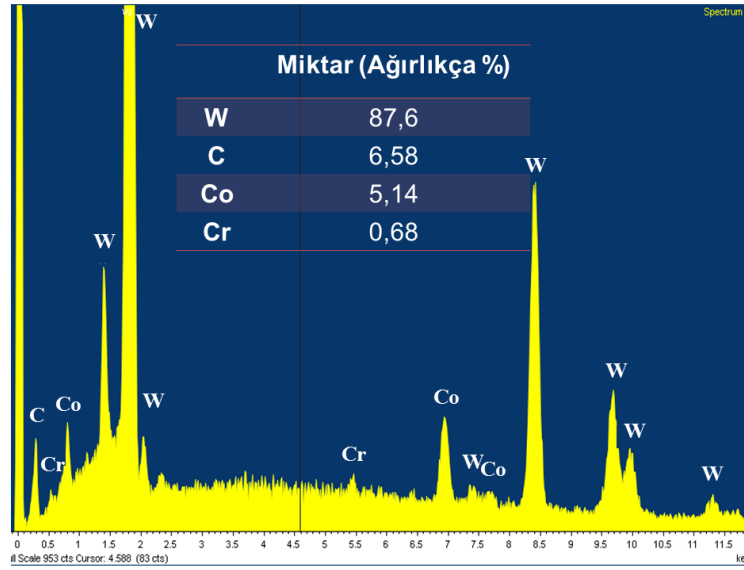


Şekil 9.2. SiAlON malzemelere ait XRD spektrasi

Şekil 9.3'te WC-Co malzemesinin XRD spektrumu verilmektedir. Malzeme, WC seramik fazı ile Co bağlayıcı fazından oluşmaktadır. Co miktarı özellikle CFRP kompozit malzemelerin işlenmesinde geçerli olan aşınma mekanizmalarında, dolayısıyla uç ömrü üzerinde önemli bir rol oynamaktadır [59]. Şekil 9.4'te sonucu verilen EDX analizi sonucuna göre kompozit malzemenin içerdiği Co miktarının ağırlıkça yaklaşık %5 olduğu bulunmuştur. Kobaltın yanı sıra, kompozit malzeme içerisinde %1'den az krom elementinin bulunduğu görülmektedir. Krom, Cr_2C_3 şeklinde yapıda bulunup sinterleme sırasında WC tanelerinin büyümesini engelleyerek aşınma dayanımının yüksek olmasına katkı sağlamaktadır [44].



Şekil 9.3. WC-Co malzemesine ait XRD spektrumu



Şekil 9.4. WC-Co malzemesine ait EDX analizi sonucu

9.4. Malzemelerin Mekanik Özellikleri

SiAlON malzemelerinin mekanik özellikleri, yoğunlaşma miktarı (porozite), tane boyutları ve şekilleri gibi mikroyapısal özellikler ve içeriğinde bulunan fazlar ve dağılımları tarafından belirlenmektedir. SiAlON ve WC-Co malzemelerinin mikro-sertlik ve tokluk değerleri Çizelge 9.2’de verilmektedir.

Çizelge 9.2. SiAlON ve WC-Co malzemelerinin Vickers sertlik ve kırılma tokluğu değerleri

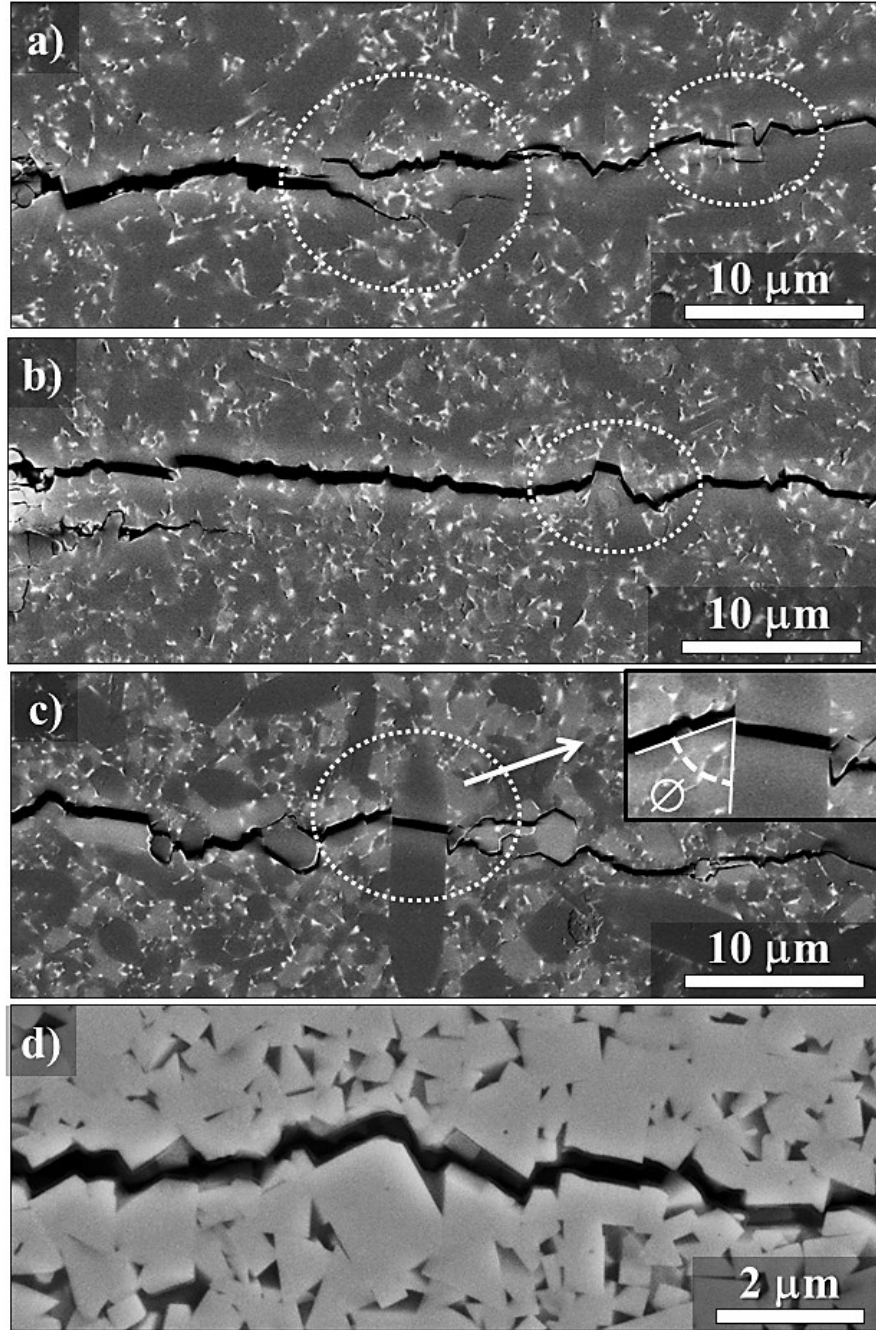
	25A	25AS	MDA1	WC-Co
HV10	16,10	17,70	18,60	18,60
	(±0,19)	(±0,34)	(±0,38)	(±0,17)
K _{1c}	5,70	4,20	4,50	6,40
	(±0,40)	(±0,17)	(±0,17)	(±0,08)

SiAlON malzemelerinde sertlik değeri daha sert bir yapıya sahip olan α -SiAlON miktarı ile belirlenirken kırılma tokluğu β -SiAlON miktarı ve z değeri [87,88], tanelerin boyut ve şekilleri [83,84,86] ile tane sınırı fazının özellikleri [64,69] tarafından belirlenmektedir. Şekil 9.5'a, b ve c'de SiAlON taneleri arasından ilerleyen indentasyon çatlaklarının BE-SEM görüntüleri verilmektedir. 25A malzemesinde, çatlağın mikroyapıda bulunan taneler tarafından etkin bir biçimde saptırıldığı ve bunun sonucunda çatlak oluşum noktasından itibaren kat edilen mesafenin önemli ölçüde kısaldığı görülmektedir (Şekil 9.5a). Bu mekanizma ile SiAlON malzemeleri, diğer yapısal seramiklere kıyasla daha yüksek kırılma tokluğu değerlerine sahip olabilmektedirler.

Şekil 9.5b'de verilen 25A-SiC malzemesi içerisinde ilerleyen çatlağın ise daha düz bir yol izlediği görülmektedir. Bunun nedeni, çatlağı saptırma görevi olan β -SiAlON tanelerinin 25A malzemesindeki tanelere kıyasla yeterince büyümemiş olmasıdır. Etkin bir çatlak saptırma mekanizmasının gerçekleşebilmesi için, mikroyapının bimodal tane boyut dağılımından oluşması gerekmektedir [83,84]. Malzemede SiC taneleri kırılma tokluğunun azalmasına neden olurken, sertliğin artmasına katkı sağlamaktadır.

MDA1 malzemesinde ise ilerleyen çatlağın belirgin bir şekilde saptırıldığı görülmektedir (Şekil 9.5c). Bu malzemedeki β -SiAlON faz oranının diğer malzemelere kıyasla düşük ve tane boyut dağılımının tek boyuta daha yakın olmasına rağmen, ilerleyen çatlağın taneler tarafından saptırılması malzemenin sahip olduğu yüksek z değerinden ($z \geq 1,2$) kaynaklanmaktadır. $z=0,2$ değerine kadar tane ara yüzey mukavemetinin artış göstermesi, bu değer üzerinde ise hızla azalması, z değeri yüksek olan bu malzemede kırılmanın, daha zayıf olan tane ara yüzeyinden gerçekleşmesini sağlamaktadır. Katkı türü açısından bakıldığında Y'ye göre daha küçük iyon çapına sahip olan Yb katyonunun kullanılması, ara yüzey mukavemetini arttırsa da, bu etki z değeri etkisinin yanında zayıf kalmaktadır. Ara yüzey mukavemetinin yanı sıra, malzeme içerisinde ilerleyen bir çatlağın saptırılabilmesi, çatlağın tane yüzeyine geliş açısına (θ) da bağlıdır [108]. Şekil 9.5c'de yüksek θ açısıyla bir β -SiAlON tanesine gelen çatlağın tane içinden (transgranular) ilerlediği görülmektedir.

WC-Co malzemesinde sertlik mikronaltı boyutlardaki WC taneleri, kırılma tokluğu ise WC tanelerini bağlayan sünek yapıdaki Co fazı tarafından sağlanmaktadır. Şekil 9.5d’de malzeme içerisinde oluşan çatlakın keskin köşeli yapıdaki WC tane yüzeylerinde bulunan Co fazı içerisinde ilerlediği görülmektedir.



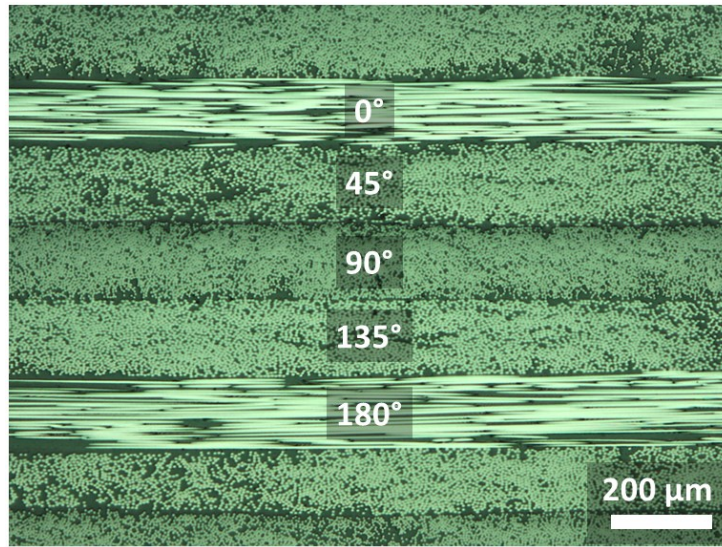
Şekil 9.5. (a) 25A, (b) 25A-SiC, (c) MDA1 ve (d) WC-Co malzemelerinde çatlak ilerleme davranışları (∅: çatlakın tane yüzeyine ulaşma açısı)

9.5. CFRP Kompozit Malzemenin Özellikleri

Delme testlerinde kullanılan eş yönlü karbon fiber takviyeli polimer kompozit plakanın (UD-CFRP) sahip olduğu fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 9.3'te verilmektedir. Çizelgede verilen özellikler yöne bağlı olup fiberlerin malzeme içerisindeki dağılımları tarafından belirlenmektedir. Malzeme Şekil 9.6'da verilen optik mikroskop görüntüsündeki 0, 45, 90, 135 ve 180° yönlerde konumlanan fiberlerin sağladığı yüksek mukavemet ve elastik modülü değerlerine sahiptir.

Çizelge 9.3. Delme testlerinde kullanılan kompozit malzemenin özellikleri

Fiber miktarı (Hacimsel %)	59
Mukavemet (MPa)	2690
Elastik Modülü (GPa)	1650 @ 0°, 17,5@ 90°
Yoğunluk (g/cm³)	1,58
Tabaka kalınlığı (µm)	140
Plaka kalınlığı (mm)	10
Tabakalar arası kırılma tokluğu (G_{IC}) (J/m²) [109]	400-500
Poisson oranı (ν) [110]	0,25



Şekil 9.6. Testlerde kullanılan UD-CFRP kompozit malzemenin optik mikroskop kesit görüntüsü

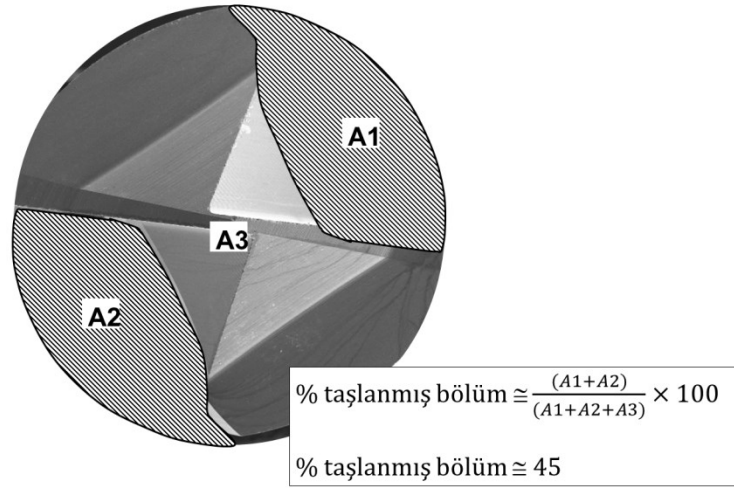
9.6. Sonuçlar

- 3 farklı kompozisyona sahip SiAlON esaslı kompozit malzemeler ubuklar Şeklinde üretilip, malzemelere baŐarılı bir taşlama süreci sonrasında matkap ucu formu kazandırılmıştır. Matkap uçları için 4 farklı geometrik yapı esas alınmıştır.
- 25A malzemesine SiC takviyesi ile elde edilen 25A-SiC malzemesinde mikroyapıdaki tane boyut dağılımlının iki boyuttan tek boyuta doğru deėiŐtiėi ve sistemde α -SiAlON fazının kararlılığının korunamadığı görülmüştür. Tane boyut dağılımlındaki değişimin, SiC tanelerinin SiAlON tanelerinin yüzeylerinde bir bariyer oluŐturması ve buna bağlı olarak difüzyon sürecini engellemesinden kaynaklandığı dŐnlmektedir. α -SiAlON fazının kararlılığının korunamaması ise, SiC tanelerinin sistemdeki katı halde bulunan ilave oksit fazlarıyla oluşturmuş oldukları reaksiyonlar ile, bu fazların sistemden gaz fazında uzaklaŐmasından kaynaklanmaktadır.
- 25A-SiC malzemesinin mikroyapısında meydana gelen değişim mekanik özelliklerine de yansımaktadır. Azalan β -SiAlON tane boyutu ile kırılma direncinde bir azalma meydana gelirken, SiC tanelerinin katkısıyla sertlikte bir artış kaydedilmiştir.
- MDA1 malzemesinin z değerinin yüksek olması oluşan çatlağın daha zayıf olan tane ara yüzeylerinden ilerlemesini sağlamaktadır. Bu durum, kırılma tokluğu açısından olumlu bir etki oluŐursa da β -SiAlON fazının yetersiz oluŐu, bu malzemenin daha kırılğan olmasına neden olmaktadır.
- WC-Co malzemesinde ise SiAlON malzemelere kıyasla tamamen farklı bir toklaŐtırma mekanizması (sünek faz toklaŐtırması) bulunmaktadır. Bu mekanizma ile malzeme ani kırılmalara ve çevrimsel yüklere daha dirençli hale gelmektedir.
- Yapılan analizler sonucunda bu çalışmada işlenmesi hedeflenen CFRP kompozit malzemenin 45° açılarla birbiri üzerine konumlandırılmış fiber tabakalarından oluştuğu ve bu fiberler sayesinde malzemenin yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür.

10. SiAlON SERAMİKLERİNİN ÇATLAK İYİLEŞME DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

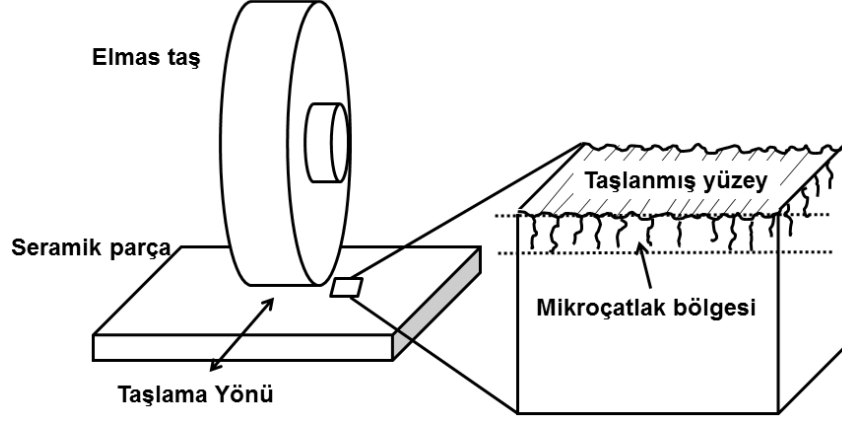
10.1.Giriş

Hassas bir uygulamada kullanılan seramik bir parça için yüzey taşlama, son yüzey kalitesinin geliştirilmesi, boyutsal toleransların elde edilmesi ve karmaşık geometriye sahip parçaların üretilebilmesi için zorunlu bir yöntem durumundadır. Bu çalışmada üretimi gerçekleştirilen SiAlON matkap uçları için taşlama, üretim sürecinde önemli bir basamak durumundadır. Şekil 10.1’de gösterilen G-1 geometrisine sahip SiAlON bir matkap ucu için taşlama ile oluşturulan kanalların (A1+A2), silindir çubuk kesitine (A1+A2+A3) oranı yaklaşık olarak %45’i bulmaktadır. Kanallar dışında kalan, çevre taşlama işlemi ile birlikte SiAlON çubuklardan uzaklaştırılan malzeme miktarı %50 dolaylarındadır. Buna göre, SiAlON matkap uçlarının üretilmesinde önemli bir süreç basamağı olan taşlamanın ve malzeme özelliklerine etkilerinin iyi analiz edilmesi bir zorunluluktur.



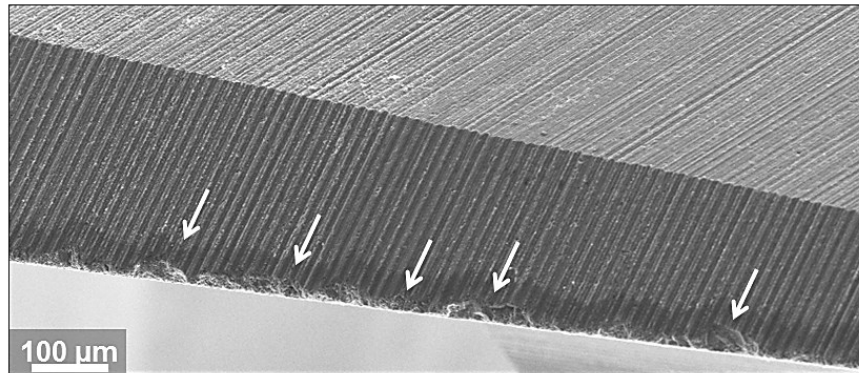
Şekil 10.1. G-1 geometrisine sahip SiAlON matkap ucunda taşlama ile oluşturulan kanallar (A1+A2) ve bu kanalların toplam kesite oranı (A1+A2/(A1+A2+A3))

Seramiklerin yüksek sertlikleri ve kırılgan yapıları nedeniyle taşlama süreci sırasında, parçanın yüzey altı mikro-çatlakları oluşmadan üretilmeleri oldukça zordur [111]. Şekil 10.2’de taşlama sürecinde oluşturulan ve malzeme yüzeyinden iç bölümlere doğru ilerleyen mikroçatlaklar şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 10.2. Taşlama süreci ve sonucunda yüzey altında oluşan mikroçatlakların şematik gösterimi

Taşlanan parçanın geometrisi matkap ucu gibi ince kesitler barındıran bir yapıda ise, bu kesitlerin yetersiz mukavemetine bağlı olarak yüzey altı çatlakları taşlama sırasında ilerleyerek pullanmalara neden olmaktadır. Şekil 10.3’te verilen SEM görüntüsünde SiAlON matkap ucunun serbest yüzeyinde taşlama sonrası oluşan mikro-pullanmalar görülmektedir.



Şekil 10.3. SiAlON matkap ucunun serbest yüzeyinde taşlama sonrası oluşan mikro-pullanmalar

Taşılama sürecinde yüzey altında oluşan bu mikroçatlaklar, malzemenin kırılma mukavemetini ve kullanım sırasında güvenilirliğini önemli derecede düşürmektedir. Bu nedenle, bu hataların yapıdan uzaklaştırılması amacıyla, uygun aşındırıcı elmas boyutu ve taşılama parametrelerinin seçimi büyük önem taşımaktadır [112-116].

Diğer taraftan, malzemenin güvenli bir şekilde kullanımını kısıtlayan mikroçatlakların engellenmesi, kırılma direncinin artırılmasının yanında çatlak oluşuktan sonra uygulanan ısı işlem ile (çatlak iyileşmesi) mümkün olmaktadır. Malzemenin güvenilirliğinin artmasının yanında, çatlak iyileşme özelliği seramik bir parçanın işleme, parlatma ve bakım maliyetlerinin azalmasını da sağlamaktadır [117,118]. Silisyum karbür [119], alümina-SiC [120-124], müllit-SiC [125-127] ve silisyum nitrür-SiC [111,117,128-132] malzemeleri çatlak iyileşme özellikleri iyi olan malzemelerin başında gelmektedir. Bu malzemelerin çatlak iyileşme davranışında Si₃N₄ ve SiC fazlarının oksidasyonu ile Eşitlik 10.1-1.3'te verilen reaksiyonlar sonucunda oluşan oksit bileşenler belirleyici durumdadır [118,123,132].



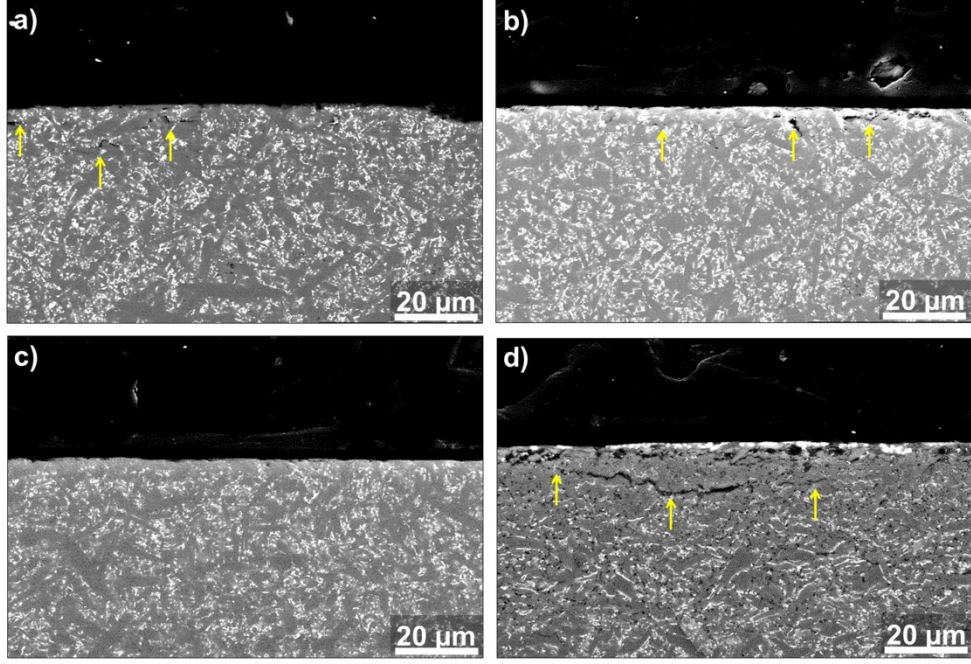
Çatlak iyileşme, çatlak yüzeyindeki camsı fazın ya da malzeme içerisinde bulunan cam fazının çatlak düzlemine taşınımı ya da, dış ortam ile çatlak yüzeyi arasındaki oksidasyon reaksiyonlarının neden olduğu ilave bağlanma kuvveti ile gerçekleşmektedir [128]. Bu süreç, sinterleme ilavelerine bağlı olarak değişen belirli koşullarda oluşur. Örneğin, %4 silikat içeren Al₂O₃ malzemesinin tepkimeye girmeyen atmosferde gerçekleştirilen ısı işlemi ile silikat fazının difüzyonuna bağlı bir çatlak iyileşmesi ve bunun sonucunda da oda sıcaklığı mukavemet değerinde artış kaydedilmiştir [133]. MgO ve B₄C sinterleme ilaveli Si₃N₄ malzemesinde ise çatlak iyileşme, yalnızca hava ortamında oksidasyon süreci ile oluşan oksitlerin difüzyonu ile gerçekleşmektedir [127,134].

Si_3N_4 seramiklerine kıyasla yapısında daha fazla sayıda sıvı faz yapıcı oksit bulduran SiAlON seramiklerinin, bu özellikleri ile çatlak iyileşme davranışının iyi olması beklenmektedir. SiAlON esaslı malzemelerin pek çok yapısal uygulama alanındaki kullanımı sürekli artmasına rağmen, bu malzemelerin çatlak iyileşme davranışlarının ortaya konulduğu bir çalışma henüz bulunmamaktadır. Bu bölümde, SiAlON matkap ucu üretiminde önemli bir süreç basamağı durumunda olan taşlama işleminin neden olduğu mikroçatlaklar, bu mikroçatlakların malzemenin mukavemeti üzerine etkileri ve uygulanan ısıl işlem ile SiAlON ve SiAlON-SiC malzemelerinin çatlak iyileşme davranışlarının ortaya konulması amaçlanmıştır.

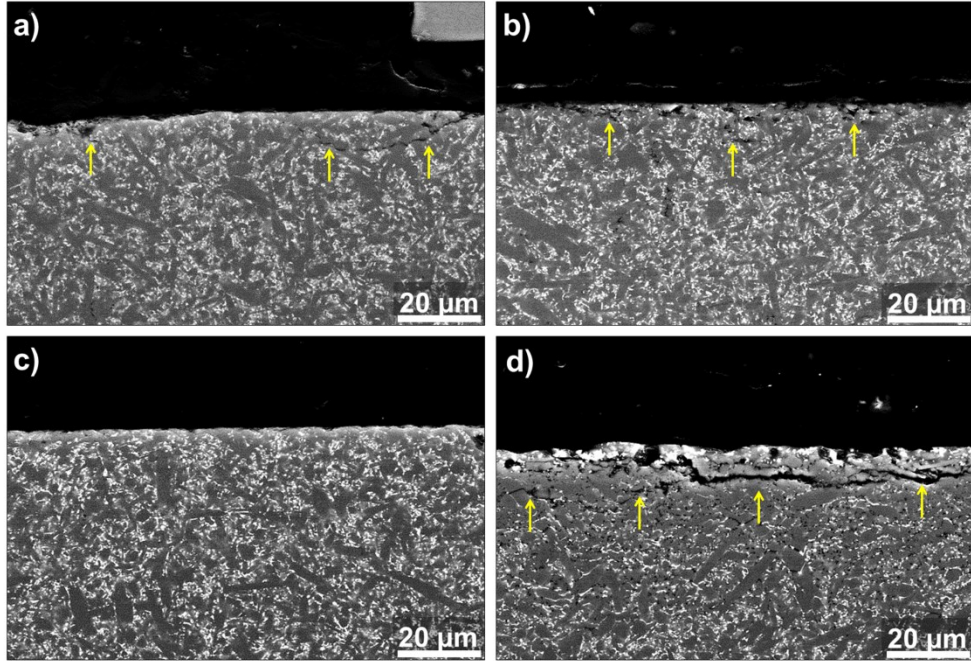
10.2. Isıl İşlemin Mikroyapı Üzerine Etkisi

Taşlama sonucunda oluşan hataların belirlenmesi, cam veya çok ince tane yapısına sahip nano malzemelerde kolay olmasına rağmen, çok kristal seramik malzemelerde bu hatalar mikroyapısal özelliklerle karıştırılmakta ve belirlenmesi dikkatli bir mikroskopik analiz gerektirmektedir [135]. Kırılma analizinde genel yaklaşım, kırılmanın gerçekleştiği yüzeyde bulunan çatlak şekillerinin incelenerek kırılma orijininin belirlenmesi şeklindedir. Bu çalışmada ise, yüzeyde bulunan hataların mikroyapısal özelliklerle karıştırılmadan belirlenmesi amacıyla yüzeyde taşlama hatalarını bulduran numune kesiti hassas bir kesme işlemini takiben, parlatılmış, mikroskopik yöntemlerle incelenmiştir. Şekil 10.2-10.5'te SiAlON esaslı kompozit malzemelerin farklı grit aşındırıcılarla taşlanıp, farklı sıcaklıklarda ısıl işlem uygulanması sonrasında elde edilen numune kesitlerinin BE-SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntülerde D54 ve D126 grit aşındırıcı ile yüzeyleri taşlanan 25A ve 25A-SiC malzemelerinde, taşlama sonrasında oluşan mikroçatlaklar belirgin bir şekilde görülmektedir (Şekil 10.3-10.7). Oluşan bu çatlakların miktarları ve uzunlukları aşındırıcı elmas tanelerinin boyutuyla artış göstermektedir. İçerisinde bulunan SiC tanelerinin etkisiyle daha kırılğan bir yapıya sahip olan 25A-SiC malzemesinin, kullanılan aşındırıcı tane boyutuna daha duyarlı olduğu, bu nedenle yüzeyde daha fazla sayıda ve daha derin

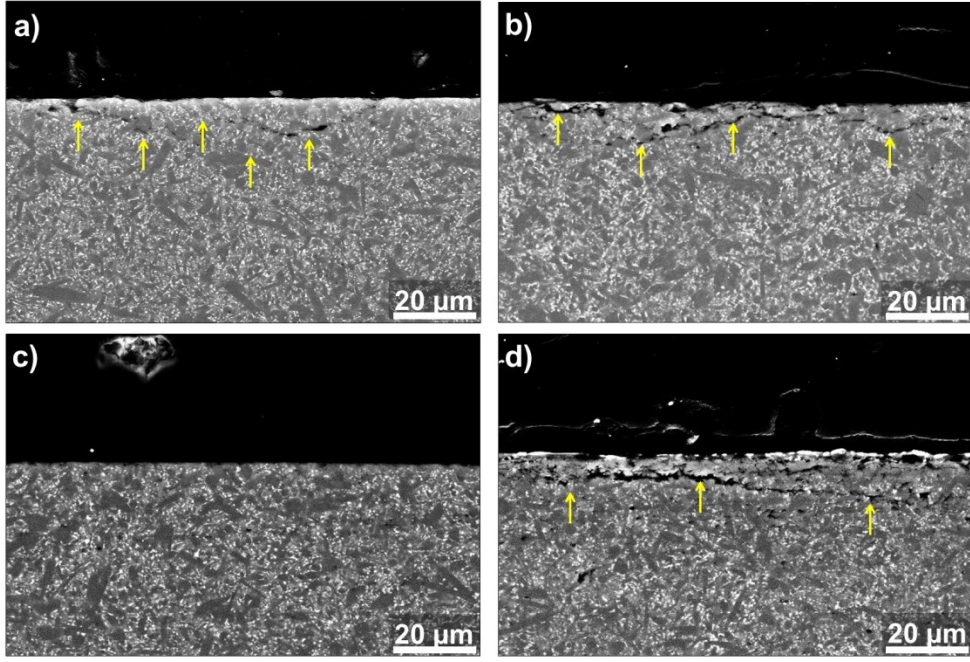
çatlakların yer aldığı görülmektedir (Şekil 10.7a). Düşük ısı işlem sıcaklıklarında bile yüzeydeki taşlama çatlaklarının yapısı belirgin biçimde değişmektedir. Taşlama sonrasında, çatlaklar yüzeyden iç kısımlara doğru düzenli yapılarını korurken, ısı işlem etkisiyle daha süreksiz bir hale gelmektedir. D126 grit elmas aşındırıcı ile taşlanmış olan 25A-SiC malzemesinin yüzeyinde taşlama sonrasında görülen geniş çatlakların (Şekil 10.7a), 700°C sıcaklıkta uygulanan ısı işlem ile belirgin biçimde incelendiği görülmektedir (Şekil 10.7b). Sıcaklığın 1000°C'ye yükselmesi ile 25A malzemesi için, kullanılan aşındırıcının tane boyutundan bağımsız olarak tam bir iyileşme gerçekleşmektedir (Şekil 10.4c ve 10.5c). 25A-SiC malzemesinde de benzer şekilde, D54 grit aşındırıcı kullanıldığında malzemenin yüzeylerindeki çatlakların tamamına yakınının iyileştiği görülmektedir (Şekil 10.6c). Ancak, D126 grit aşındırıcı ile taşlanmış 25A-SiC malzemesinde taşlama ile oluşan hasarın fazla olması bu hasarların tamamen yok edilebilmesini engellemiştir. Bu nedenle bir miktar çatlak yüzeyde görülmektedir (Şekil 10.7c). 1300°C'de ise yüzeyde oksitlenme reaksiyonlarının şiddetli bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. SiAlON malzemesinin tane sınırlarında yer alan fazı oluşturan katyonların yüzeye doğru difüzyonu ile gerçekleşen bu süreç sonucunda, yüzeyin hemen altında, içerisinde boşluk ve derin çatlakların da yer aldığı bir difüzyon tabakası oluşmaktadır. Düşük sıcaklıklarda yüzeyden çatlaklara doğru oksijen atomlarının taşınımı hızlı gerçekleşirken, sıcaklığın artması ile tane sınırı fazını oluşturan atomların yüzeye doğru difüzyon hızı oksijen difüzyonuna kıyasla daha yüksek hale gelmektedir. Bu sayede malzeme taşınımı yüzeye doğru gerçekleşmekte ve yüzey altında boşluklar meydana gelmektedir. Oluşan derin çatlaklar, çatlakların içerisini dolduran ve bu sayede iyileşmeyi sağlayan fazın yüzeye taşınmasının yanında, yüzeyde oluşan kristallerin soğuma sırasında göstermiş oldukları hacimsel değişimlerden kaynaklanmaktadır.



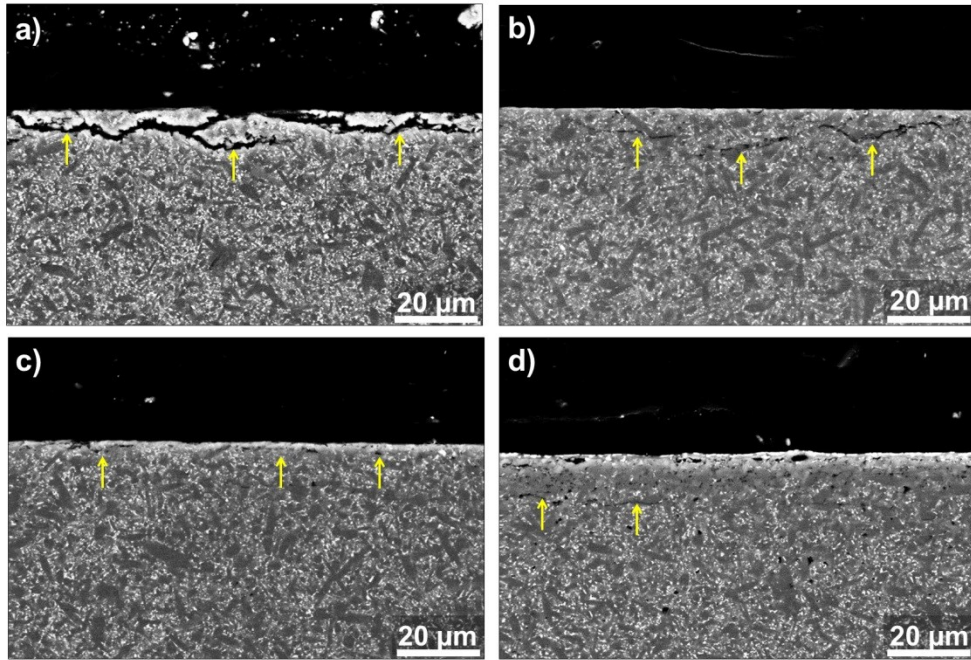
Şekil 10.4. D54 grit elmas aşındırıcı ile taşlanan 25A malzemesinin taşlanmış yüzey BSE- SEM kesit görüntüleri (a) taşlama sonrası, (b) 700°C, (c) 1000°C (d) 1300°C'de ısıl işlem sonrası. Yüzeyde bulunan çatlaklar oklarla gösterilmiştir.



Şekil 10.5. D126 grit elmas aşındırıcı ile taşlanan 25A malzemesinin taşlanmış yüzey BSE- SEM kesit görüntüleri (a) taşlama sonrası, (b) 700°C, (c) 1000°C (d) 1300°C'de ısıl işlem sonrası. Yüzeyde bulunan çatlaklar oklarla gösterilmiştir.

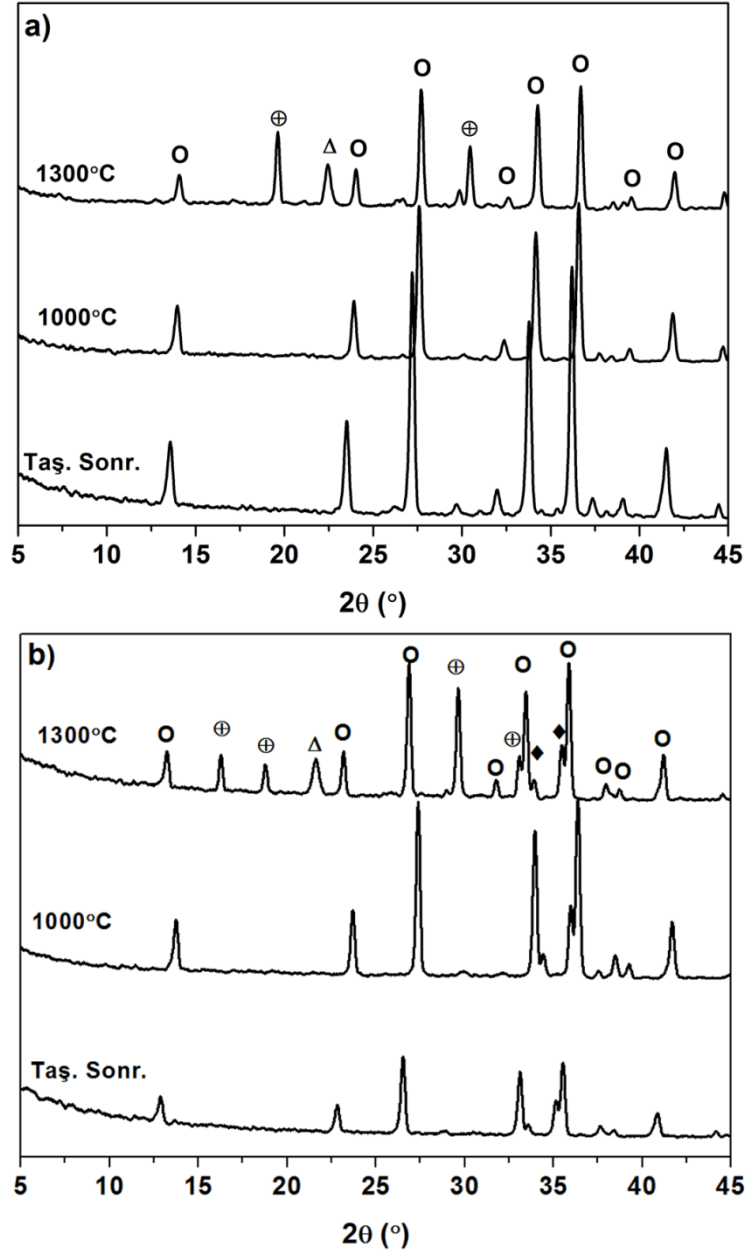


Şekil 10.6. D54 grit elmas aşındırıcı ile taşlanan 25A-SiC malzemesinin taşlanmış yüzey BSE-SEM kesit görüntüleri(a) taşlama sonrası, (b) 700°C, (c) 1000°C (d) 1300°C’de ısıtıl işlem sonrası. Yüzeyde bulunan çatlaklar oklarla gösterilmiştir.



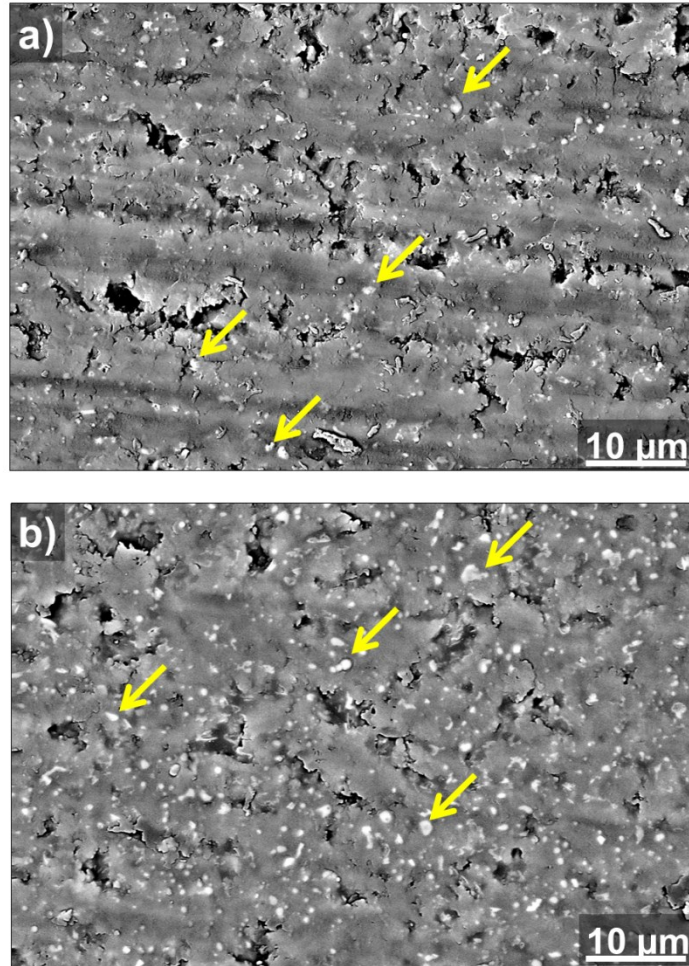
Şekil 10.7. D126 grit elmas aşındırıcı ile taşlanan 25A-SiC malzemesinin taşlanmış yüzey BSE-SEM kesit görüntüleri (a) taşlama sonrası, (b) 700°C, (c) 1000°C (d) 1300°C’de ısıtıl işlem sonrası. Yüzeyde bulunan çatlaklar oklarla gösterilmiştir.

Isıl işlem sürecinde yüzeyde gerçekleşen ve yüzey morfolojisinin değişimine neden olan faz dönüşümleri Şekil 10.8’de verilen XRD grafiklerinden takip edilebilmektedir.



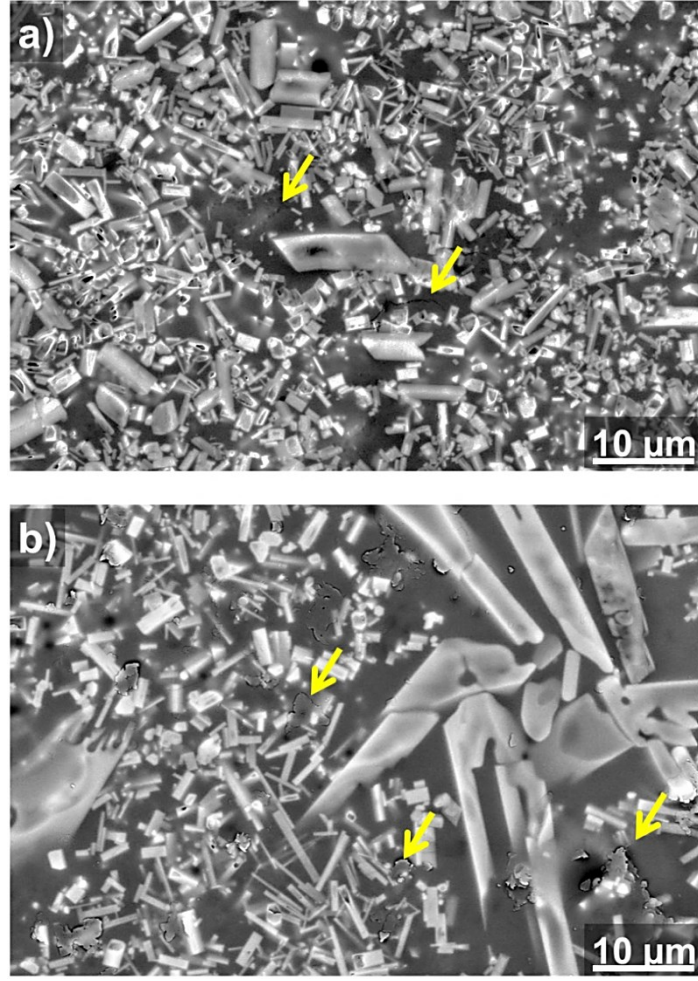
Şekil 10.8. (a) 25A ve (b) 25A-SiC numunelerinin farklı ısıl işlem sıcaklıklarında faz dönüşümlerini gösteren XRD spektraları (o: β -SiAlON, Δ : Kristobalit, \oplus : $Y_2Si_2O_7$, \blacklozenge : SiC)

XRD sonuçları, numunelerde 1000°C'ye kadar belirgin bir kristal faz oluşumunu göstermemektedir. Şekil 10.9'da 1000°C sıcaklıkta ısıl işlem uygulanmış 25A ve 25A-SiC numunelerinin taşlanmış yüzey BE-SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntülerde, 25A-SiC malzemesinde daha fazla gerçekleşmeyle birlikte, numune yüzeylerinde boyutları 0,5 µm'den küçük oksit kristallerinin çekirdeklenmeye başladıkları görülmektedir. Bu sıcaklığa kadar uygulanan ısıl işlemler sonucunda çatlak morfolojisinin değişiminin, reaksiyon kinetiği oldukça düşük olan oksitlenme reaksiyonları sonucunda oluşan amorf SiO₂ fazı tarafından sağlandığı düşünülmektedir [117-119,128].



Şekil 10.9. 1000°C sıcaklıkta 1 saat süre ile uygulanan ısıl işlem sonrasında (a) 25A ve (b) 25A-SiC malzemelerinin oksitlenmiş yüzey BE-SEM görüntüleri. Oklar çekirdeklenen oksit kristallerini göstermektedir.

1000°C'nin üzerinde gerçekleşen oksidasyon reaksiyonları sonucunda (Eşitlik 10.1-10.3), miktarı artan SiO₂ amorf fazı, soğuma sırasında kristobalit şeklinde yüzeyde kristallenmektedir (Şekil 10.8). Şekil 10.10'da verilen BE-SEM görüntülerinde koyu gri renkte görülen kristobalit fazı, soğuma sırasında 400°C'den oda sıcaklığına kadar hacimce yaklaşık %5-7 oranında bir küçülme gösterir [136]. Bu küçülme, ısıl genleşme katsayısı yaklaşık olarak $(2,5-4) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ olan SiAlON taneleri [137] ile kristobalit ara yüzeyinde ısıl gerilmelerin ve buna bağlı olarak yüzeyde çatlakların oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 10.9a ve b'de oklarla gösterilmiştir). Diğer taraftan, tane sınırlarında yer alan Y₂O₃, Sm₂O₃ ve Al₂O₃ gibi diğer bileşenlerin yüzeye difüzyonu ile yüzeyde küçük kristaller halinde bulunan silikat fazlarının (ağırlıklı olarak Y₂Si₂O₇) büyüdüğü görülmektedir (Şekil 10.10). Isıl genleşme katsayısı $\sim 4 \times 10^{-6}$ [138] olan Y₂Si₂O₇ kristallerinin kristobalit fazı ile ısıl uyumsuzluğu, yüzeyde ve yüzey altında taşlama ile oluşan çatlakların yüksek sıcaklıklardan soğuma sırasında yeniden oluşmasına katkı sağlamaktadır.

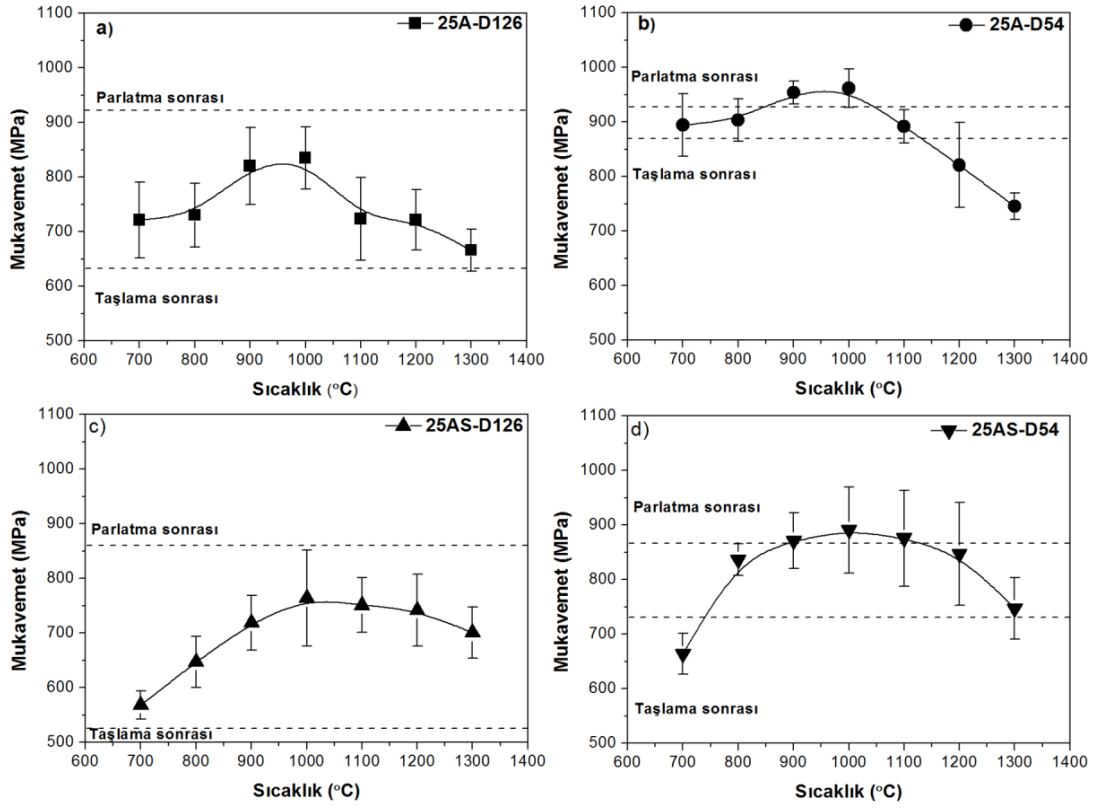


Şekil 10.10. 1300°C sıcaklıkta 1 saat süre ile uygulanan ısı işleme sonrasında (a) 25A ve (b) 25A-SiC malzemelerinin oksitlenmiş yüzey BE-SEM görüntüleri. Oklar ısıl genişleme katsayıları uyumsuzluğuna bağlı olarak oluşan çatlakları göstermektedir.

Si₃N₄-SiC malzemelerinin 1200°C üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşen oksitlenme reaksiyonları ile çatlak iyileşme davranışı gösterdikleri bilinmektedir [118,129,130,132]. SiAlON ve SiAlON-SiC seramiklerinde ise çatlaklar, daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşen oksitlenme reaksiyonları sonucunda oluşan amorf SiO₂ fazı ile kapatılmakta ve çatlak iyileşmesi sağlanmaktadır. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak oksitlenme reaksiyonlarının artan kinetiği ile şiddetli oluşan oksit ürünler, malzeme yüzeyinde taşlama ile oluşan çatlakların yeniden oluşmasına neden olmakta ve yüzeyde oluşan kristal fazların ısıl genişleme katsayıları arasındaki uyumsuzluk ısıl gerilmeleri ve yüzey hatalarını artmaktadır.

10.3. Isıl İşlemin Mukavemet Üzerine Etkisi

Şekil 10.10'da, uygulanan ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak malzemelerin mukavemet değişimleri verilmektedir. Kullanılan aşındırıcı elmas boyutunun malzemelerin mukavemet değerlerinde belirleyici olduğu D126 ve D54 grit aşındırıcılarla taşlanan numunelerin taşlama sonrası mukavemet değerleri arasındaki belirgin farktan (>200 MPa) anlaşılmaktadır (Şekil 10.11). Yüzey hatalarının yok edilmesi amacıyla uygulanan parlatma işlemi ile mukavemet belirgin bir artış göstermektedir. Özellikle D126 grit aşındırıcı ile taşlanan numunelerin yüzeylerindeki mikroçatlakların parlatma ile yüzeyden uzaklaştırılması, mukavemet değerinde önemli bir artış sağlamaktadır. Parlatma ile yüzeyde bulunan taşlama hatalarının tamamen yok edilemediği ifade edilse de [120], ölçülen bu mukavemet değerleri elde edilebilecek en yüksek değere yakın kabul edilmiştir. Numunelere 1000°C sıcaklığa kadar ısıl işlem uygulanması ile mukavemet değeri sürekli bir artış göstermektedir. Bu artış çatlakların şiddetli oksitlenme süreci öncesinde oluşan amorf yapıdaki SiO_2 fazı ile sağlanmaktadır. Bu süreç, Si_3N_4 malzemelerine kıyasla çok bileşenli bir yapıya sahip olan SiAlON malzemelerinde çatlak iyileşmesi için gereken miktarda sıvı fazın oluşmasıyla gerçekleşmektedir. D126 grit aşındırıcı ile taşlanan numunelerde tam iyileşme elde edilememesi nedeniyle bu numunelerin mukavemet değerleri düşük bulunmuştur. Buna karşın, D54 grit aşındırıcı ile taşlanan numunelerin mukavemet değerlerinin, yüzeyleri parlatılan numunelerin mukavemet değerlerinden daha yüksek ölçülmesi, mukavemetin tamamen geri kazanıldığını ispatlamaktadır. 1000°C üzerindeki sıcaklıklarda ise mukavemet, şiddetli oksidasyon sürecine bağlı olarak hızlı bir düşüş göstermektedir (Şekil 10.11). Bu düşüş, çatlakları dolduran SiO_2 amorf fazının yüzeye taşınarak kristobalit şeklinde, tane sınırı fazlarının ise $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ şeklinde kristallenmesi ile başlamaktadır. Isıl işlem sıcaklığından (1300°C) oda sıcaklığına soğuma sırasında SiAlON ve yüzeyde oluşan oksit fazlar arasındaki ısıl genleşme katsayıları arasındaki uyumsuzluk ısıl gerilmelere neden olmakta ve mukavemet belirgin bir biçimde azalmaktadır.



Şekil 10.11 (a) D126, (b) D54 grit aşındırıcı ile taşlanmış 25A, (c) D126, (d) D54 grit aşındırıcı ile taşlanmış 25A-SiC numunelerinin ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak değişen mukavemet değerleri

10.4. Sonuçlar

Bu bölümde, SiAlON/SiAlON-SiC matkap uçlarının üretiminde en önemli süreç basamaklarından bir tanesi olan taşlamanın, malzemenin mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Buna ilave olarak taşlama süreci ile yüzeyde oluşan hataların giderilebilmesi için uygulanması gereken ısıl işlem koşullarının ve malzemelerin mikroyapısal özelliklerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanmaktadır:

- Taşlama sürecinde kullanılan aşındırıcının tane boyutuna göre, yüzeyde derinliği 20 μm 'yi bulan çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlaklar malzemenin

mukavemet değerinin yaklaşık olarak %30 oranında azalmasına neden olmaktadır.

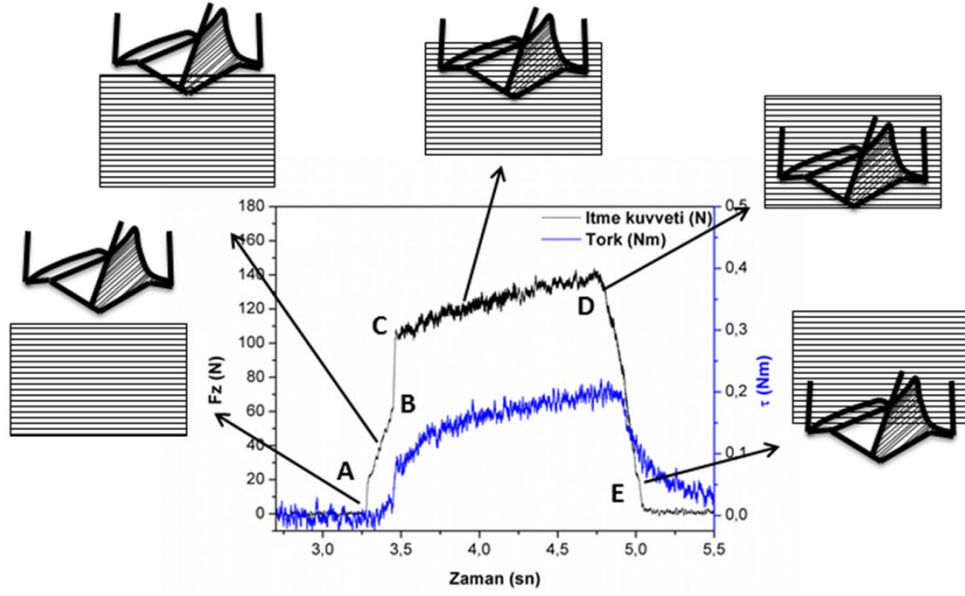
- SiAlON malzemeleri Si_3N_4 esaslı malzemelere kıyasla yaklaşık olarak $200^{\circ}C$ daha düşük sıcaklıklarda çatlak iyileşme özelliği göstermektedirler. Çatlak iyileşme davranışında düşük sıcaklıklarda gerçekleşebilen oksidasyon sonucunda oluşan amorf SiO_2 'nin etkin olduğu düşünölmektedir.
- $1000^{\circ}C$ 'de uygulanan ısıı işlem ile D54 grit aşındırıcı ile taşlanan numune yüzeylerindeki çatlaklar tamamen yok edilirken, D126 grit aşındırıcı ile taşlanan numunelerin mukavemet değerinde belirgin bir artış kaydedilse de, tam iyileşme gerçekleşmemektedir.
- Oksidasyon süreci ile yüzeyde oluşan kristobalit ve $Y_2Si_2O_7$ fazları soğuma sırasında yüzeyde ısıı gerilmeler oluşturmakta ve bunun sonucunda mukavemet değerlerinde belirgin bir azalma kaydedilmektedir.
- Delme testleri için taşlanarak üretilen matkap uçlarının tümüne $1000^{\circ}C$ sıcaklıkta 1 saat süre ile ısıı işlem uygulanması, bu sayede taşlama sonrası meydana gelen mikroçatlakların iyileştirilmesi sağlanacaktır.

11. GEOMETRİ BELİRLEME TESTLERİ SONUÇLARI

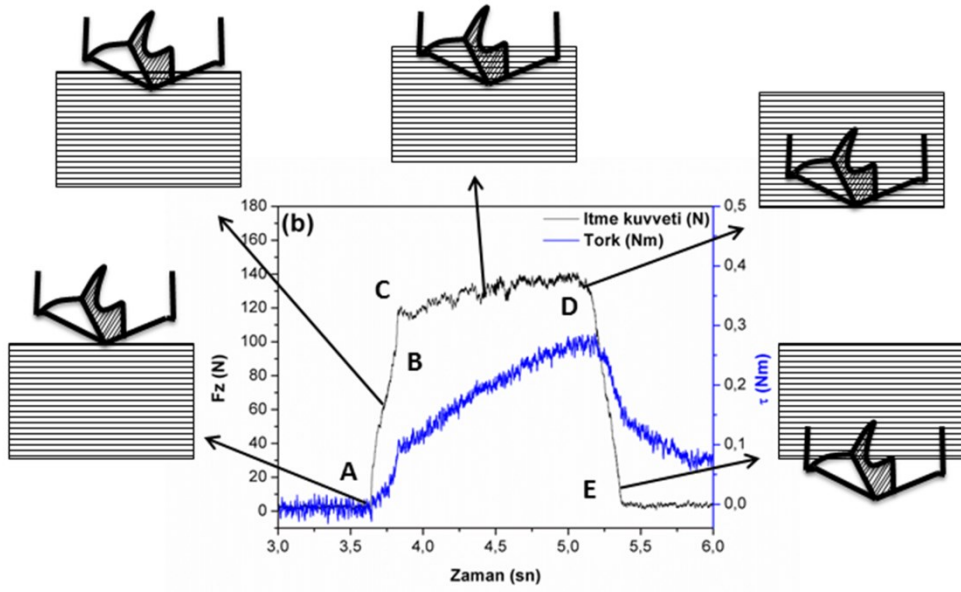
11.1. İtme Kuvveti Analizi

Delme operasyonu sırasında matkap ucu üzerindeki itme kuvveti ve tork, delik kalitesi ve matkap aşınması üzerinde önemli bir etkidir. Bu nedenle, yapılan testlerde kompozit malzemenin delik kalitesi de göz önünde bulundurularak 4 farklı geometriye sahip 25A-SiAlON matkap uçlarının kesme bölgesinde oluşturdukları itme kuvveti ve tork değerleri araştırılmıştır. Delme testlerinde kullanılan kesme koşulları Çizelge 8.4'te verilmektedir.

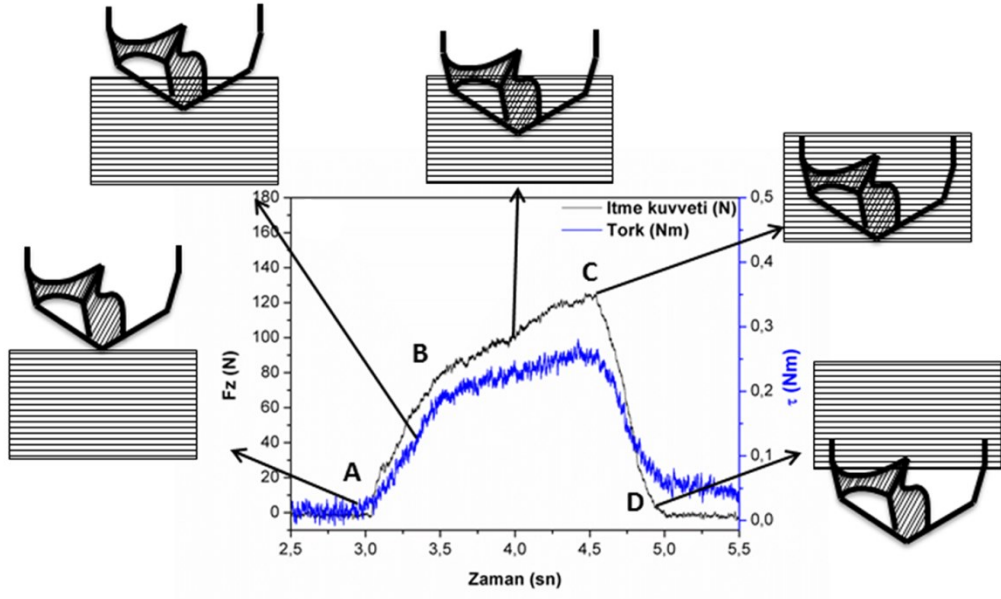
Şekil 11.1-11.4'te sırasıyla G-1, G-2, G-3 ve G-4 geometrilerine sahip matkap uçlarının (Şekil 8.4'te detayları verilmektedir), Test 1 koşullarında ($v=8000$ dev/dk, $f=0,05$ mm/dev) kompozit malzeme içerisinde ilerlemesi ile elde edilen detaylı itme kuvveti ve tork değişimleri verilmektedir. Kompozit malzemede farklı yönlerde konumlanan fiberler nedeniyle kuvvet, matkap ucu kompozit malzeme içerisinde ilerlerken geniş bir aralıkta salınım göstermektedir. Matkap uçlarının kesici ağızlarının sahip olduğu geometrik detaylar (keski kenar uzunluğu, marjin genişliği vb.) ve nokta açıları itme kuvvetlerini belirlemektedir. Matkap ucu kompozit malzemeye temas eder etmez bütün matkap uçları için kuvvette ani bir artış meydana gelmektedir (A). Matkap ucu kompozit malzeme içerisinde ilerledikçe, nokta açısı sabit olduğundan kuvvet doğrusal bir şekilde artış göstermektedir (B-C). G-1 geometrisinde daha geniş olmak olmakla beraber, G-1 ve G2 geometrilerinde kesici ağızların en dış bölümlerinde delik yüzeyini temizlemek üzere tasarlanmış kesici bölümler bulunmaktadır. Bu bölümlerin kompozit malzemenin yüzeyine temas etmesiyle, temas alanında ani bir artış kaydedilmiştir (Şekil 11.1 ve 2'de B-C). G-3 geometrisinde bu temizleyici bölümler yerine, nokta açısını azaltan taşlanmış bir dış kenar bulunmaktadır. Bu bölüm kompozit malzemeye temas ettiğinde nokta açısının azalmasıyla kuvvet eğrisinin eğimi de aksi yönde azalmaktadır (Şekil 11.3'te B-C bölümü). G-4 matkap ucu ise, standart geometride bir burgulu matkap ucu olup delik kalitesinin artırılmasına yönelik bir geometrik tasarım barındırmadığından kuvvet eğrisinde bir eğim değişimi görülmemektedir.



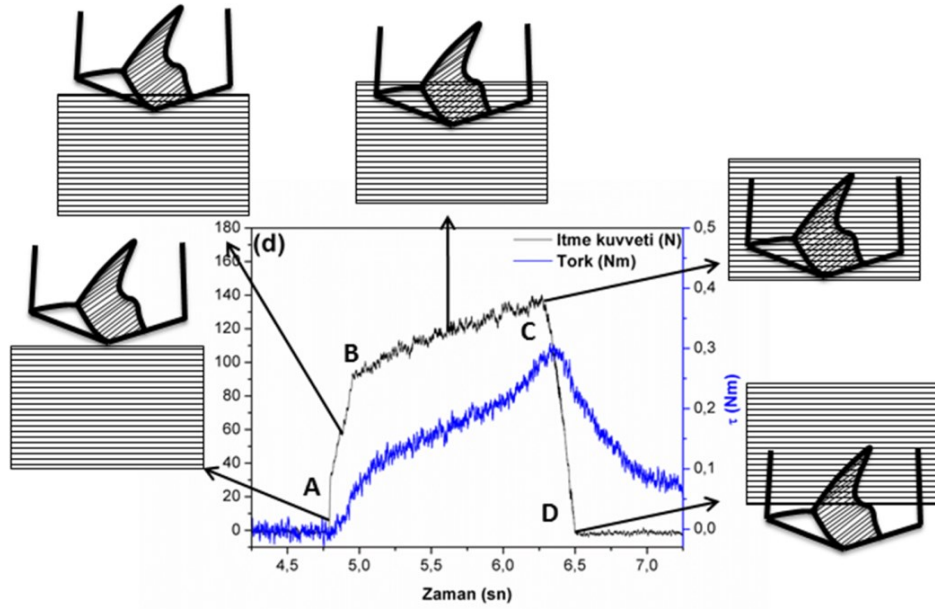
Şekil 11.1. G-1 geometrisine sahip SiAlON (25A) matkap ucunun Test 1 koşullarında ($V = 8000$ dev/dk, $f = 0,05$ mm/dev.) oluşturduğu itme kuvveti ve tork değişimi



Şekil 11.2. G-2 geometrisine sahip SiAlON (25A) matkap ucunun Test 1 koşullarında ($V = 8000$ dev/dk, $f = 0,05$ mm/dev.) oluşturduğu itme kuvveti ve tork değişimi



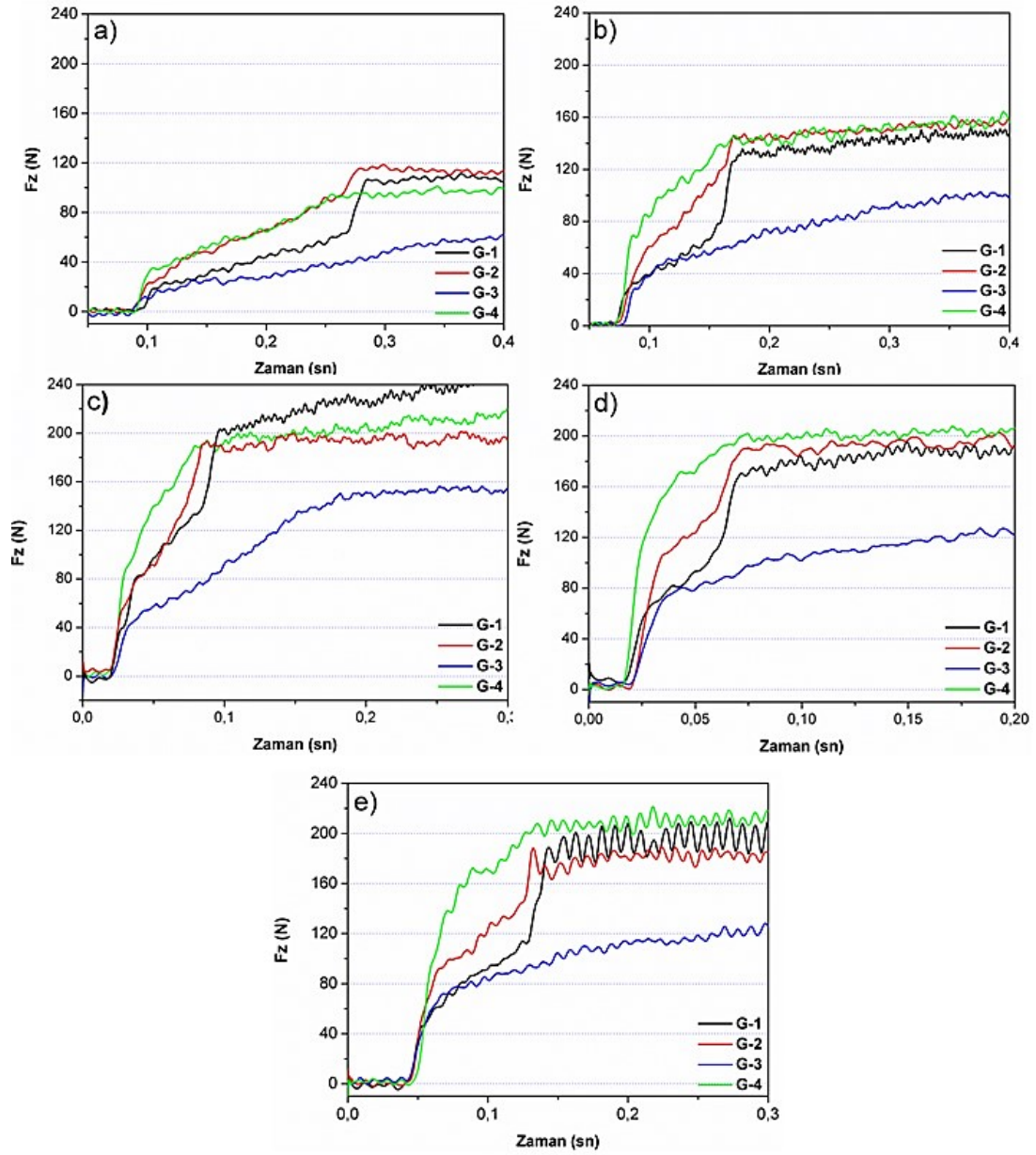
Şekil 11.3. G-3 geometrisine sahip SiAlON (25A) matkap ucunun Test 1 koşullarında ($V = 8000$ dev/dk, $f = 0,05$ mm/dev.) oluşturduğu itme kuvveti ve tork değişimi



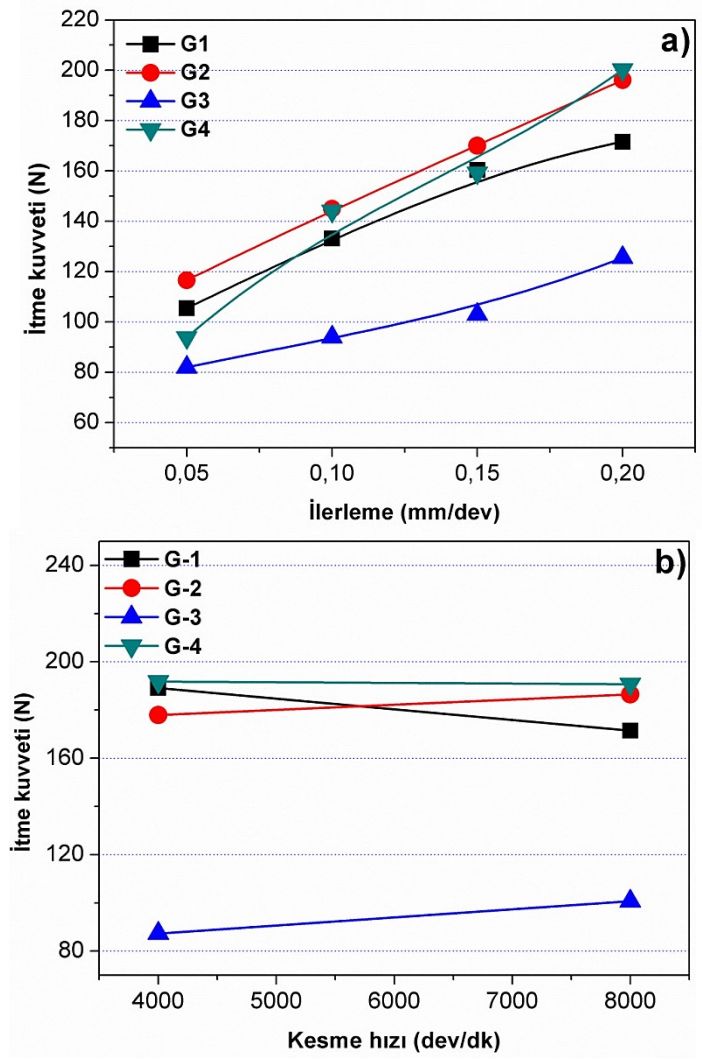
Şekil 11.4. G-4 geometrisine sahip SiAlON (25A) matkap ucunun Test 1 koşullarında ($V = 8000$ dev/dk, $f = 0,05$ mm/dev.) oluşturduğu itme kuvveti ve tork değişimi

Şekil 11.5'te her bir test için matkap uçlarının oluşturmuş olduğu itme kuvvetlerinin değişimleri kıyaslamalı olarak verilmektedir. G-1 geometrisi 120° nokta açısı ile malzeme içerisinde ilerlerken düşük itme kuvvetleri oluşturmaya rağmen, en dış bölümde yer alan delik yüzeyini temizleyici kenarların malzemeye temas etmesiyle kuvvetlerde belirgin bir artış kaydedilmektedir. Birincil kesme kenarlarının kompozit yüzeyine tamamen gömülmesi ile delaminasyonu belirleyen maksimum kuvvet, G-2 ve G-4 matkap uçlarının kuvvet değerleriyle benzer seviyelere gelmektedir. Nokta açısı 130° olan G-2 geometrisinde kuvvetler, G-1 geometrisine kıyasla bir miktar daha fazla olmakta, nokta açısı 140° olan G-4 geometrisinde ise en yüksek değerini almaktadır. G-3 geometrisinin keski kenar uzunluğunun düşük olması, nokta açısının 120° olduğu kesme kenarı boyunca itme kuvvetini düşük seviyede tutmuş, nokta açısının 30°'ye düştüğü en dış kenar ise kuvvet artış hızının daha da düşmesini sağlamıştır. Delaminasyonun en önemli nedenlerinin başında gelen itme kuvvetinin G-3 geometrisinde düşük olması, bu geometriye belirgin bir avantaj sağlamaktadır.

Delme sırasında oluşan delaminasyonun, matkap ucu üzerine etkiyen en yüksek itme kuvveti tarafından belirlendiği Jian ve ark. tarafından ifade edilmektedir [31]. Kuvvet grafiklerinden belirlenen en yüksek itme kuvveti değerlerinin test koşullarına göre değişimi Şekil 11.6'da verilen grafikte özetlenmektedir. Pek çok çalışmada da belirtildiği gibi [2,20-22], ilerleme miktarındaki artışın kesme bölgesinde oluşan itme kuvvetlerinin doğrusal olarak artmasına neden olduğu, yapılan testler sonrasında doğrulanmıştır (Şekil 11.6a). Kesme hızının ise oluşan itme kuvvetleri üzerinde belirleyici bir etkisi olmadığı ve çok yüksek hızlarda matris malzemenin yumuşamasına neden olup aksi yönde kuvvetlerin azalmasını sağladığı ifade edilmektedir [20-22]. Şekil 11.6b'de Test 4 ve Test 5 sonrasında elde edilen kuvvetlerin yaklaşık olarak birbirlerine eşit olması, kesme hızının itme kuvvetleri üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığını göstermektedir.



Şekil 11.5. (a) Test 1 ($V= 8000$ dev/dk, $f= 0,05$ mm/dev), (b) Test 2 ($V= 8000$ dev/dk, $f= 0,10$ mm/dev), (c) Test 3 ($V= 8000$ dev/dk, $f= 0,15$ mm/dev), (d) Test 4 ($V= 8000$ dev/dk, $f= 0,20$ mm/dev) ve (e) Test 5 ($V= 4000$ dev/dk, $f=0,20$ mm/dev) koşullarında matkap uçları üzerinde oluşan itme kuvvetlerinin değişimi

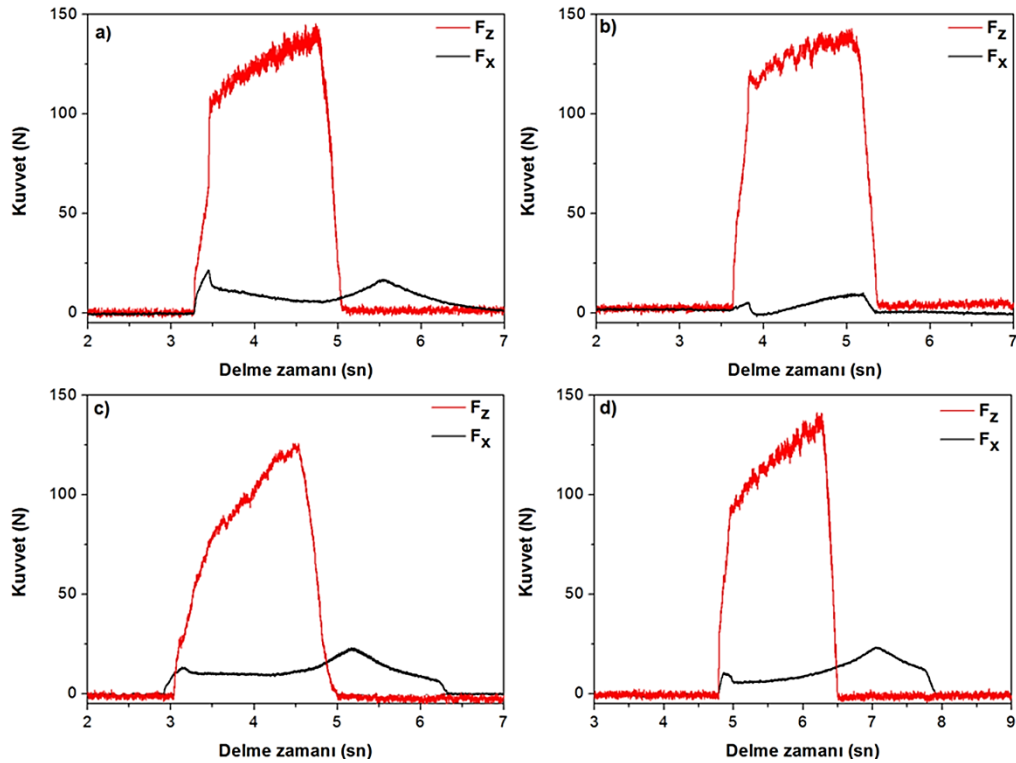


Şekil 11.6. G-1, G-2, G-3 ve G-4 geometrilerindeki SiAlON matkap uçlarında (a) ilerleme ve (b) kesme hızı ile itme kuvvetinin değişimi

11.2. Eksenel Kuvvet Analizi

Matkap ucu ilerleme yönüne dik olan kompozit plaka düzleminde oluşan kuvvetler, delaminasyon üzerinde etkili olmadığından, genellikle ihmal edilirler. Ancak, delme torkunu oluşturan bu kuvvetler matkap ucunun dönme hareketi sırasında titreşim ya da uç taşlama hataları ile oluşan salınımlar hakkında bilgi vermektedir. Şekil 11.7’de matkap uçlarının Test 1 koşullarında oluşturdukları kesme (F_x) ve itme kuvvetlerinin (F_z) değişimleri verilmektedir. Matkap uçları kompozit malzemeye temas ettikleri anda hem itme kuvvetlerinde hem de kesme

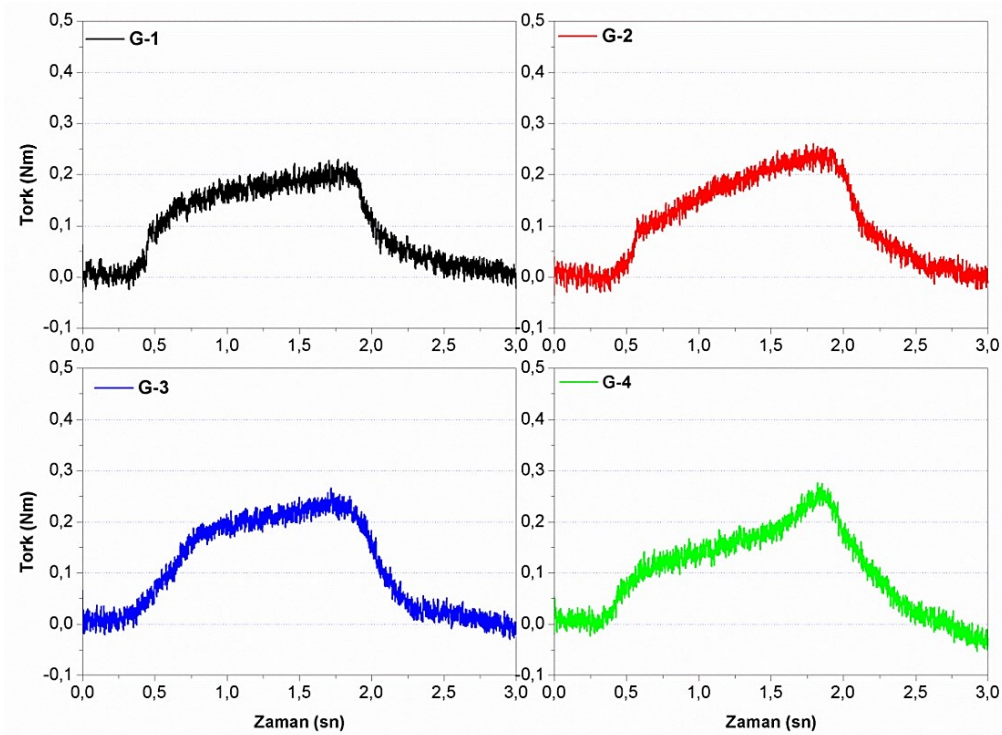
kuvvetlerinde belirgin bir artış görülmektedir. Kesme kuvvetlerinde görülen artış ucun geometrik detaylarına göre belirlenmektedir. G-1 geometrisinde en dış bölümde yer alan kesici kenarların varlığı kompozit plakada önemli bir dönme kuvveti oluşturduğundan maksimum kesme kuvveti bu matkap ucu için diğer geometrilere kıyasla daha yüksektir (Şekil 11.7a). Matkap uçlarının kesici ağızları kompozit malzemeye gömüldüğünde kesme kuvvetlerinin sabit kalması beklenmektedir. Buna karşın, G-1 geometrisinin kesme kuvvetlerinin azalması, en dış bölümde bulunan kesici ağızlardaki aşınmadan kaynaklanmaktadır. Matkap ucunun en uç noktasının malzemeyi terk etmeye başlamasıyla itme kuvvetleri azalmakta, kesme kuvvetleri ise artış göstermektedir. Bu davranış, torku oluşturan en dış bölümlerin halen malzeme içinde bulunması ile açıklanmaktadır. Matkap ucu tamamen kompozit malzemeyi terk ettiğinde ise kesme kuvvetleri de sıfıra yaklaşmaktadır. Bu durum, taşlama kaynaklı geometrik hata miktarının ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir.



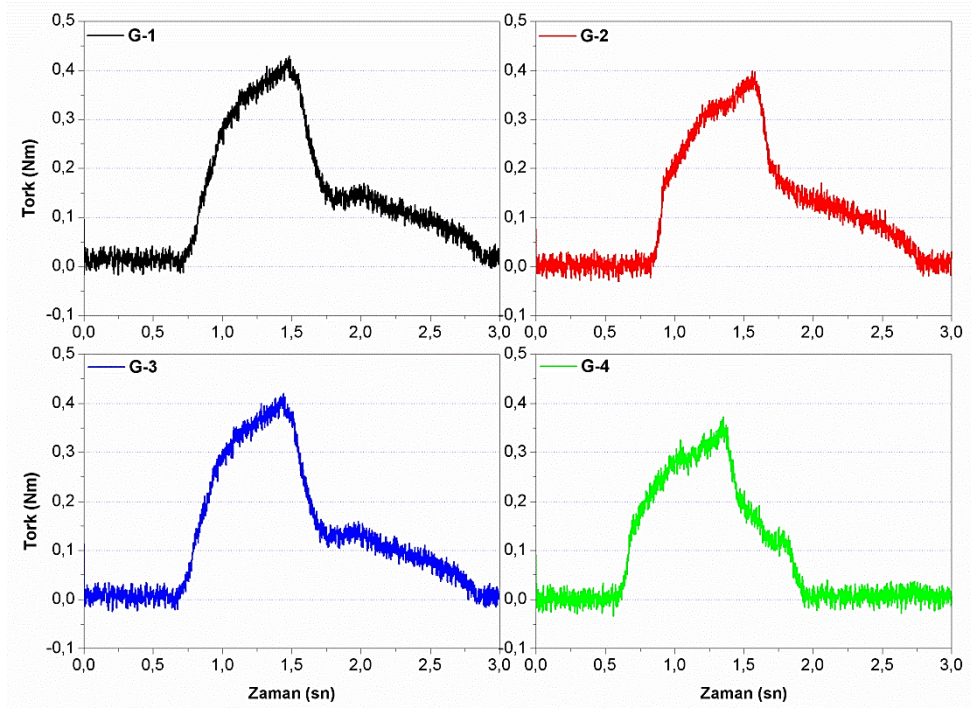
Şekil 11.7. (a) G-1, (b) G-2, (c) G-3 ve (d) G-4 geometrilerine sahip uçların Test-1 koşullarında oluşturdukları itme kuvvetleri ve eksenel kesme kuvvetleri

11.3. Tork Analizi

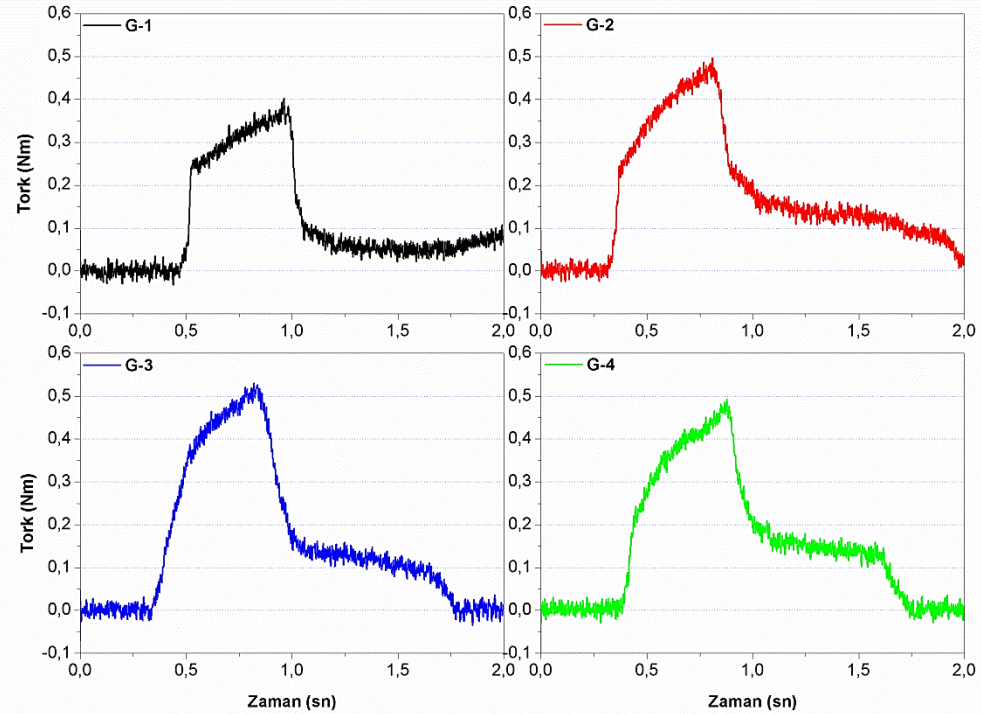
Şekil 11.8-11.12’de testler sırasında matkap uçlarının kesme bölgesinde oluşturdukları tork değerlerinin grafikleri verilmektedir. Kesme sırasında oluşan tork değerleri itme kuvvetleri gibi, matkap ucunun birincil kesme kenarlarının delik içerisinde kademeli ilerleyişiyle birlikte artış göstermektedir. Bu artış, yalnızca matkap ucunun birincil kesme kenarlarının tam penetrasyonu ile sınırlı kalmayıp, en uç noktasının delik çıkışına ulaşmasına kadar devam etmektedir. Kuvvet grafiklerinden farklı gözlemlenen bu durum, matkap ucunun delik içerisine penetrasyonu ile ikincil kesme kenarlarının temas yüzeyinin ve dolayısıyla sürtünme kuvvetlerinin artmasından kaynaklanmaktadır. Eksenel kuvvetlerle birlikte, tork değerlerinin analizi ile matkap ucunun taşlama hatalarının belirlenebilmesi mümkündür. Buna göre, tork grafiklerinin delik açıldıktan sonra sıfır değerine düşmesi taşlama hatalarının ihmal edilebilir düzeylerde olduğunu göstermektedir.



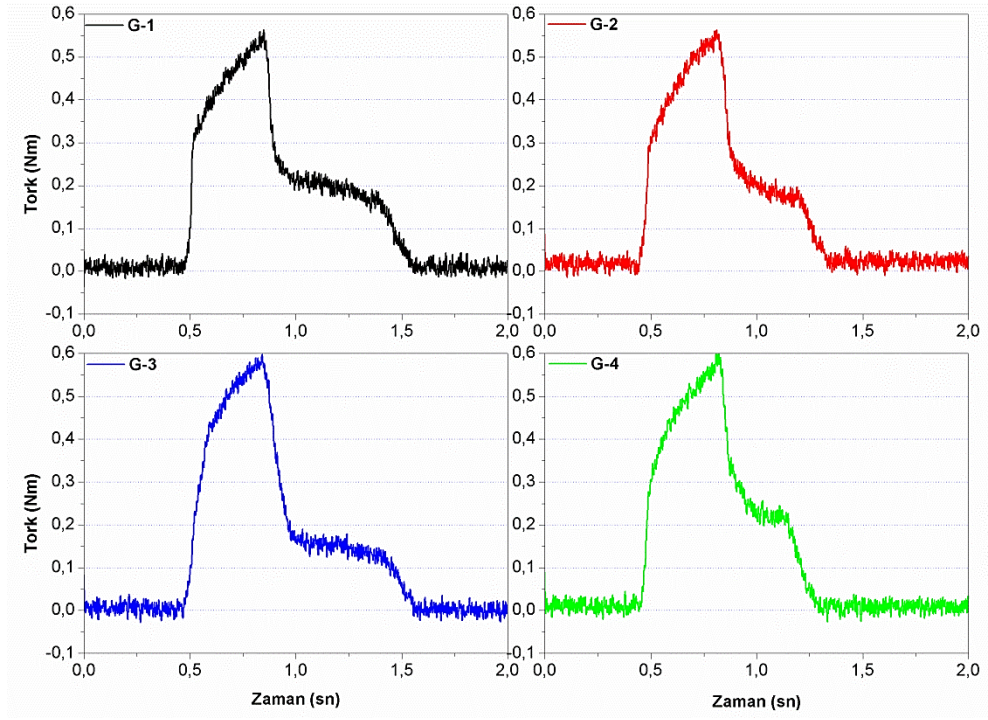
Şekil 11.8. Test 1 ($V=8000$ dev/dk, $f=0,05$ mm/dev) sırasında matkap uçlarının oluşturmuş olduğu tork değerleri



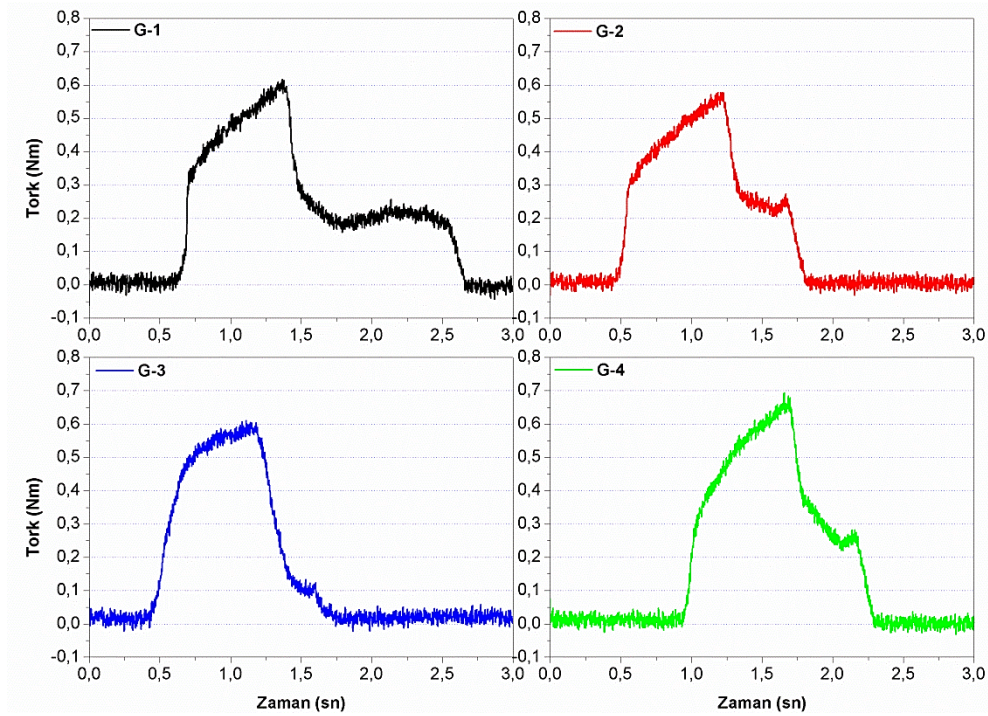
Şekil 11.9. Test 2 ($V= 8000$ dev/dk, $f= 0,10$ mm/dev) sırasında matkap uçlarının oluşturmuş olduğu tork değerleri



Şekil 11.10. Test 3 ($V= 8000$ dev/dk, $f= 0,15$ mm/dev) sırasında matkap uçlarının oluşturmuş olduğu tork değerleri

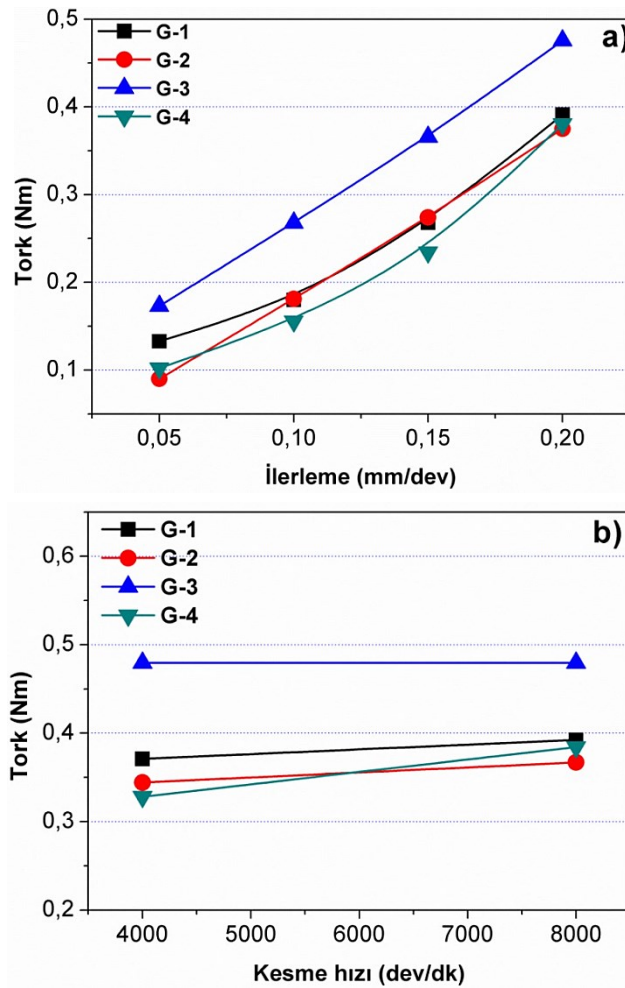


Şekil 11.11. Test 4 ($V= 8000$ dev/dk, $f= 0,20$ mm/dev) sırasında matkap uçlarının oluşturmuş olduğu tork değerleri



Şekil 11.12. Test 5 ($V= 4000$ dev/dk, $f= 0,20$ mm/dev) sırasında matkap uçlarının oluşturmuş olduğu tork değerleri

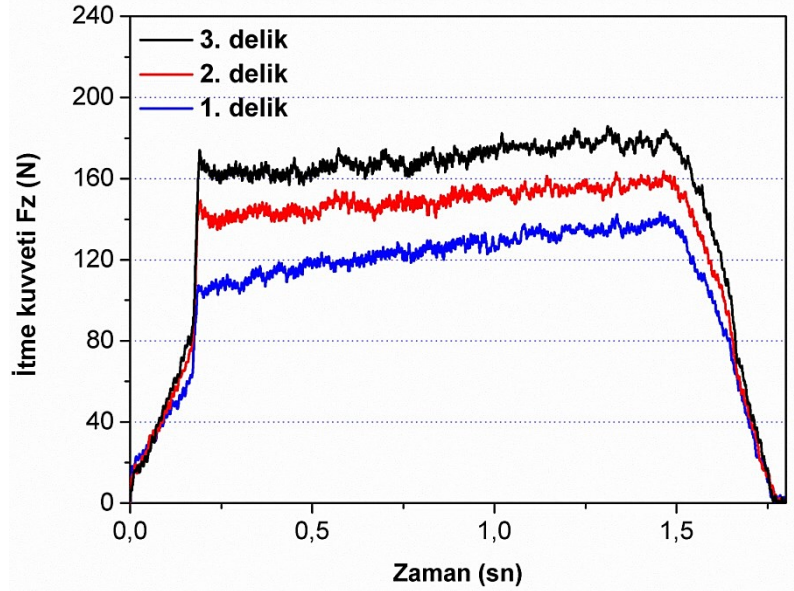
Gerçekleştirilen testler sonucunda matkap uçlarının kompozit malzeme üzerinde oluşturmuş oldukları en yüksek tork değerlerinin kıyaslaması Şekil 11.13'te özetlenmektedir. Matkap uçları arasında en düşük itme kuvveti oluşturan G-3 matkap ucunda tork değeri, nokta açısının azalmasıyla (ortogonal talaş açısının artmasına bağlı olarak [34]) en yüksek ölçülmüştür (Şekil 11.13a). Düşük nokta açısı itme kuvvetinin düşmesini sağlarken, matkap ucunun kompozit malzeme ile temas yüzeyini arttırmakta ve oluşan tork değerinin artmasına neden olmaktadır. Diğer matkap uçlarının tork değerleri ise itme kuvvetlerinde olduğu gibi birbirlerine yakındır. Kesme hızının, itme kuvvetlerine benzer şekilde, tork üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı Şekil 11.13b'de verilen doğrusal grafikte görülmektedir.



Şekil 11.13. G-1, G-2, G-3 ve G-4 geometrilerindeki SiAlON matkap uçlarında (a) ilerleme ve (b) kesme hızı ile itme kuvvetinin değişimi

11.4. Uç Aşınması

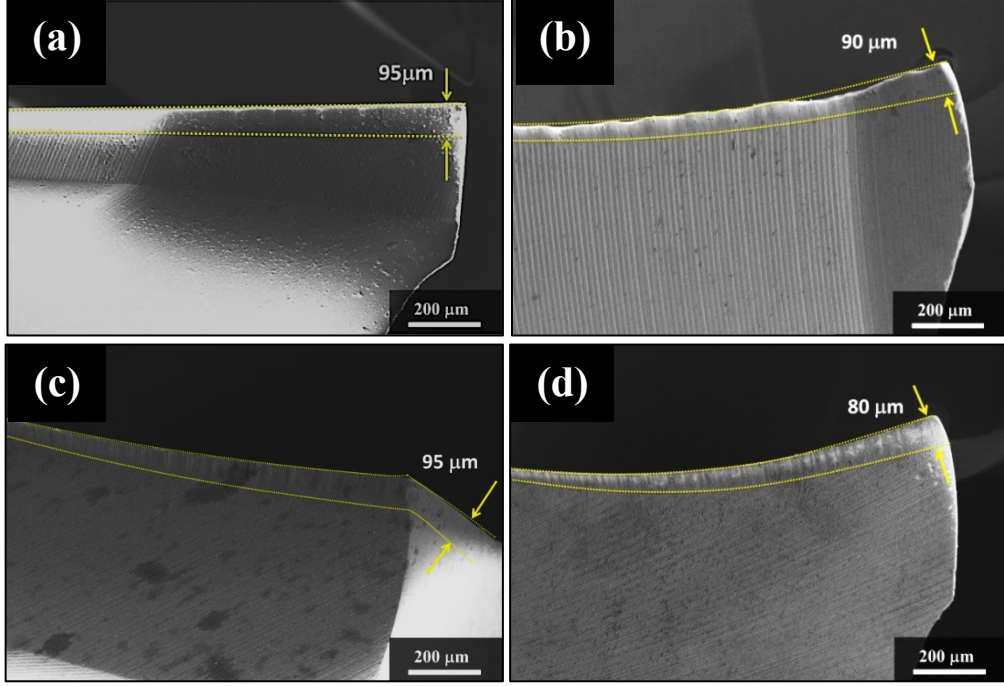
SiAlON matkap uçları için uygun olan geometrinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen testlerde her bir kesme koşulu için 3 adet delik açılmıştır. Şekil 11.14'te Test-1 koşullarında 1, 2 ve 3. deliklerin açılması sırasında, G-1 matkap ucunun oluşturmuş olduğu itme kuvvetleri verilmektedir. 1. delikte matkap ucunun malzeme ile temasından itibaren itme kuvvetinde sürekli bir artış görülmekte, bu durum 2. ve 3. deliklerde azalarak devam etmektedir. 1. delikte matkap ucuna etkiyen maksimum itme kuvveti yaklaşık 140, 2. delikte 160 ve 3. delikte 180 N olarak ölçülmüştür.



Şekil 11.14. Test 1 koşullarında açılan 3 delikte G-1 matkap ucu üzerinde oluşan itme kuvvetlerinin değişimi

Şekil 11.15'te verilen SEM görüntülerindeki matkap uçlarının keski kenarları ve birincil kesme kenarlarında meydana gelen aşınmalar, itme kuvvetinde gözlemlenen bu artışa neden olmaktadır. Bu nedenle, yalnızca matkap ucu geometrik unsurlarına bağlı olan itme kuvvetinin belirlenmesinde uçta aşınma

meydana gelmeden önce, matkap ucunun kompozit malzemeye temas ettikten ilk birkaç tur sonra ile elde edilen veriler dikkate alınmıştır.



Şekil 11.15. Test 1 sonrasında (a) G-1, (b) G-2, (c) G-3 ve (d) G-44 matkap uçlarının kesme kenarlarının SEM görüntüleri

11.5. Delik Kalitesi

Delaminasyon, delme sürecinde matkap ucunun kompozit malzeme üzerine uyguladığı itme kuvvetleri tarafından belirlenmektedir. Bu nedenle, kompozit malzemelerde delme sırasında oluşan delaminasyon için kritik itme kuvveti, ucun geometrik özelliklerine göre değişmektedir [33,40,41,18]. Farklı matkap ucu geometrileri için geliştirilen kritik itme kuvveti modelleri (Çizelge 4.1) ve bu çalışmada kullanılan UD-CFRP kompozit malzemenin ilgili eşitliklerde geçen mekanik özellikleri (Çizelge 9.3) kullanılarak, delaminasyona neden olan kritik itme kuvveti hesaplanmıştır. Delaminasyonun gerçekleştiği tabaka kalınlığının $h=0,140$ mm ve delaminasyon yarıçapının matkap yarıçapına oranının $R_t/R_{dt}=0,5$

kabul edilirse delaminasyon için kritik itme kuvveti Eşitlik 4.1'e göre aşağıdaki gibidir:

$$F_{crit} = \pi \left[\frac{8G_{IC}E_1h^3}{3(1-\nu_{12}^2)} \right]^{1/2}$$

$$F_{crit} = \pi \left[\frac{8 \times 500 \left(\frac{J}{m^2} \right) \times 17,5 \cdot 10^9 (Pa) \times (0,140 \cdot 10^{-3} (m))^3}{3(1-0,25^2)} \right]^{1/2}$$

$$F_{crit} = 25,96 N$$

Hesaplanan bu kritik itme kuvveti standart bir burgulu matkap ucu için geçerli olup, farklı uç geometrileri kullanıldığında bu değer belirlenir bir katsayı ile çarpılması gerekmektedir (Çizelge 4.1). G-4 geometrisi standart bir burgulu matkap ucu geometrisine benzer özelliklere sahip olduğu için 25,96 N, bu matkap ucu için yaklaşık bir kritik itme kuvveti değeri olarak kabul edilebilir. G-1 ve G-2 geometrileri ise kesme kenarının en dış bölümünde yer alan bölümleri ile slot tipi bir matkap ucunda olduğu gibi dairesel yükler oluşturmaktadır. Hem konsantre, hem de dairesel yükler oluşturan Brad tipi matkap uçlarına benzeyen G-1 ve G-2 geometrileri için kritik itme kuvvetinin, standart bir matkap ucu için kritik itme kuvveti ve slot tipi bir matkap ucu için kritik itme kuvvetinin arasında bir değer olduğu düşünülmektedir. Buna göre, slot tipi bir matkap ucu için kritik itme kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$F_{CSL} = \frac{1}{\sqrt{1-2S^2+S^4}} F_{CT} \quad S = \frac{R_t}{R_{dl}} = 0,5$$

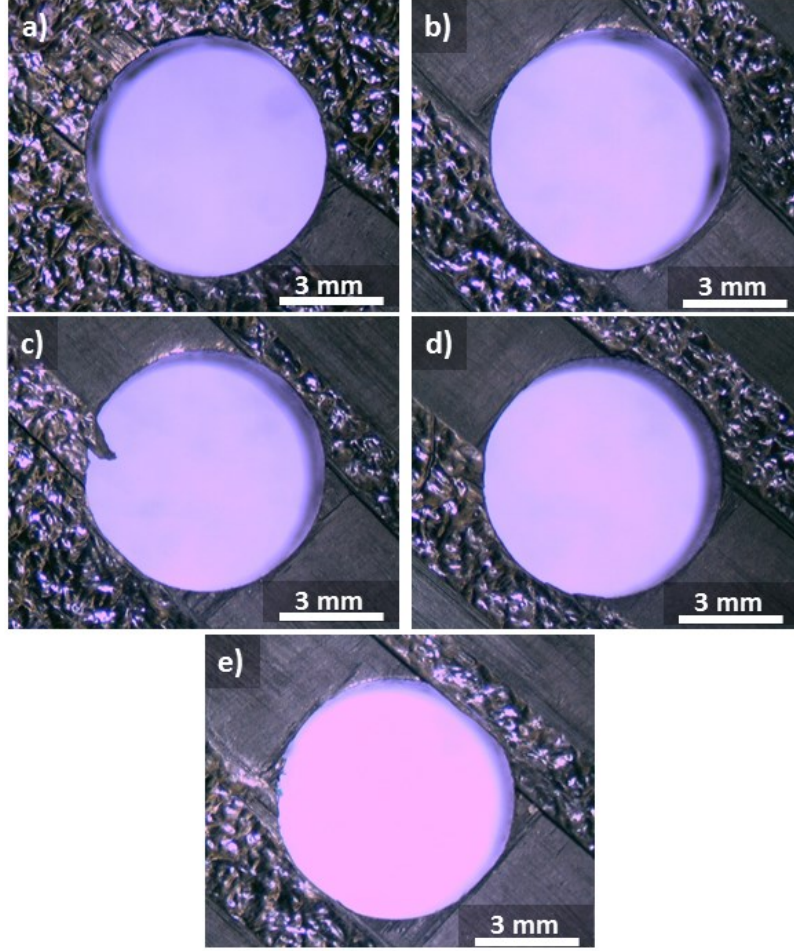
$$F_{CSL} = \frac{1}{\sqrt{1-2(0,5)^2+(0,5)^4}} \times 25,96$$

$$F_{CSL} = 34,60 N$$

Yapılan bu hesaplamalar Brad tipi bir matkap ucu için (G-1 ve G-2) kritik itme kuvvetinin 25,96 ile 34,60 N arasında bir değer aldığını ($25,96N < F_{crit} < 34,6N$) göstermektedir. Bulunan bu değer, deneysel veriler ile (bütün kesme koşullarında 80 ile 200 N arasında değişmektedir) karşılaştırıldığında, bu çalışmada kullanılan farklı geometrilere sahip matkap

uçlarının tamamı için kritik delaminasyon kuvvetinin aşıldığı sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak, seçilen kesme parametrelerinde oluşan itme kuvveti değerleri, F_{crit} değerinin üzerinde olduğundan bütün deliklerde delaminasyon oluşması beklenen bir sonuçtur.

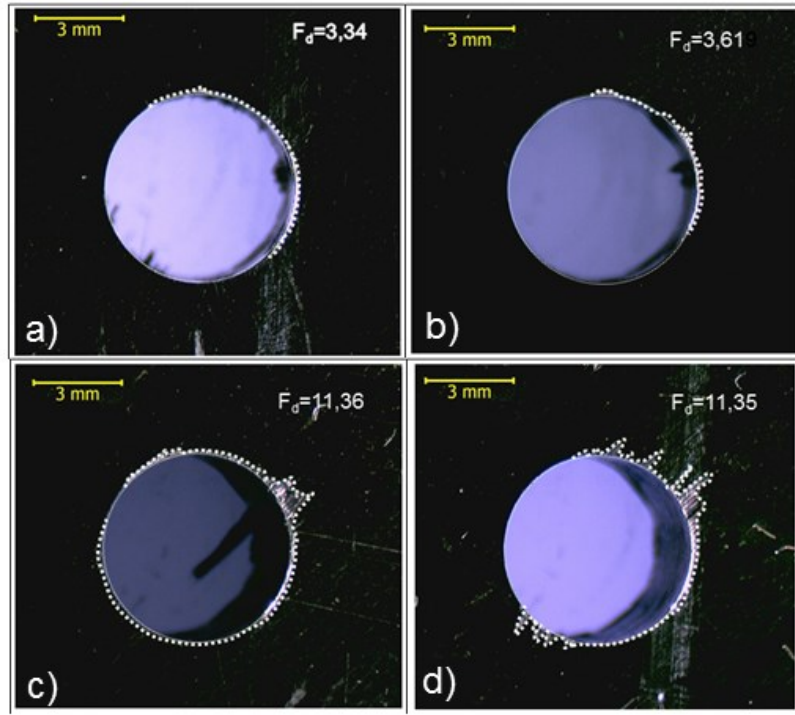
Delik çıkışında meydana gelen delaminasyon (push-out delaminasyonu), delik girişinde meydana gelen delaminasyona (peel-up delaminasyonu) kıyasla itme kuvvetlerine daha duyarlıdır. Oluşan delaminasyon miktarında ise itme kuvveti ve matkap ucu özellikleri kadar, kompozit malzemenin fiber dağılımı da önemli bir etken durumundadır. Örgü yapıdaki (woven-ply) kompozit plakalar fiberlerin birbiri üzerinde örülmesiyle, delaminasyona karşı daha dirençli olmakta ve oluşan delaminasyonun miktarı mikroskobik yöntemlerle daha kolay analiz edilebilmektedir. Eş yönlü (UD-CFRP) kompozit plakalarda ise delik çıkışındaki tabakalar yalnızca epoksi matris tarafından birbirlerine bağlandıklarından, delaminasyon matris malzemenin özelliklerine de bağlıdır. Bu noktada, matkap ucunun oluşturduğu itme kuvvetinden çok, ucun fiberleri kesme açısı belirleyici olmaktadır. Şekil 11.16'da G-1 matkap ucu ile gerçekleştirilen kuvvet ölçüm testleri sonucunda açılan deliklerin çıkış görüntüleri verilmektedir. Artan ilerleme hızı ile doğrusal bir değişim gösteren itme kuvvetinin, deliklerde aynı fiber yönlerinde ($\sim 45^\circ$) ve benzer miktarlarda oluşan delaminasyon miktarlarından bağımsız olduğu görülmektedir (Şekil 11.16). Delik çıkışında gerçekleşen delaminasyonun itme kuvveti ile ilişkilendirilmesindeki zorluk nedeniyle itme delaminasyonu yerine, delik girişinde gerçekleşen delaminasyon miktarının matkap ucu geometrik yapısı ile ilişkilendirilmesi daha uygun bulunmuştur.



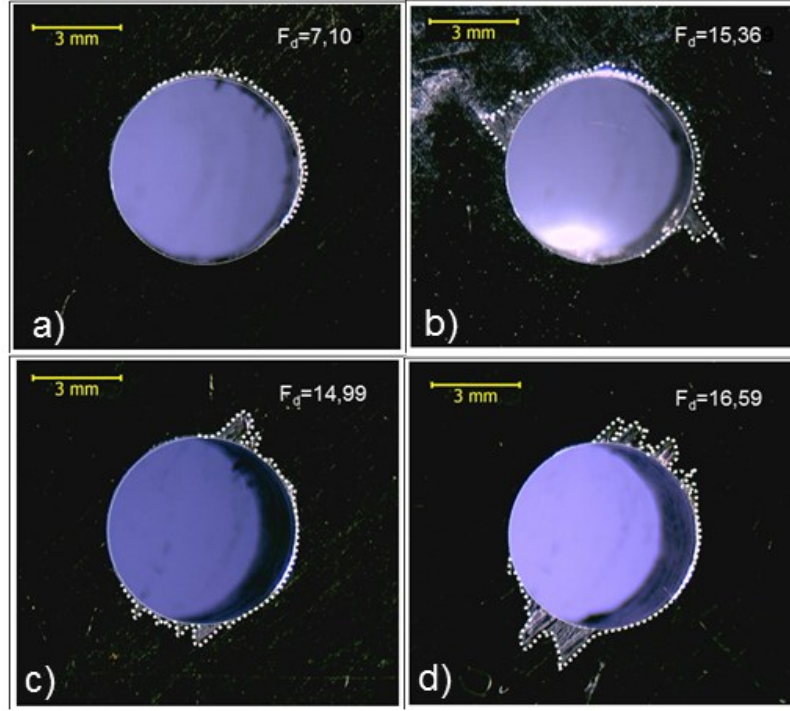
Şekil 11.16. G-1 matkap ucunun (a) Test-1, (b) Test-2, (c) Test-3, (d) Test-4 ve (e) Test-5 koşullarında oluşan delik çıkışı delaminasyonları

Şekil 11.17-11.20’de sırasıyla G1, G2, G3 ve G4 matkap uçlarıyla, değişen ilerleme hızlarında açılan deliklerin giriş görüntüleri ve Eşitlik 3.2 kullanılarak hesaplanan delaminasyon faktörleri verilmektedir. G-1 geometrisine sahip matkap ucunda 0,10 mm/dev ilerleme hızına kadar delik girişlerinde belirgin bir hasar oluşmazken ($F_d \cong 3$), hızın bu değeri aşmasıyla delik etrafında belirgin bir delaminasyon bölgesi ($F_d \cong 11$) meydana gelmektedir. G-2 geometrisi için delaminasyon miktarı, G-1 geometrisine kıyasla daha fazla olmaktadır. 0,05 mm/dev ilerleme hızında delaminasyon $F_d \cong 7$ iken, hızın artmasıyla bu miktar da iki kat artmış, daha yüksek hızlarda ise değişmemiştir. G-3 geometrisinin delme sırasında oluşturduğu düşük itme kuvvetleri, delaminasyon miktarının da düşük olmasını sağlamaktadır. Buna rağmen, bu matkap ucu ile

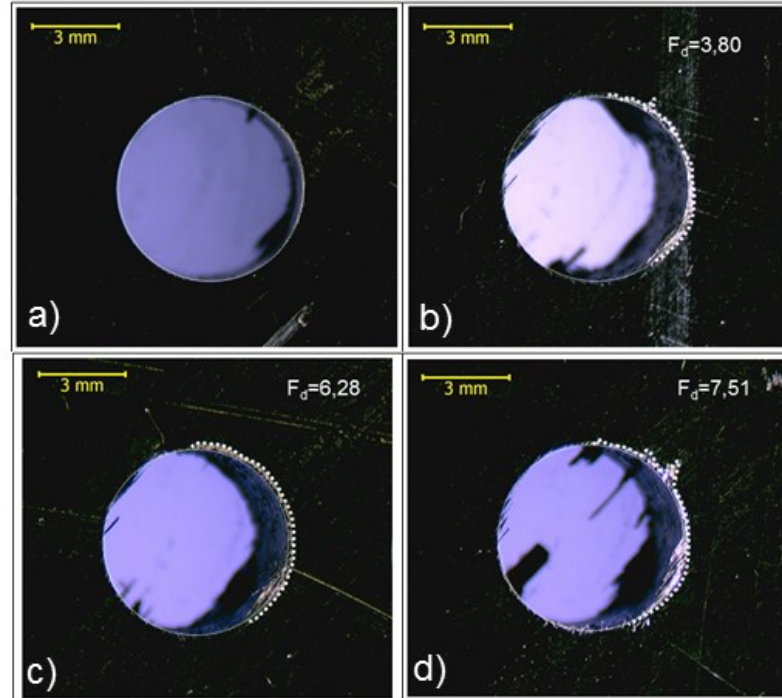
açılan deliklerin çıkışlarında kesilmeden kalan fiberlerin miktarlarının fazla olması delik kalitesini düşürmektedir. G-4 matkap ucu, oluşan yüksek itme kuvvetleri ve sahip olduğu geometrik yapıya bağlı olarak delik çevresinde yüksek oranda delaminasyon oluşumuna neden olmaktadır. Bütün matkap uçları için elde edilen delaminasyon miktarlarının test koşullarına göre değişimi Şekil 11.21’de özetlenmektedir.



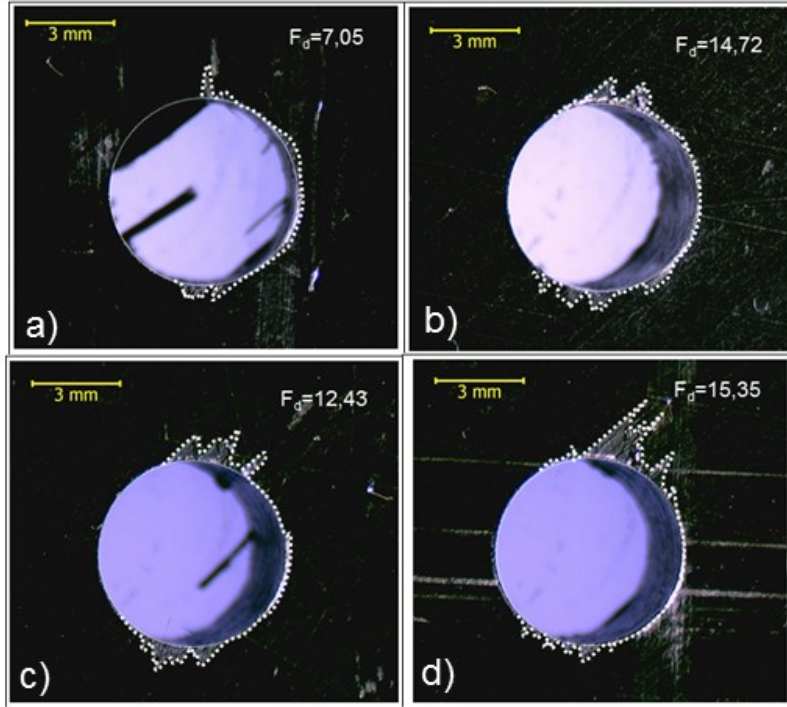
Şekil 11.17. G-1 matkap ucu ile (a) Test-1, (b) Test-2, (c) Test-3 ve (d) Test-4 koşullarında açılan delik giriş görüntüleri



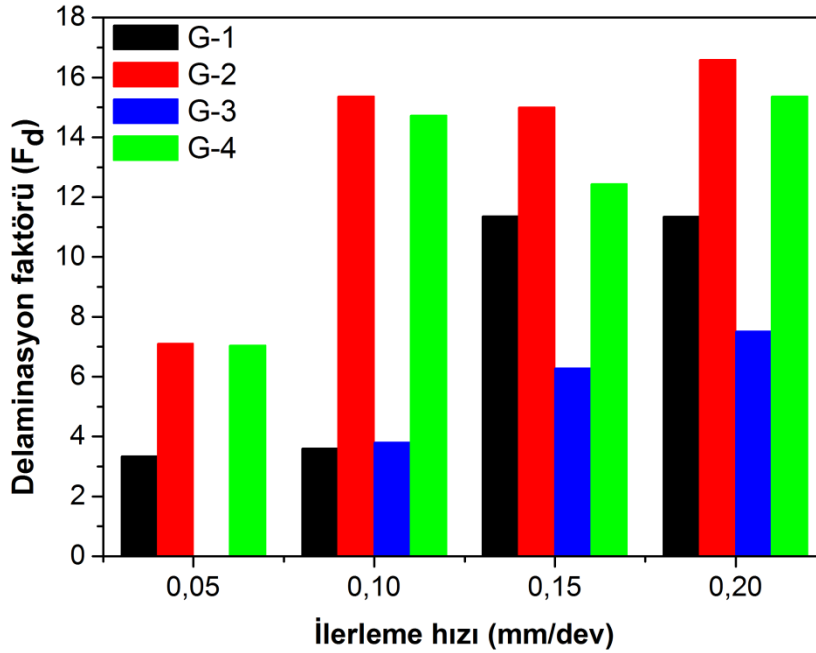
Şekil 11.18. G-2 matkap ucu ile (a) Test-1, (b) Test-2, (c) Test-3 ve (d) Test-4 koşullarında açılan delik görüntüleri



Şekil 11.19. G-3 matkap ucu ile (a) Test-1, (b) Test-2, (c) Test-3 ve (d) Test-4 koşullarında açılan delik görüntüleri



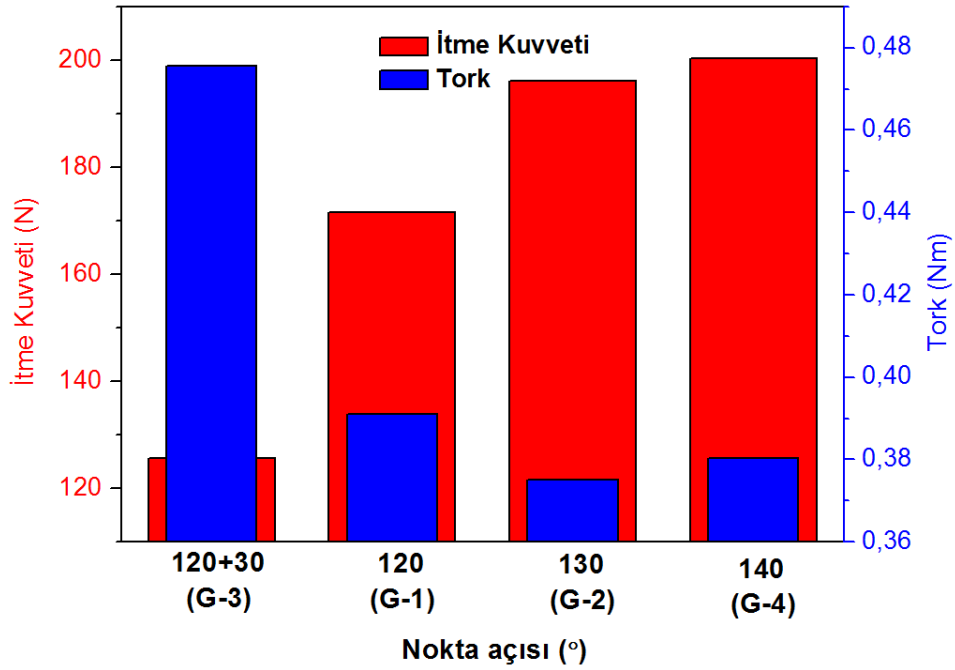
Şekil 11.20. G-4 matkap ucu ile (a) Test-1, (b) Test-2, (c) Test-3 ve (d) Test-4 koşullarında açılan delik görüntüleri



Şekil 11.21. G-1, G-2, G-3 ve G-4 matkap uçlarının değişen ilerleme hızları ile oluşturdukları delik kaliteleri

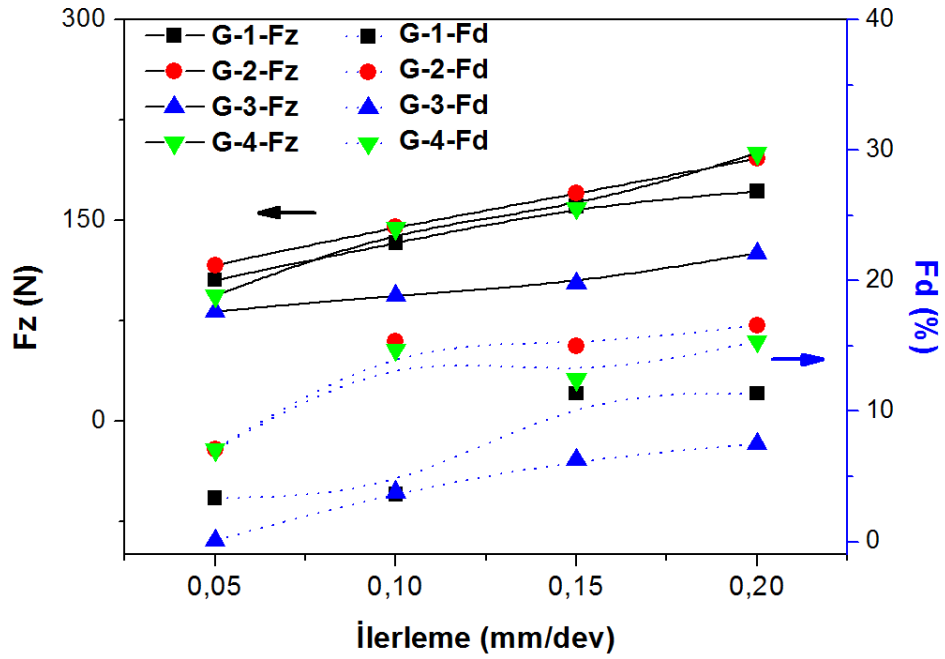
11.6. Sonuçlar

Delaminasyon, delme sırasında matkap ucunun kompozit malzeme içerisinde ilerlemesiyle oluşan kuvvetlere bağlı olarak meydana gelmektedir. G-1, G-2, G-3 ve G-4 matkap uçlarının her birinin birden fazla farklı geometrik değişken barındırması matkap ucu geometrik detaylarının itme kuvvetleri ve tork üzerine olan etkilerinin net bir şekilde ortaya konulmasını güçleştirmektedir. Ancak, nokta açısı, kuvvet ve tork değerleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğundan dikkate alınması gereken en önemli geometrik unsurdur. şekil 11.22’de, nokta açısına göre değişen itme kuvveti ve tork değerleri özetlenmektedir. Bu değerler üzerinde nokta açısının dışında, diğer geometrik değişkenlerin de katkılarının bulunduğu unutulmamalıdır.



şekil 11.22. Matkap ucu nokta açısının kuvvet ve tork değerlerine etkisi

Şekil 11.23'te özetlenen itme kuvveti-delaminasyon ilişkisine göre, en düşük itme kuvveti oluşturan G-3 geometrisi delaminasyon esas alındığında en uygun geometri konumundadır. Fakat, delik çevresinde kesilmeden kalan fiberlerin varlığı delik kalitesini düşürmektedir. G-2 ve G-4 matkap uçlarının oluşturmuş olduğu itme kuvvetlerindeki benzerlik, delik kalitelerine de yansımaktadır. G-1 geometrisi ise G-2 ve G-4 geometrilerine benzer itme kuvveti oluşturmalarına rağmen, özellikle düşük ilerleme hızlarında delik kalitesinde belirgin şekilde iyileşme görülmektedir. Delik çevresinde fiberlerin tamamen kesilmesini sağlayan kesici kenar yapısı ile G-1 geometrisi, G-3 geometrisine göre bu durumda bir avantaj sağlamıştır. Sonuç olarak, G-1 geometrik yapısının ömür testleri için SiAlON malzemelerin test edilmesi sürecinde kullanılması uygun bulunmuştur.



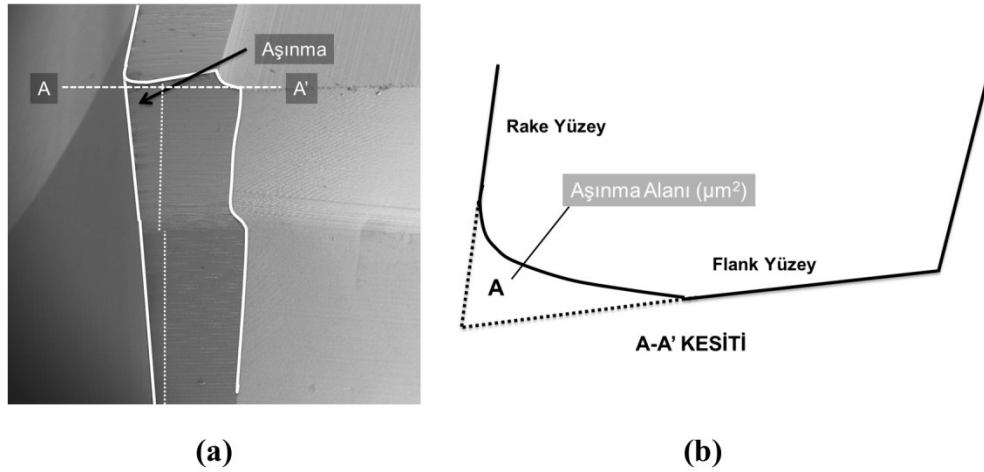
Şekil 11.23. G1, G2, G3 ve G4 matkap uçlarının değişen ilerleme hızları ile oluşturdukları delik itme kuvvetleri ve delaminasyon miktarları

12. PERFORMANS TESTLERİ SONUÇLARI

CFRP kompozit malzemelerin delinmesinde kesme bölgesinde oluşan zorlu işleme koşulları, kesici uçların kullanım ömrünü belirlemektedir. Yapılan kuvvet ölçümleri ve delik kalitesi analizleri sonucunda, SiAlON malzemeler için G-1 geometrik yapısı uygun bulunmuş, 3 farklı SiAlON ve referans WC-Co malzemesi birbirleriyle kıyaslanmıştır. Çizelge 8.5'te koşulları verilen ömür testlerinde, açılan 1-65 delik arasında uçların performansları, kesme kenarlarının mikroskobik karakterizasyonu, aşınmaya bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değişimleri ve elde edilen deliklerin analiz edilmesiyle belirlenmiştir.

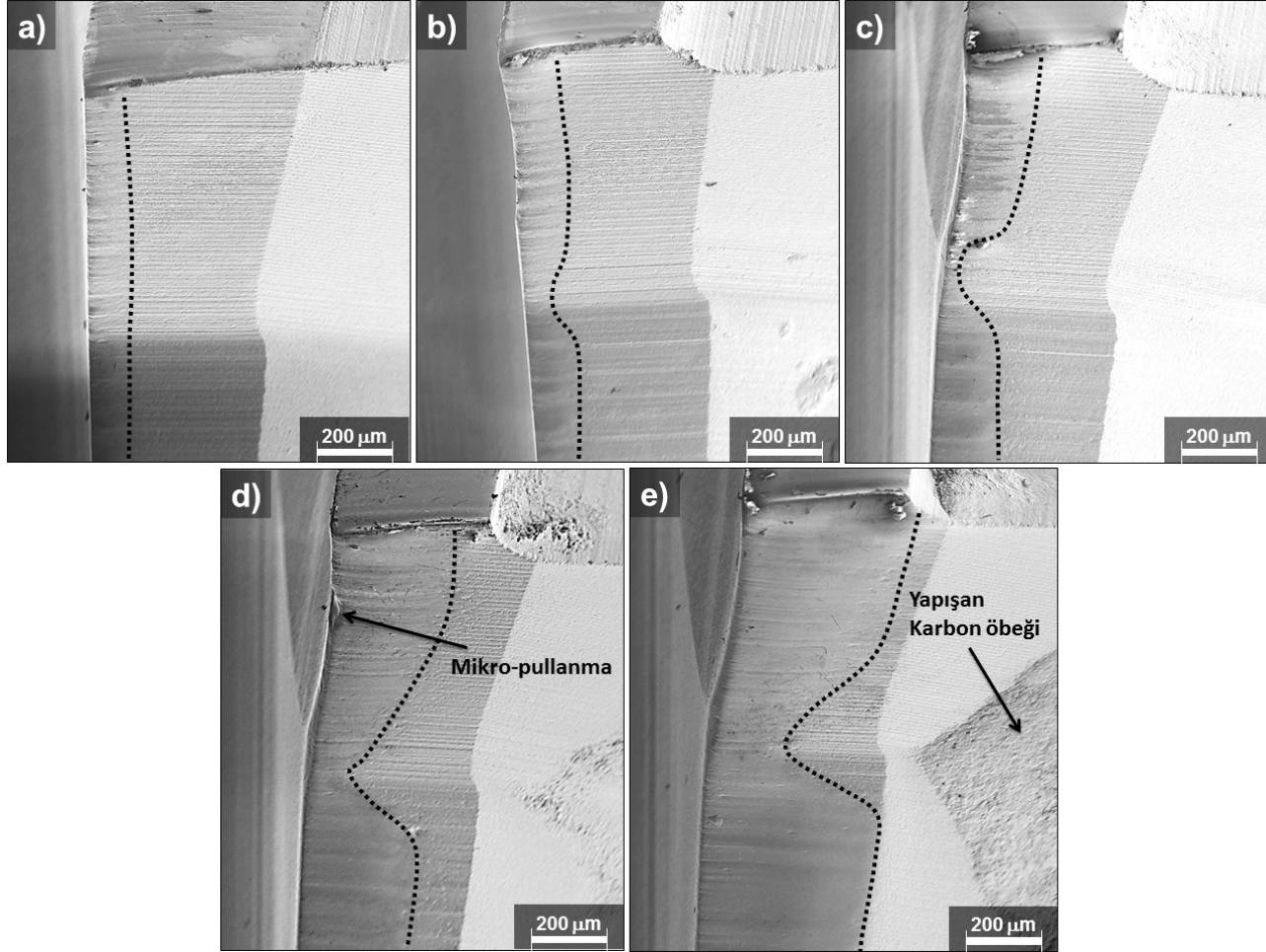
12.1. Uç Aşınması

Matkap ucunun kesme kenarının en dış bölümünde yer alan kesici kenarlar, bu matkap ucunu standart bir burgulu matkap ucundan farklı hale getirmektedir. Şekil 12.1'de gösterilen A-A' kesiti (birincil kesme kenarının marjin ile birleştiği bölüm) matkap ucu çapının en yüksek olduğu ve dolayısıyla hızın maksimum olduğu bölümdür. Matkap uçlarının aşınma davranışları incelenirken, bu bölümde gerçekleşen aşınma (Şekil 12.1b'de A ile gösterilmiştir) üç boyutlu optik yüzey tarayıcı ile incelenmiştir.

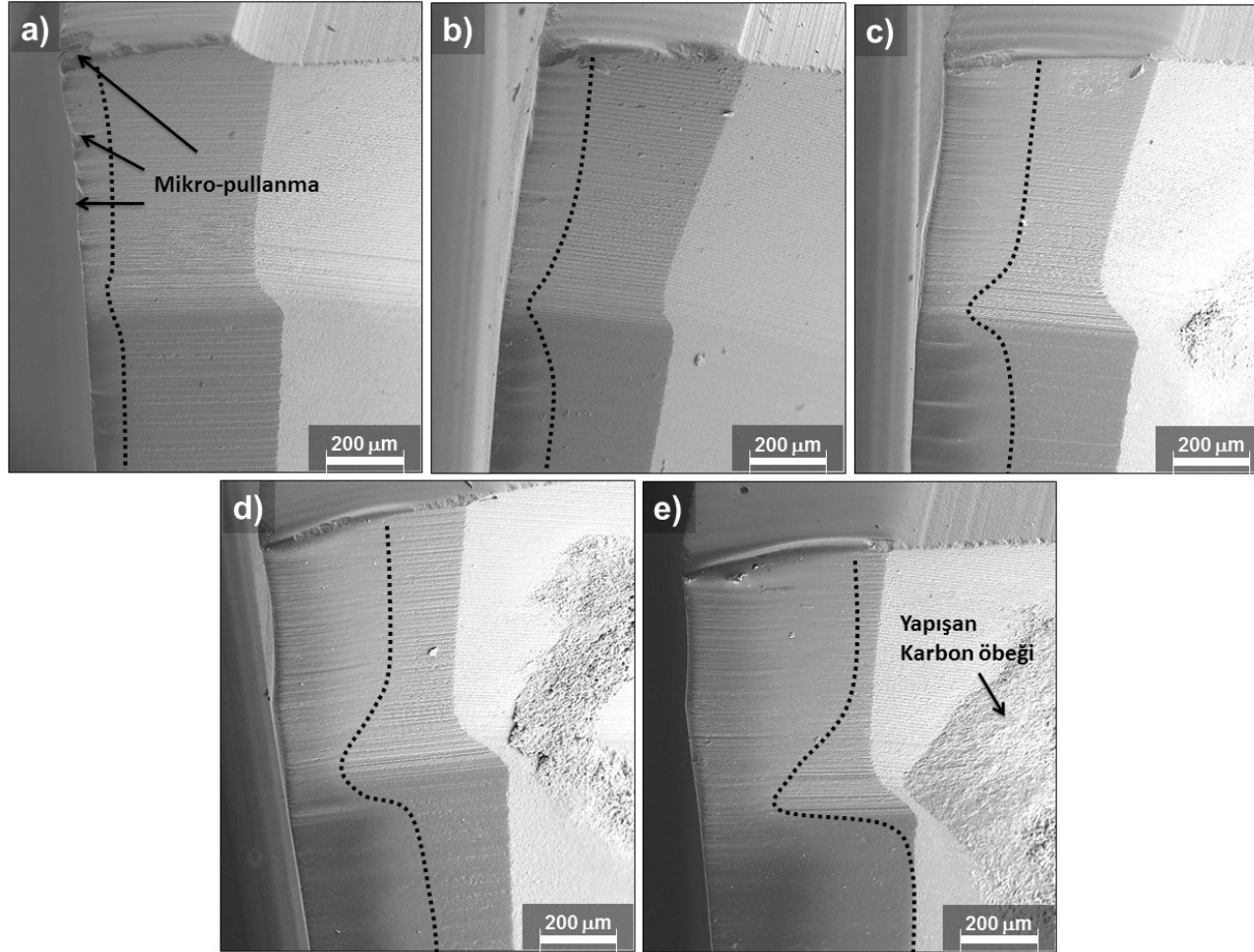


Şekil 12.1. (a)Aşınma sonrasında kesme kenarı görüntüsü ve (b) A-A' kesitinin şematik gösterimi

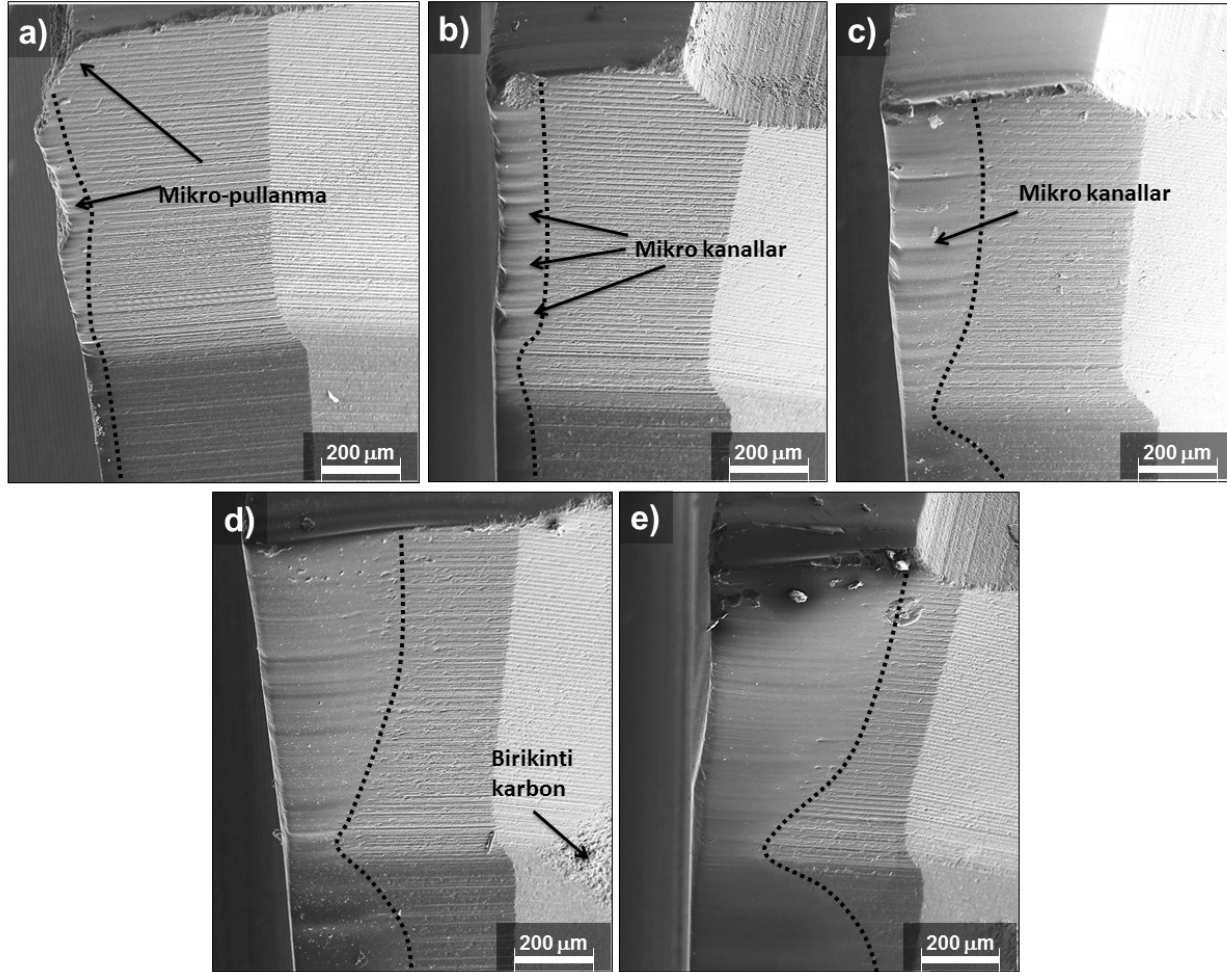
Şekil 12.2-12.5'te sırasıyla 25A, 25AS, MDA1 ve WC-Co malzemelerinin kesme kenarlarında meydana gelen aşınmaları gösteren SE-SEM görüntüleri verilmektedir. İlk 5 delik sonunda, SiAlON matkap uçlarının kesme kenarlarından kopan parçacıklar kesme kenarlarının pürüzlü hale gelmesine neden olmuştur. Bu pürüzler, delme süreci devam ettikçe sürekli gerçekleşen düzenli abrasif aşınma ile azalmakta ve taşlama izleri yok olmaktadır. Kesme kenarından kopan mikro-parçacıklar farklı aşınma yüzeyleri oluşturduklarından ilerleyen süreçte, kesme kenarlarında kesme yönüne paralel kanallar oluşmaktadır. Delme sürecinin ilk bölümlerinde oluşan bu kanallar (15. deliğe kadar), kırılan parçaların kesme kenarı ve kompozit malzeme ara yüzeyinde kayması ile gerçekleşen aşınma sürecinin (üçlü aşınma) bir sonucudur. SiAlON malzemelerin kırılkan karakteri, mikro-pullanma ile gerçekleşen aşınmanın ilk birkaç delik süresince şiddetli olmasına ve kesici uç malzemesinin parçalar halinde kenardan hızla uzaklaşmasına zemin hazırlamaktadır. Kesme sürecinin ilerleyen aşamalarında kenar, keskinliğini kaybetmekte ve mikro-pullanmanın azalmasıyla düzeli abrasif aşınma baskın hale gelmektedir. Sonuç olarak, oluşan mikro kanalların derinliği abrasif aşınma ile birlikte azalmakta ve kesme kenarı pürüzsüz bir görünüm kazanmaktadır.



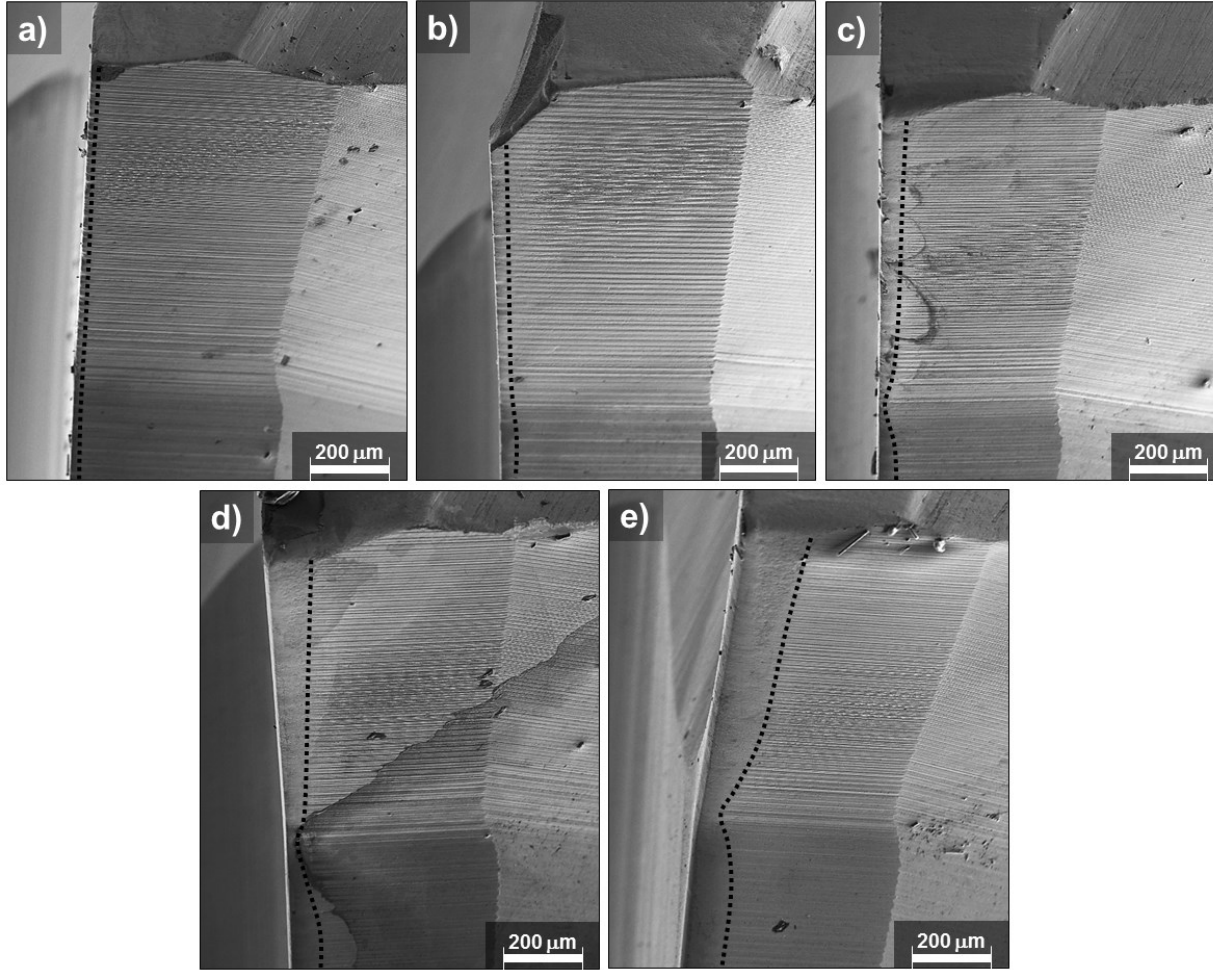
Şekil 12.2. 25A matkap ucunun (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. delik sonunda aşınmış kenar SE-SEM görüntüleri



Şekil 12.3. 25A-SiC matkap ucunun (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. delik sonunda aşınmış kenar SE-SEM görüntüleri



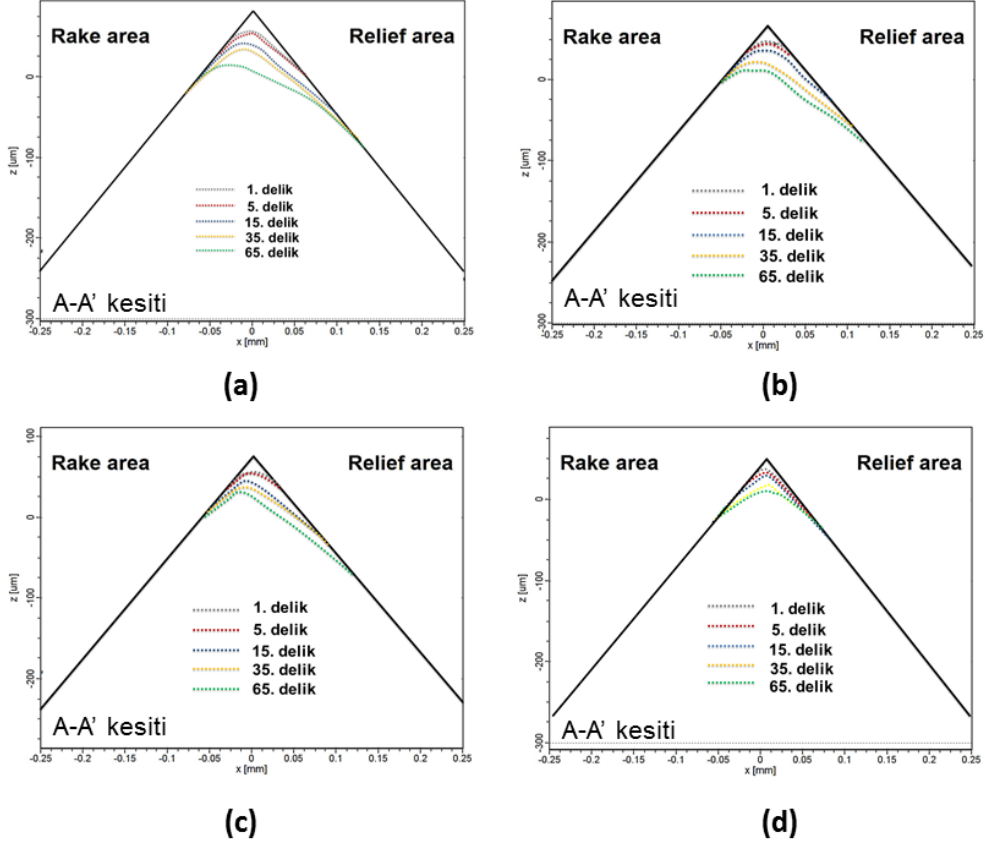
Şekil 12.4. MDA1 matkap ucunun (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. delik sonunda aşınmış kenar SE-SEM görüntüleri



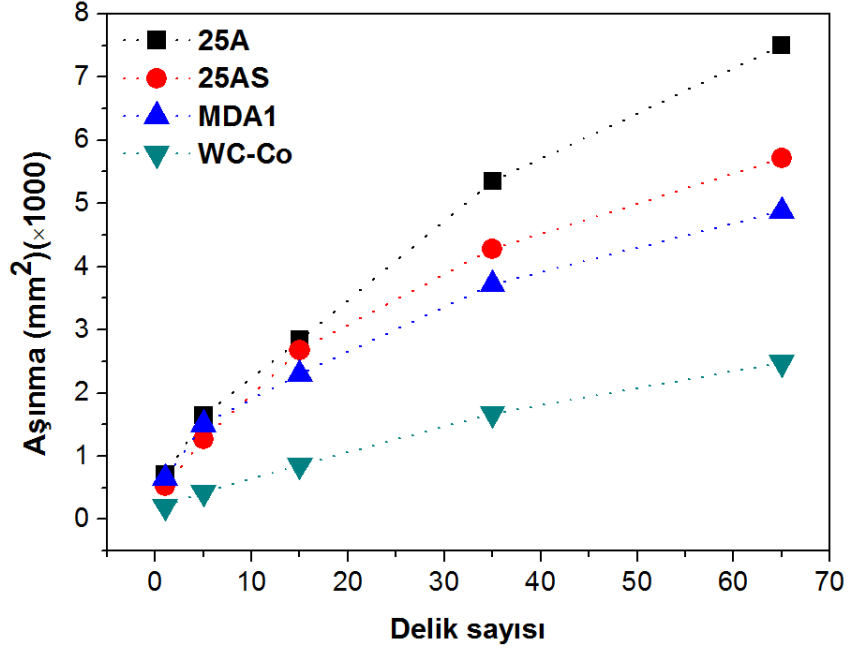
Şekil 12.5. WC-Co matkap ucunun (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. delik sonunda aşınmış kenar SE-SEM görüntüleri

SiAlON esaslı malzemeler metallerin tornalama operasyonlarında yaygın biçimde kullanılan ticari malzemelerdir. Metallerin işlenmesinde kesme bölgesinde oluşan sıcaklık 1000°C üzerinde olduğundan, malzemenin yüksek sıcaklık özellikleri aşınma davranışında belirleyici olmaktadır. Mekanik etkilerden çok, difüzyona bağlı aşınma uç kullanım ömrünü belirlemektedir [90]. Fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin delinmesinde kesme bölgesinde oluşan sıcaklık işleme koşullarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan kesme koşullarına benzer koşullarda ($V= 15000$ dev/dk ve $f= 60$ $\mu\text{m}/\text{dev}$) kesme bölgesindeki sıcaklık artış hızının 350°C/s'nin altında olduğu ifade edilmiştir [21]. Kesme süreci, deliğin oluşturulma zamanı ile sınırlı olduğundan yatışkın hal durumu kesme sırasında oluşmamaktadır. Bu nedenle, WC-Co malzemesine kıyasla yüksek sıcaklık kararlılıkları ile avantajlı durumda olan SiAlON malzemelerin aşınma davranışında ısıl etkiler, mekanik etkiler kadar belirleyici değildir. Kesme bölgesinde oluşan 350°C üzerindeki sıcaklıklar kompozit malzemenin bozunumuna neden olmaktadır. Ayrıca WC-Co malzemesi için yapılmış olan aşınma testlerinde yüksek kesme hızlarında (15000 dev/dk üzerinde) birincil kesme kenarında ve serbest yüzeyde fazla miktarda karbon tozunun biriktiği ifade edilmektedir [59]. Bu durum, yüksek hızlarda kesme kenarında oluşan yüksek sıcaklığın serbest yüzey aşınmasıyla birleşmesi, bunun sonucunda epoksi bağlayıcının yanması ve karbon fiber partiküllerinin yüzeye yapışması şeklinde gerçekleşmektedir. Karbon yapışması, SiAlON malzemelerde gerçekleşen yüksek aşınma ile birlikte şiddetli hale getirmektedir (Şekil 12.2-12.4).

Uçların aşınma miktarlarının belirlenmesinde Şekil 12.6'da verilen, delik sayısına göre değişen kesme kenarı aşınma profilleri kullanılmıştır. Bu görüntüler kullanılarak ölçülen aşınma miktarları ise Şekil 12.7'de verilmektedir.



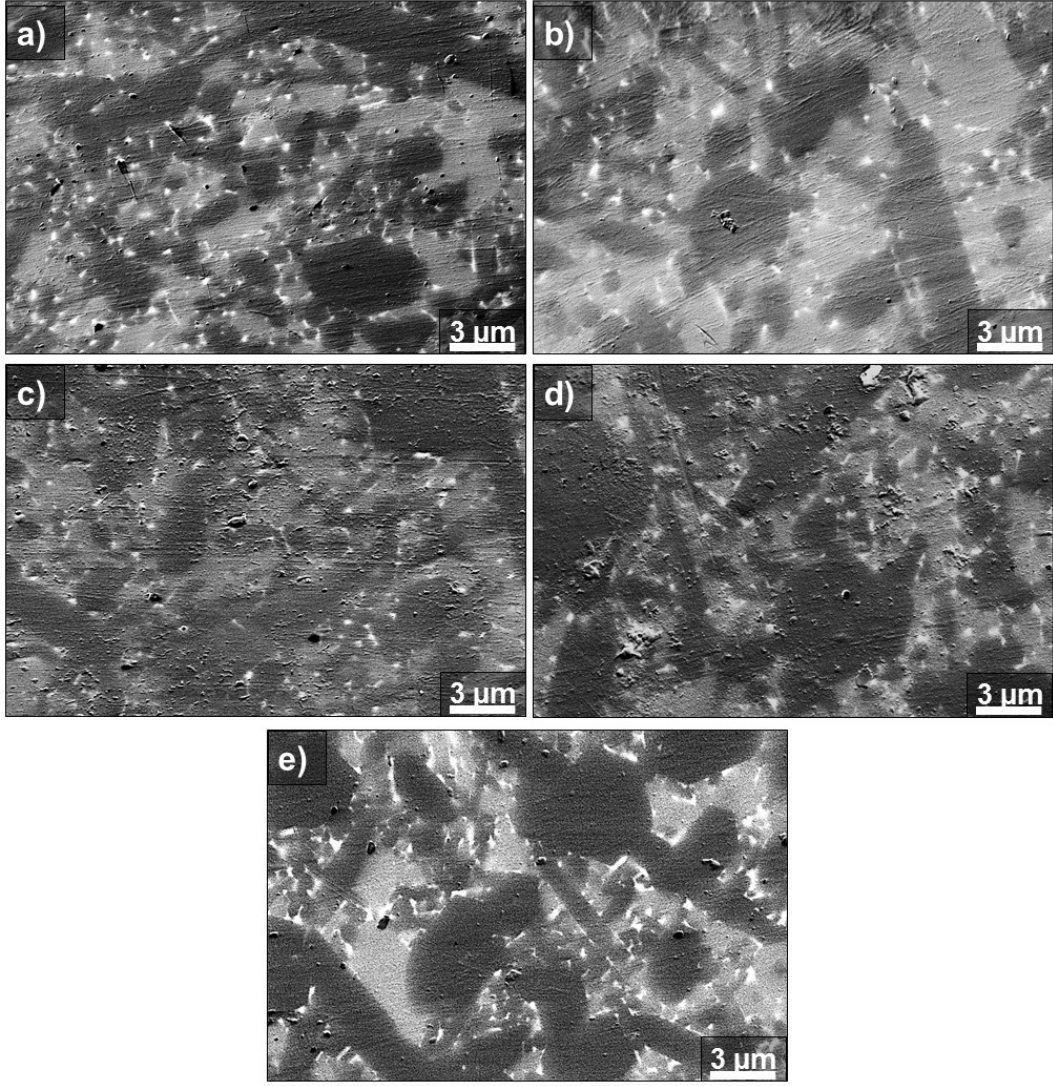
Şekil 12.6. (a) 25A, (b) 25A-SiC, (c) MDA1 ve (d) WC-Co matkap uçlarının kesme kenarlarının A-A' kesitinde gerçekleşen aşınma ilerlemesi



Şekil 12.7. Ömür testleri sonrasında matkap ucu malzemelerinin artan kesme uzunluğu ile aşınma miktarlarının değişimi

Delme sürecinin ilk aşamalarında, kompozit malzemenin fiber dağılımlarına bağlı olarak oluşan çevrimsel yükler, henüz aşınmamış olan kesme kenarlarında yüksek basınç oluşturur ve yüzeyde bulunan hataların bulunduğu bölümler başta olmak üzere, kesme kenarlarında mikro-pullanmalar meydana gelir. Bu aşamada, SiAlON malzemelerin kırılma tokluğu aşınma dayanımlarını belirlemektedir. SiAlON malzemeleri içerisinde MDA1 malzemesinin diğer iki malzemeye kıyasla düşük β -SiAlON içeriği ve yüksek z değerine bağlı olarak daha kırılğan olması, kenar boyunca görülen mikro-pullanma sürecini daha şiddetli hale getirmiştir (Şekil 12.4). Ancak, mikro-pullanma miktarı ölçülüp aşınma miktarına dâhil edilemediğinden, bu malzemenin aşınma miktarı ilk 5 delik sonunda diğer malzemelere benzer ölçülmüştür (Şekil 12.6 ve 12.7).

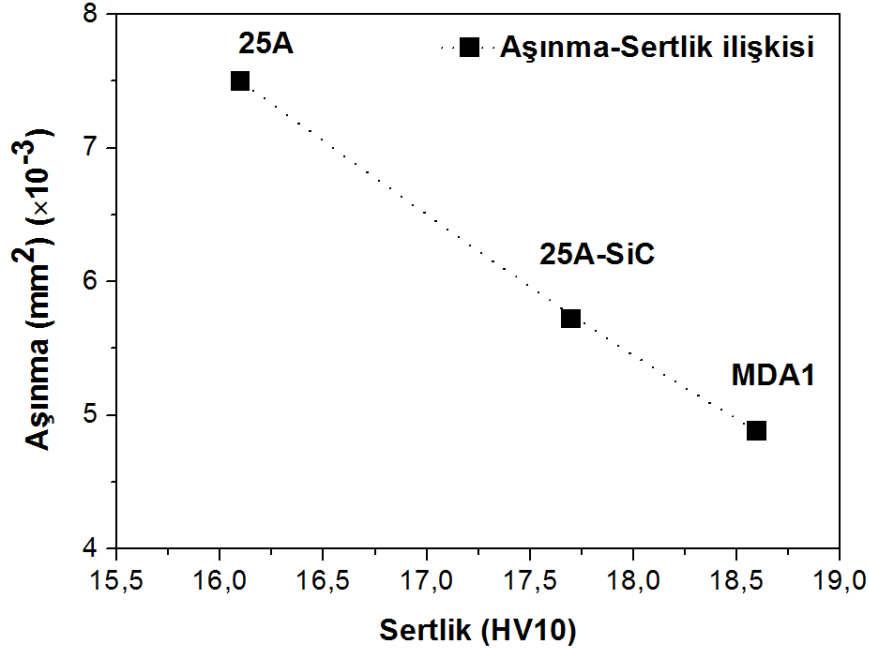
İlk birkaç delik sonrasında aşınmada mikro-pullanma miktarı azalmakta ve baskın aşınma mekanizması abrasif aşınma olmaktadır. Bu durum, Şekil 12.8’de verilen, MDA1 matkap ucunun 1, 5, 15, 35 ve 65. delik sonunda aşınmış kesme kenarlarından alınan BE-SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Görüntülerde, karbon fiberler tarafından kesme yönünde oluşturulan abrasif aşınma izleri belirgin biçimde görülmektedir.



Şekil 12.8. MDA1 matkap ucunun (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. delik sonrasında aşınmış kenar BE-SEM görüntüleri. Yüzeyde görülen çizikler karbon fiberlerin neden olduğu abrasif aşınma sonucunda oluşmuştur.

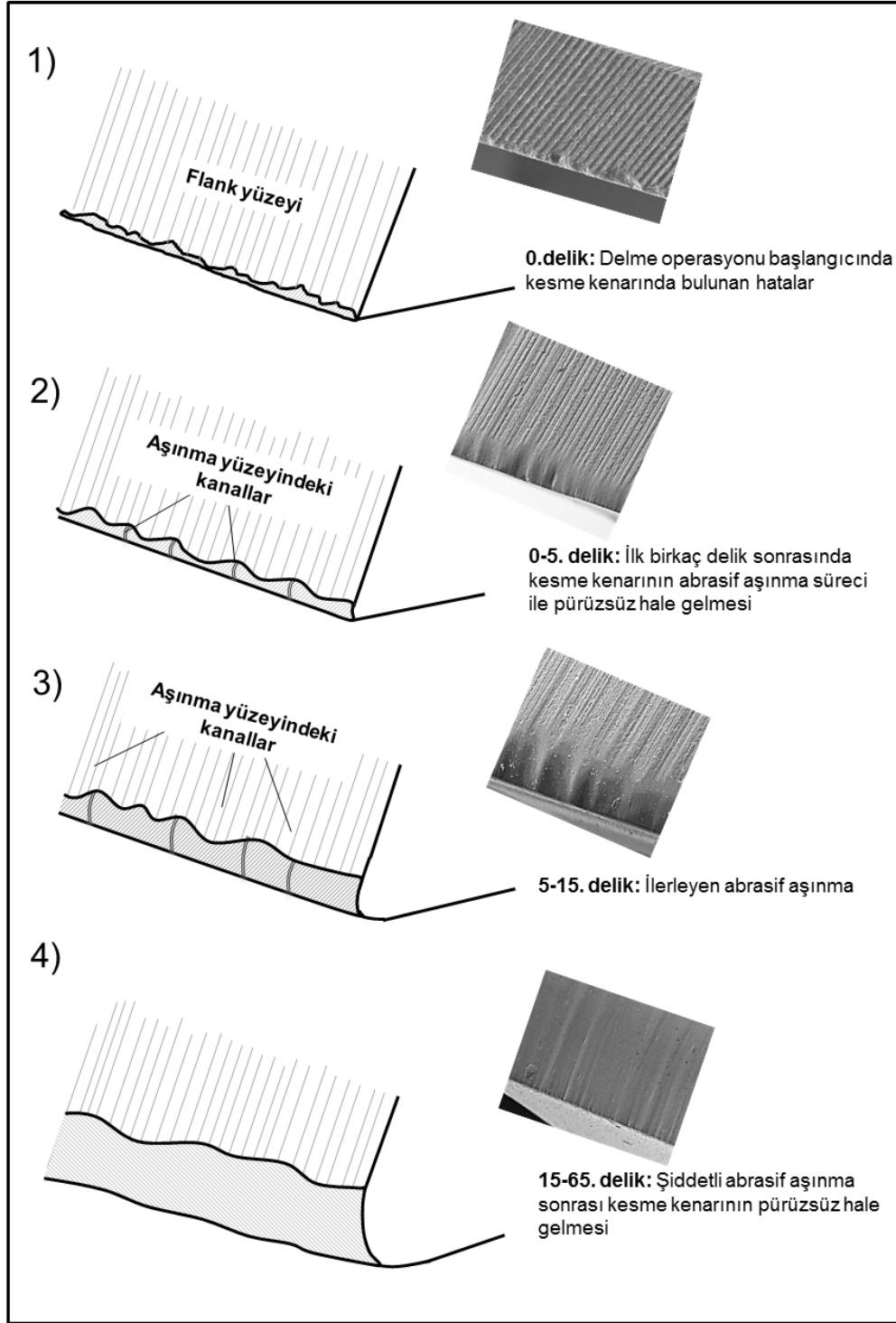
MDA1 malzemesinin aşınma dayanımının yüksek olmasında (Şekil 12.7), α -SiAlON miktarının önemli bir katkısının bulunduğu düşünülmektedir. 25A ve 25A-SiC malzemelerinin aşınma dayanımları da, malzeme sertlikleri ile doru orantılı değişmektedir (Şekil 12.9). 25A-SiC malzemesinde bulunan %17 oranındaki SiC taneleri kırılma dayanımını düşürse de, sahip oldukları yüksek sertlik değerleri ile malzemenin aşınma dayanımının artmasına katkı sağlamaktadır. 25A malzemesi ise mikro-pullanma sürecinde iki boyutlu tane

boyut dağılımı ile daha az mikro-pullanma gösterse de (Şekil 12.2), düşük tane sertliği nedeniyle ilerleyen delme sürecinde en çok aşınan malzeme konumundadır.



Şekil 12.9. SiAlON seramiklerinin aşınma miktarının sertlikle değişimi

SiAlON matkap uçları için CFRP kompozit delme sürecinin ilk aşamalarında mikro-pullanma ile başlayıp, ilerleyen süreçte abrasif aşınmanın baskın hale geldiği aşınma ilerlemesi Şekil 12.10'da şematik olarak özetlenmektedir. Mikro-pullanma sürecinin oluşumunda, yüzeyde taşlama sonrası yüzeyde oluşan hatalar, kesme kenarı üzerinde kompozit malzemedeki fiber yönlerine bağlı oluşan çevrimsel yükler ve SiAlON malzemelerinin kıyaslamalı olarak düşük sayılabilecek kırılma toklukları etkili olan parametrelerdir. Abrasif aşınma ise delme sürecinin başlangıcından itibaren geçerli bir aşınma mekanizması olup, kesme kenarındaki basıncın aşınmaya bağlı olarak azalmasıyla, mikro-pullanmaya kıyasla daha baskın hale gelmektedir. Bu süreçte SiAlON malzemelerinin sertlikleri aşınma dayanımını belirlemektedir.



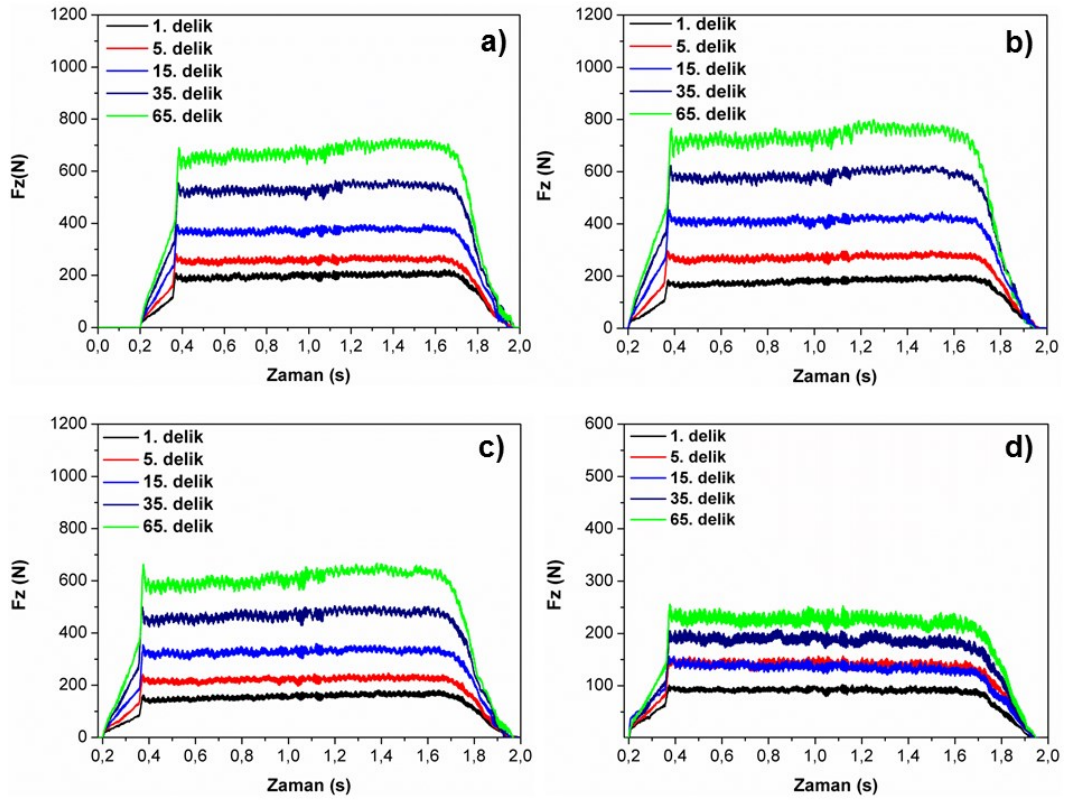
Şekil 12.10. SiAlON matkap uçlarının CFRP kompozit malzemelerin delme sürecindeki aşınma ilerlemesi

WC-Co malzemesi için aşınma sürecinin iki aşamadan oluşan ve birbirini takip eden süreçler sonucunda gerçekleştiği ifade edilmektedir [59]. WC-Co matkap ucunda mikro-pullanmanın ve ilerleyen süreçte gerçekleşen düzenli aşınmanın SiAlON malzemelere kıyasla daha az olduğu görülmektedir (Şekil 12.5 ve 12.7). Bileşiminde bulunan sünek karakterdeki Co metal bağlayıcı fazının sağlamış olduğu yüksek kırılma direnci, bu malzemede kesme sürecinin başında gerçekleşen mikro-pullanma mekanizmasını en az seviyede tutmuştur. Uçun kesme kenarında gerçekleşen yuvarlanma, kesme basıncının düşmesine neden olmakta ve aşınma modunun Co ve WC bileşenlerinin düzgün aşınmasına bağlı olarak gerçekleşen, hafif aşınma moduna dönüşmesine neden olmaktadır [55,56,58].

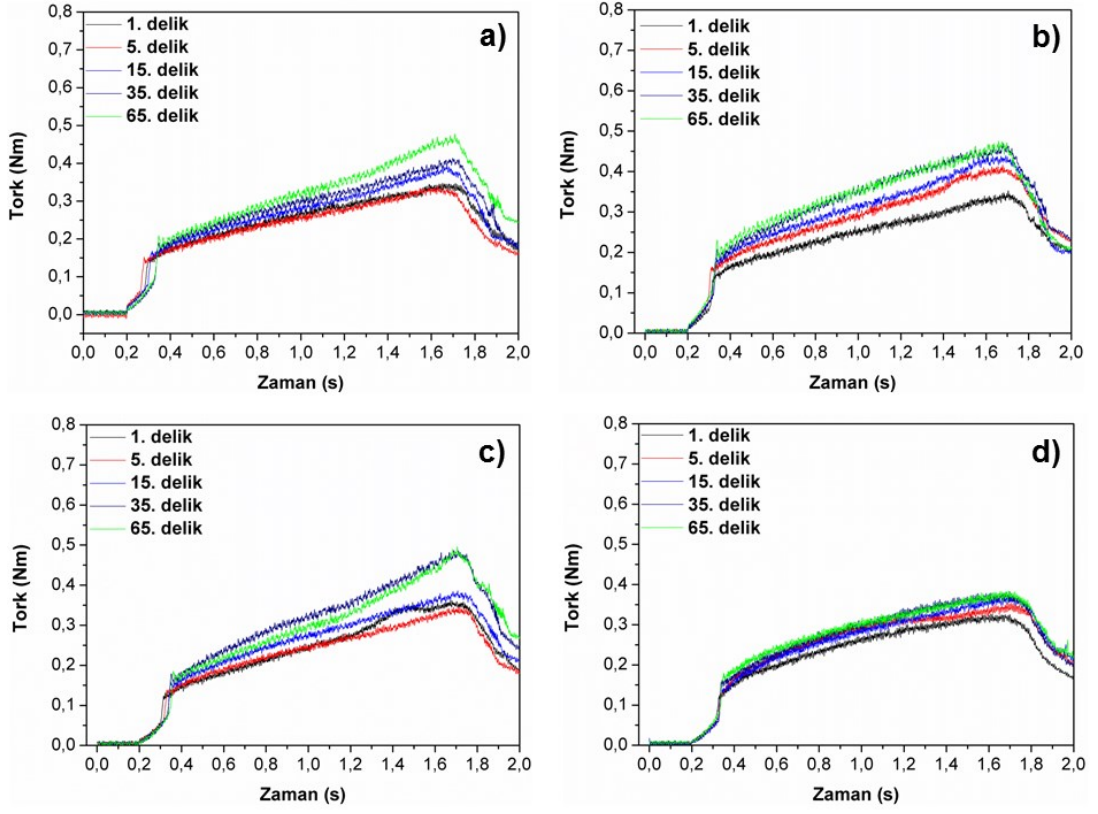
WC-Co malzemeleri için ilerleyen delme sürecinde gerçekleşen abrasif aşınma kıyaslamalı olarak daha düşük sertlik değerine sahip olan karbon fiberlerin (HV= 8-10 GPa) WC taneleri yerine, kobalt bağlayıcı fazını aşındırmalarıyla gerçekleşir [42]. Bu durumda, Co miktarı uçun performansında belirleyicilik kazanır. Bu çalışmada kullanılan WC-Co matkap ucunda %5 gibi düşük bir oranında Co bulunması, düzenli aşınma sürecinde bu malzemeye avantaj sağlamaktadır.

12.2. İtme Kuvveti ve Tork Değişimleri

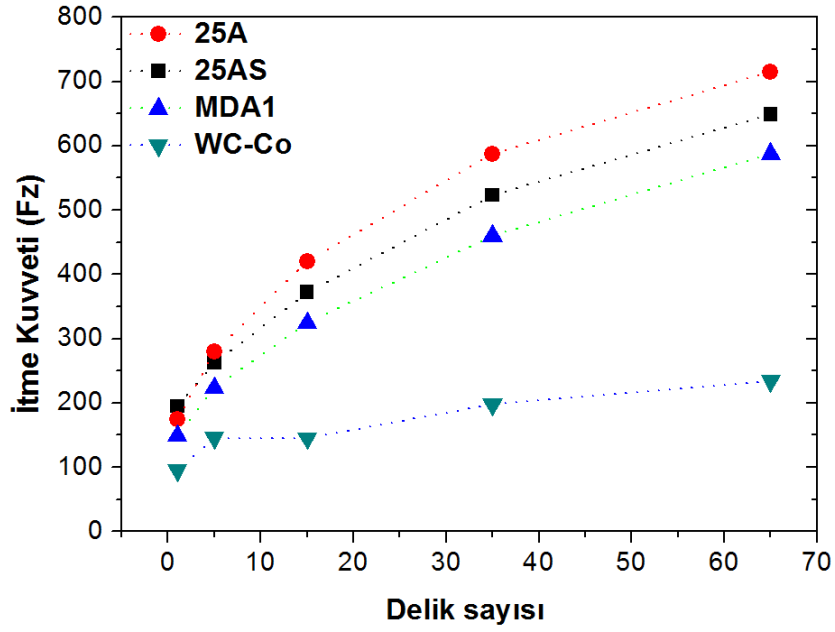
Matkap uçlarının kesme kenarlarında meydana gelen aşınma, kesme bölgesinde oluşan itme kuvvetlerinin ve torkun artmasına neden olmaktadır [23]. İtme kuvvetlerinde ve tork değerlerinde meydana gelen artış aşınma miktarlarının dolaylı bir göstergesidir [24]. Şekil 12.11 ve 12.12’de sırasıyla matkap uçlarının kesme kenarlarında meydana gelen aşınmaya bağlı olarak değişen itme kuvvetleri ve tork grafikleri, 12.13’te ise 4 malzeme için itme kuvvetlerinin kıyaslaması verilmektedir. Matkap uçlarının kesme kenarlarının aşınması ile kenarın kesici özelliği azalmakta, talaş oluşumuna karşı direnç ve itme kuvvetleri artmaktadır. Kuvvetlerin artış hızları, uç kenarlarında gerçekleşen aşınma miktarları ile orantılıdır.



Şekil 12.11. (a) 25A, (b) 25AS, (c) MDA1 ve (d) WC-Co matkap uçlarında kuvvet grafiklerinde aşınma ile meydana gelen değişim



Şekil 12.12. (a) 25A, (b) 25AS, (c) MDA1 ve (d) WC-Co matkap uçlarında tork grafiklerinde aşınma ile meydana gelen değişim

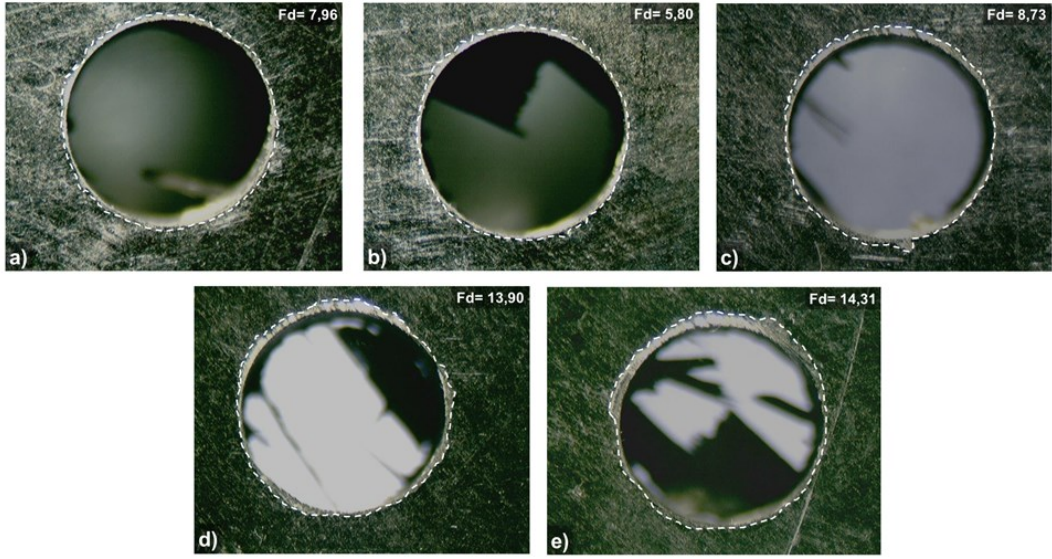


Şekil 12.13. Matkap uçlarında aşınmayla meydana gelen kuvvet artış miktarları

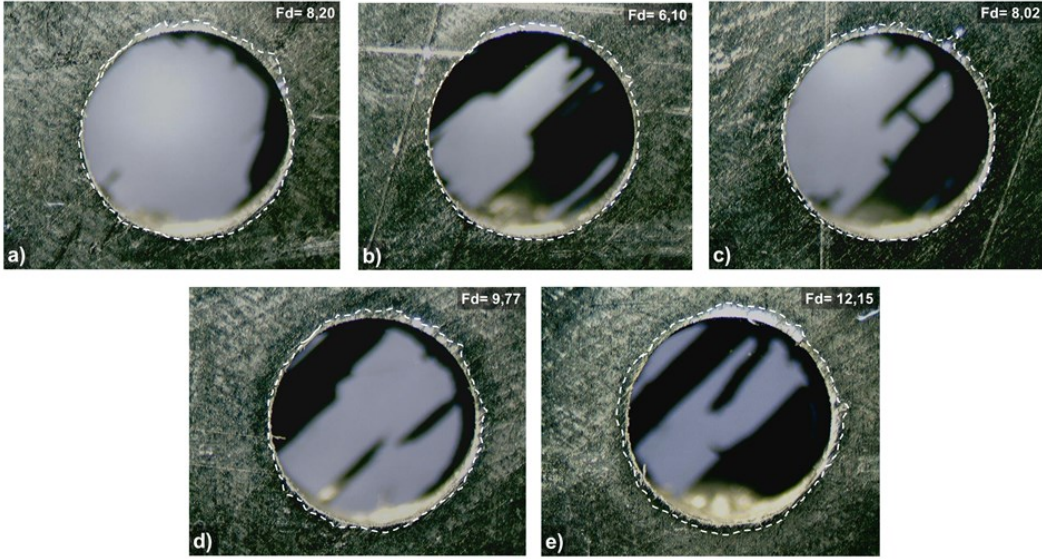
12.3. Delik Kalitesi

CFRP kompozit malzemelerin delme sürecinde en önemli başarı ölçütü delik kalitesidir. Delik kalitesini ise, delik giriş ve çıkışında gerçekleşen delaminasyon miktarları, delik yüzeylerinde fiberlerin sökülmesine bağlı olarak pürüzlülük ve delik boyutlarındaki sapma belirlemektedir. 11. bölümde de ifade edildiği üzere kullanılan kompozit plakanın delik çıkışlarındaki delaminasyon, kompozit yapısı ve kesme bölgesinde oluşan yüksek itme kuvvetleri nedeniyle şiddetli olmaktadır. Ayrıca, delaminasyon miktarının itme kuvvetlerinden bağımsız olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, ömür testlerinde, kuvvet testlerinde olduğu gibi, delik çıkışları yerine delik girişlerinde oluşan soyulma delaminasyon miktarları (peel-up delamination) esas alınmıştır.

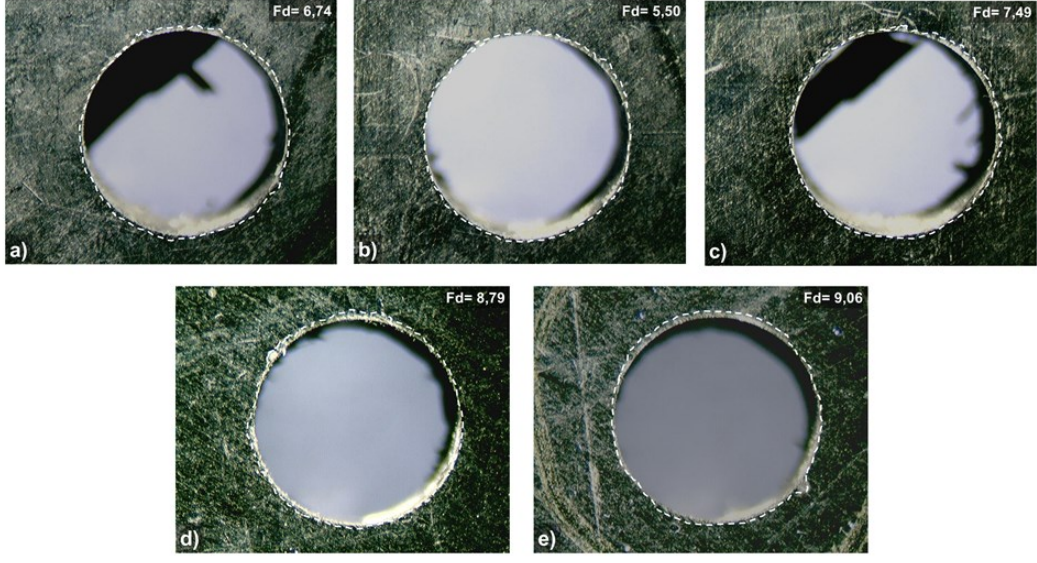
Şekil 12.14-12.17’te sırasıyla 25A, 25AS, MDA1 ve WC-Co matkap uçlarıyla açılan delik girişlerinin stereo mikroskop görüntüleri verilmektedir. G-1 matkap ucu geometrisi ile 0,15 mm/dev ilerleme hızlarına kadar belirgin bir delaminasyon bulundurmayan delikler elde edilebildiği önceki bölümde gösterilmiştir. Görüntülerde, delik çevrelerinde gerçekleşen delaminasyon miktarlarının beklenildiği gibi düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, delik çevresinde oluşan delaminasyon miktarında uç aşınmasının, matkap ucu geometrik özellikleri ve kesme koşullarına kıyasla daha az etkili olduğunu göstermektedir.



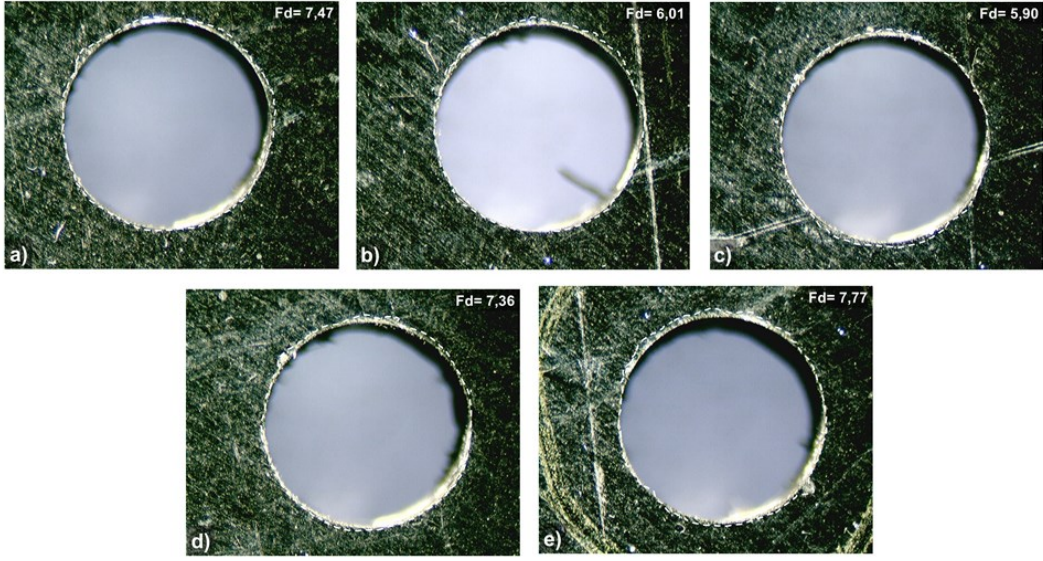
Şekil 12.14. 25A matkap ucuyla açılan (a) 1, (b) 5, (c) 15, (d) 35 ve (e) 65. deliklerin optik mikroskop görüntüleri



Şekil 12.15. 25A-SiC matkap ucuyla açılan (a) 1, (b) 5, (c) 15, d) 35 ve e) 65. deliklerin optik mikroskop görüntüleri

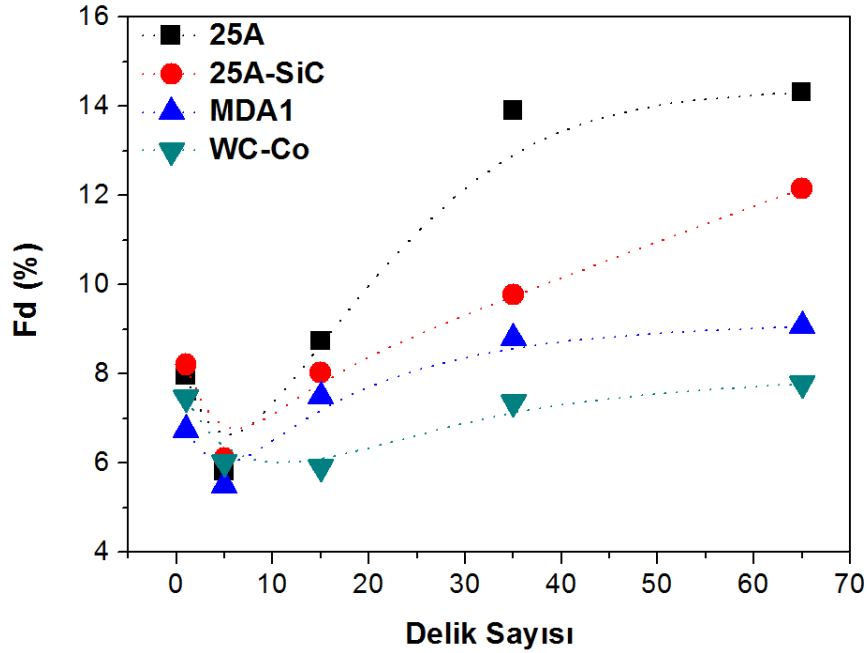


Şekil 12.16. MDA1 matkap ucuyla açılan (a) 1, (b) 5, (c) 15, d) 35 ve e) 65. deliklerin optik mikroskop görüntüleri



Şekil 12.17. WC-Co matkap ucuyla açılan (a) 1, (b) 5, (c) 15, d) 35 ve e) 65. deliklerin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 12.18’de matkap uçlarının aşınmaya göre değişen delaminasyon miktarları verilmektedir. Grafikte, delaminasyon miktarının aşınmanın en fazla olduğu 25A matkap ucunda en yüksek olduğu, diğer malzemelerin ise delaminasyon miktarlarının 25A-SiC, MDA1 ve WC-Co şeklinde sıralandığı görülmektedir (Şekil 12.18). 1. delikte görülen delaminasyon miktarlarının, 5. delikteki kıyasla daha fazla olması ucun kesme kenarlarındaki mikro-pullanmalar nedeniyle oluşan hataların yüzeyi pürüzlü hale getirmesidir. Mikro-pullanma, açılan ilk 5 delik sonunda azalmakta ve kesme kenarı daha pürüzsüz bir hale gelmektedir. İlerleyen süreçte ucun daha da aşınmasıyla delaminasyon, aşınmaya bağlı olarak tekrar artış göstermektedir.



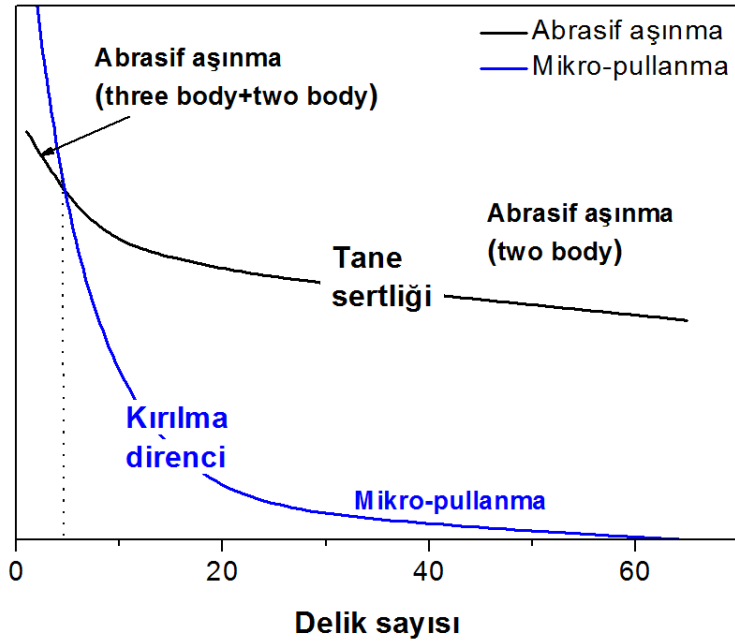
Şekil 12.18. Ömür testlerinde farklı malzemelerdeki matkap uçlarıyla açılan deliklerdeki delaminasyon miktarlarının değişimi

12.4. Sonuçlar

Ömür testleri kapsamında 3 farklı SiAlON ve referans WC-Co malzemelerinden üretilen matkap uçları UD-CFRP kompozit plakaların delinmesi sürecinde test edilmişlerdir. Özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları için üstün

aşınma dayanımına sahip olan SiAlON seramiklerinin düşük sıcaklıklardaki pek çok uygulamada da optimum kırılma direnci-sertlik özellikleri ile üstün performans göstermeleri, CFRP kompozit malzemelerin delme sürecinde bu malzemeleri aşınma problemine karşı potansiyel bir çözüm durumuna getirmektedir.

UD-CFRP kompozit malzemeler, belirli kalınlığa sahip fiber tabakalarının, belirli açılarda üst üste konumlandırılmasıyla elde edilen ve fiber yönlerine bağlı olarak değişen özellikler gösteren malzemelerdir. Bu durum, delme süreci sırasında delici matkap ucu üzerinde, metallere kıyasla daha düşük ancak belirli bir aralıkta salınım gösteren yüklerin oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan bu çevrimsel yükler kırılma yapıdaki matkap ucu malzemesinin kesme kenarında, mikro-pullanmalara neden olmaktadır. Şekil 12.19'da gösterildiği gibi mikro-pullanma, delme sürecinin ilk aşamalarında baskın durumda olup malzemenin sahip olduğu kırılma direnci aşınmanın şiddetinde belirleyici rol oynamaktadır. Açılan delik sayısı artışıyla birlikte baskın olan mikro-pullanma hızla azalarak yerini abrasif aşınmaya bırakmaktadır.



Şekil 12.19. SiAlON matkap uçlarında delme süreci boyunca gerçekleşen aşınma mekanizmaları

13. WC/(Ta+W) ÇOK TABAKALI KAPLANMIŞ SiAlON MATKAP UÇLARININ PERFORMANSLARI

13.1. Giriş

Son yıllarda kesici uç malzemelerinin özelliklerinin geliştirilmesinin yanı sıra, malzeme performansının artırılmasında kullanılan sert PVD ve CVD kaplamaların önemi artmıştır. Bu kaplamalar, sert çelikler ve karbür malzemelerin kaplanmasında uzun yıllardır uygulanmaktadırlar. Koruyucu kaplama malzemesi ile kesici ucun dayanımı ve etkinliği şu faktörlere bağlı olarak artırılmaktadır [139]:

- Kaplama ile ucun yüzey sertliği artmakta ve kaplama kalitesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir.
- Düşük sürtünme katsayısının ucun performansında kesme kuvvetlerinin ve sıcaklığın düşürülmesi açısından önemli bir etkisi bulunmaktadır. Aynı zamanda, yağlayıcı kullanılmadan kesme işlemine olanak sağlaması ve kesme hızlarının artırılabilmesi diğer avantajlardır.
- Kaplama tabakası kesme sırasındaki sürtünme nedeniyle oluşan yüksek ısının uç malzemesine taşınımını engelleyerek ucun dayanımını artırır [140].
- Kaplama, uç malzemesi-işlenen malzeme arasındaki atomik taşınımı engelleyerek difüzyon aşınmasını engeller.

Sert çelik ve karbür esaslı malzemelere ilave olarak son yıllarda aşınma dayanımlı kaplamalar seramik malzemelerin kaplanmasında da kullanılmaktadırlar [141-145]. Kaplamanın performansı altlık ile olan bağlanma miktarından etkilenmektedir. Dobrzanski ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, karbür ve SiAlON altlıkları üzerine Ti(B,N) kaplamanın yapısı ve özellikleri incelenmiştir [143]. Kaplama tabakasının WC-Co altlık malzemesinin sertliğini %60 oranında arttırdığı, her iki altlık malzemesi için de yüzey pürüzlülüğünün artış gösterdiği ve kaplamanın karbür altlığa bağlanma mukavemetinin SiAlON altlığa bağlanma mukavemetinde daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kaplamanın SiAlON altlık üzerinden kırılarak uzaklaştığı

ifade edilmiştir. Benzer bir çalışmada Dobrzanski ve ark. Ti(B,N), (Ti,Zr)N, Ti(C,N), (Al,Ti)N, (Ti,Al)N gibi farklı kaplama malzemesinin karbür ve SiAlON kesici malzemelere uygulamışlar ve kaplamanın sağlamış olduğu özellikleri belirlemişlerdir [139]. Kaplama malzemeleri içerisinde (Al,Ti)N kaplamanın SiAlON altlık ile bağlanma mukavemetinin en yüksek olduğunu ve bunun sonucunda da kesici uç ömrünün 7 kata kadar arttığını göstermişlerdir.

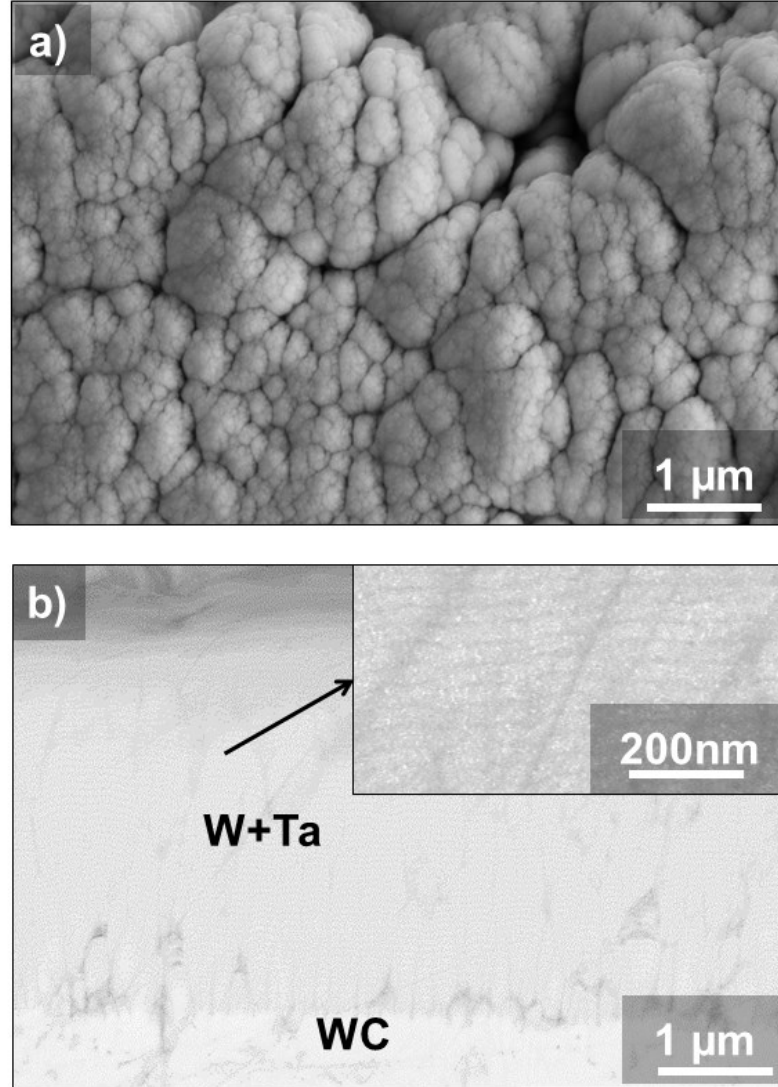
Nitrür, karbür ve borür gibi sert kaplama malzemelerin dışında elmas, bilinen en sert malzeme olması ile özellikle WC-Co esaslı kompozitlerin kaplanmasında kullanılmaktadır. Ancak karbür malzeme bileşiminde bulunan Co metalik fazı sp^2 bağlı karbon tabakalarının oluşumuna neden olmaktadır (grafitleşme) [146]. Bağlanma, ara yüzeyin zayıf mekanik özellikleri ve elmas-karbür arasındaki yüksek ısıl genleşme farkı nedeniyle zayıf olmaktadır. Bu problemin giderilmesi için bir dizi yeni teknik uygulansa da kimyasal ve termal özellikleri ile uygun altlık malzemeleri olan Si_3N_4 , SiAlON ve SiC gibi seramiklerin kullanımı da bu sorunun çözümünde farklı bir yaklaşım oluşturmaktadır [147-149].

Bu çalışmada karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin delinmesinde test edilen 25A SiAlON matkap uçlarının PVD yöntemi ile WC/(Ta+W) çok tabakalı malzemesi ile kaplanması ve bunun sonucunda aşınma performanslarının artırılması hedeflenmiştir. Kaplamada 25A malzemesinden üretilen ve G-1 geometrisine sahip olan matkap uçları altlık olarak kullanılmıştır.

13.2. Kaplama Tabakasının Mikroyapı Karakterizasyonu

SiAlON matkap uçları üzerine kaplanan WC/(Ta+W) kaplamanın üst ve kesit BE-SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 13.1'de verilmektedir. Şekil 13.1a'da kaplama malzemesinin 25-100 nm boyutlarındaki taneciklerden oluştuğu, 13.1b'de ise bu tanelerin oluşturduğu kaplama tabakasının kalınlığının yaklaşık 3-4 μm olduğu görülmektedir. Kaplamanın altlık ile temas eden bölümünün

yaklaşık olarak 1 μm kalınlığında olan WC, diğer kısmının ise W ve Ta nano tabakalarından oluştuğu görülmektedir (Şekil 13.1b).

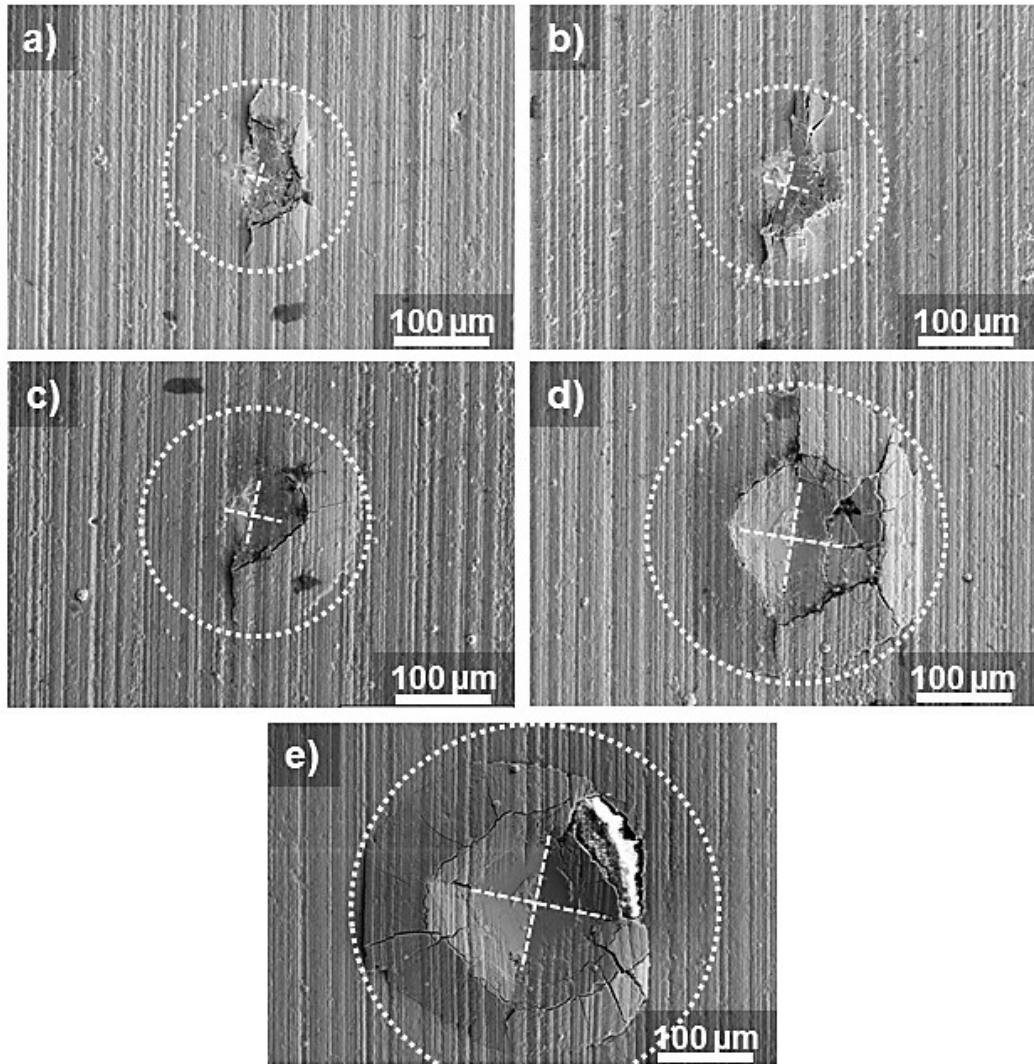


Şekil 13.1. SiAlON matkap uçlarının yüzeylerine uygulanan WC/(Ta+W) kaplamanın (a) üst ve (b) kesit BE-SEM mikroyapı görüntüleri

13.3. Kaplama Tabakasının Altlığa Bağlanma Mukavemeti

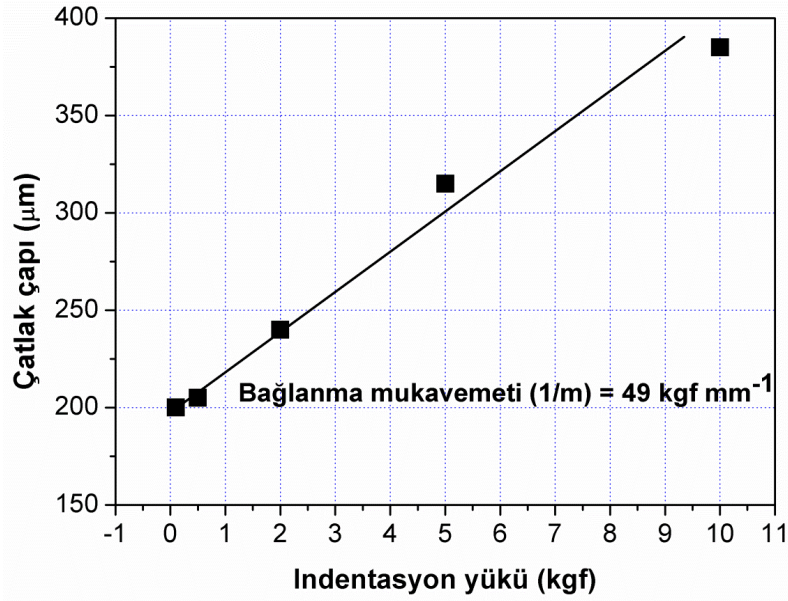
Kaplama tabakasının altlığa bağlanma mukavemeti çizilme testi [143-145] veya indentasyon yöntemi [150-152] uygulanarak ifade edilebilmektedir. Bu çalışmada, kaplama tabakasının altlığa bağlanma durumu indantasyon yöntemine

göre belirlenmiştir. Şekil 13.2’de verilen mikroyapı görüntülerinde farklı indentasyon yüklerinin kaplama yüzeyine uygulanması sonucunda yüzeyde oluşan iz ve çevresinde oluşan çatlaklar görülmektedir. Bu yöntemde, kademeli bir şekilde arttırılan yük ile yüzeyde indentasyon izi ve iz çevresinde oluşan kırılma ve çatlaklar incelenmektedir. Çatlak oluşumuna neden olan en düşük yük kritik yük (P_{crit}) olarak tanımlanmaktadır [151]. Bu çalışmada kullanılan en düşük yük olan 0,1 kgf değerinde izin etrafında kırılma ve çatlakların oluşması, kaplamanın dayanma limitinin düşük olduğunun bir ön göstergesidir.



Şekil 13.2. WC/(Ta+W) kaplanmış SiAlON numunelerin yüzeylerine (a) 0,1, (b) 0,5, (c) 2, (d) 5 ve (e) 10 kgf yüklerle uygulanan indentasyon izleri ve hasarlı bölümlerin SE-SEM görüntüleri

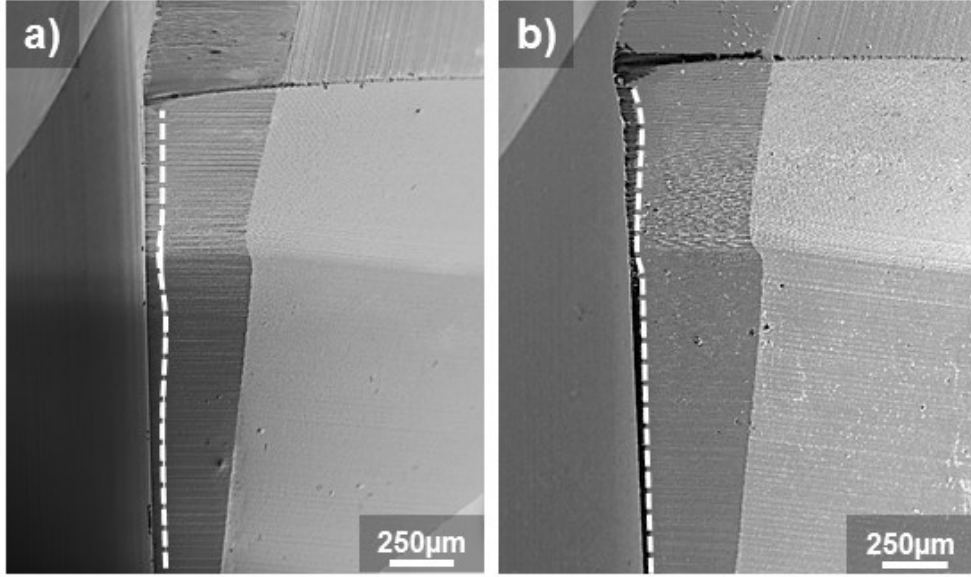
Şekil 13.3'te, izlerin etrafında oluşan çatlakların çap uzunluklarının uygulanan indent yükü ile değişim grafiği verilmektedir. Grafikte elde edilen doğrunun ters eğimi (dP/dx) kaplamanın çatlak ilerlemesine karşı direncini ya da başka bir deyişle kaplama tabakasının bağlanma mukavemetini göstermektedir [150]. Buradan $WC/(Ta+W)$ kaplamanın SiAlON altlık üzerine bağlanma mukavemeti 49 kgf mm^{-1} olarak hesaplanmıştır. SiAlON altlık üzerine çok kristal elmas kaplamanın bağlanma mukavemeti farklı çalışmalarda 162 ile $\sim 243 \text{ kgf mm}^{-1}$ arasında hesaplanmıştır [150,153,154]. Elde edilen 49 kgf mm^{-1} değeri benzer yöntemlerle hesaplanan SiAlON-elmas kaplama malzemesinin değerleriyle kıyaslandığında oldukça düşüktür. Bununla birlikte, indentasyon yöntemi ile belirlenen kritik yük (P_{crit}), kaplama tabakasının bağlanma özelliğinin yanında sertlik ve kırılma tokluğu değerlerine de bağlıdır [150].



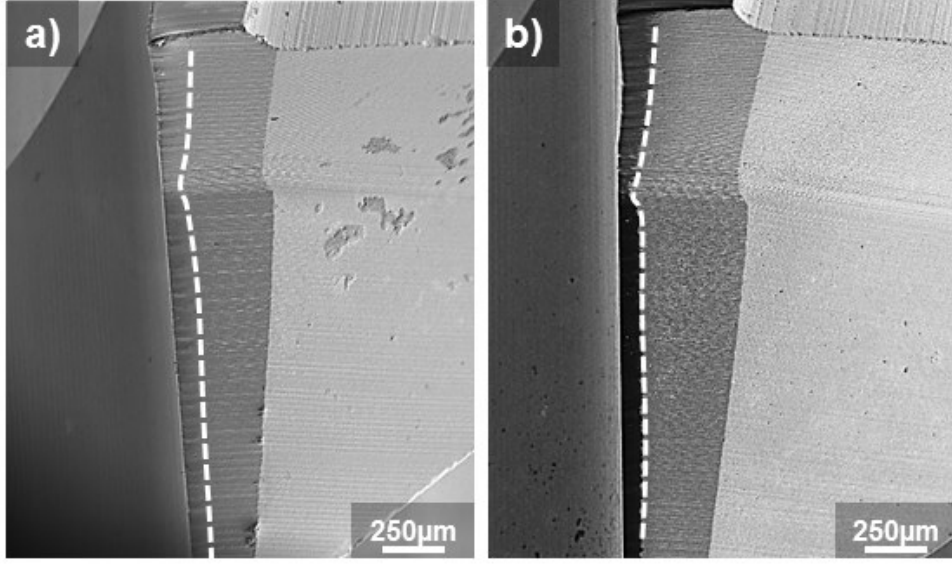
Şekil 13.3. Farklı indentasyon yüklerinin kaplama tabakasında oluşturduğu çatlak uzunluklarının değişimi

13.4. Kaplamanın Matkap Ucu Aşınma Performansına Etkisi

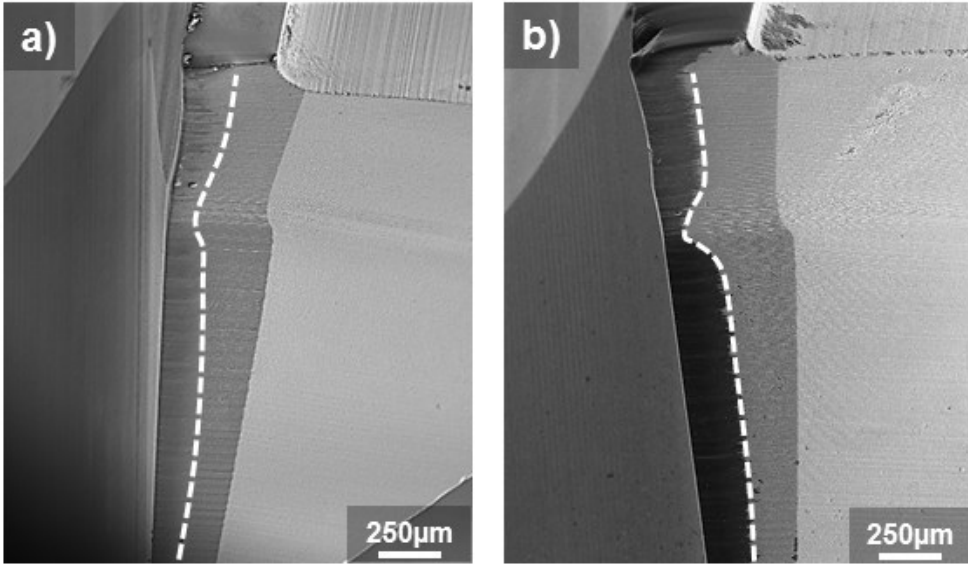
WC/(Ta+W) kaplamanın SiAlON matkap uçlarının aşınma dayanımına olan etkileri, CFRP malzemelerin delme testleri ile kıyaslamalı olarak belirlenmiştir. Aynı geometrik özelliklere sahip kaplamalı ve kaplamasız SiAlON matkap uçlarının 1, 5, 15, 35 ve 65. delik sonunda kesme kenarlarında meydana gelen aşınmalar incelenmiştir. Şekil 13.4-13.8'de sırasıyla 1, 5, 15, 35 ve 65. delik sonrasında uçların birincil kesme kenarlarının görüntüleri verilmektedir.



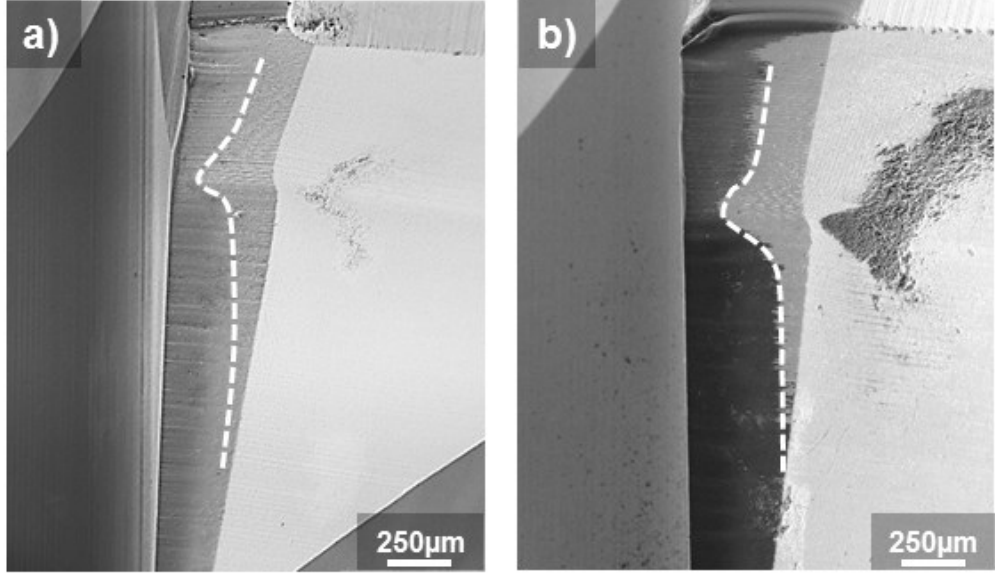
Şekil 13.4. (a) Kaplanmamış ve (b) kaplanmış matkap uçlarının 1. delik sonunda kenar görüntüleri



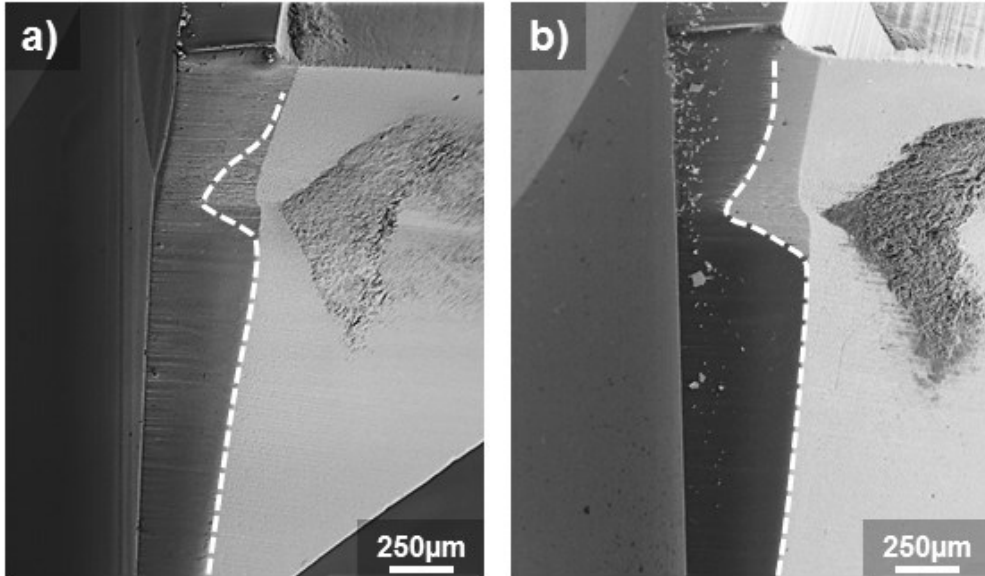
Şekil 13.5. (a) Kaplanmamış ve (b) kaplanmış matkap uçlarının 5. delik sonunda kenar görüntüleri



Şekil 13.6. (a) Kaplanmamış ve (b) kaplanmış matkap uçlarının 15. delik sonunda kenar görüntüleri



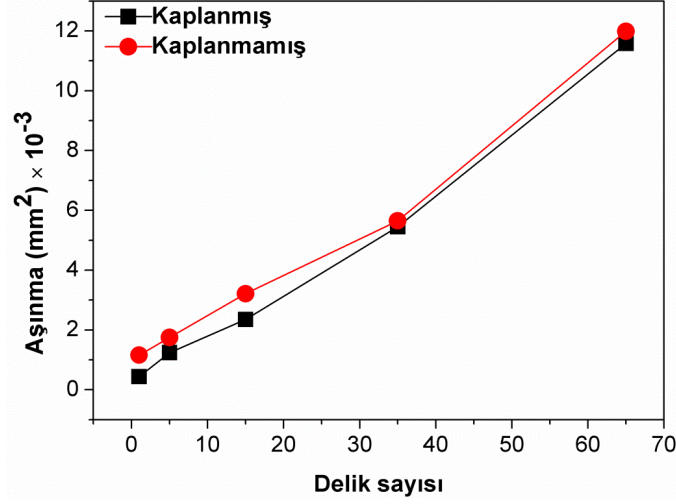
Şekil 13.7. (a) Kaplanmamış ve (b) kaplanmış matkap uçlarının 35. delik sonunda kenar görüntüleri



Şekil 13.8. (a) Kaplanmamış ve (b) kaplanmış matkap uçlarının 65. delik sonunda kenar görüntüleri

Aşınmış kenarların SEM görüntüleri incelendiğinde, 1. delikten itibaren kaplama tabakasının altlıktan ayrıldığı ve bunun sonucunda da altlığın aşınma durumunda kayda değer bir iyileşmenin sağlanamadığı görülmektedir (Şekil 13.9). Kaplama malzemesinden beklenen aşınma dayanımı artışının

sağlanamamış olması kaplama ile altlık malzemelerin bağlanma mukavemetlerinin zayıf olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 13.9. Kaplanmış ve kaplanmamış SiAlON matkap uçlarının delme sürecindeki aşınma davranışları

13.5. Sonuçlar

Kaplama talaşlı imalat sektöründe kesici malzemelerin kullanım ömürlerinin arttırılmasında yaygın biçimde kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Özellikle, pek çok malzemenin işlenmesinde kullanılan WC-Co esaslı malzemelerin kaplanarak aşınma dayanımlarının arttırılması oldukça popüler bir uygulamadır. Buna karşın, seramik malzemeler kaplama malzemelerinin sağladığı bazı avantajları (yüksek sıcaklık özellikleri vb) bünyesinde barındırdıklarından genellikle kaplanmadan kullanılmaktadırlar. Ancak, CFRP kompozit malzemelerin işlenmesi gibi şiddetli aşınmanın olduğu uygulamalarda, bu malzemelerin yetersiz aşınma dayanımları kaplama malzemeleriyle geliştirilmeye açık durumdadır. Buradan yola çıkılarak, bu çalışmada geliştirilen SiAlON matkap uçlarının aşınma dayanımlarının WC/(Ta+W) kaplama ile arttırılması hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda kaplama ile SiAlON malzemesi arasındaki ara yüzey mukavemetinin yetersiz olması nedeniyle kaplamadan verim sağlanamamıştır.

14. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

SiAlON seramikleri sahip oldukları yüksek mekanik, ısıl ve kimyasal dayanım ile, gri dökme demirlerin ve süperalaşımaların tornalanmasında yaygın biçimde kullanılan kesici uç malzemeleridir. Bu tez çalışmasında, SiAlON seramiklerinin, havacılık endüstrisinde son yıllarda kullanımı sürekli artan ve işlenmesi zor malzemeler sınıfında yer alan CFRP kompozitlerin delme operasyonlarındaki performansları araştırılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Çalışmada, 3 farklı SiAlON malzemesi esas alınmıştır. 25A malzemesi %91 oranında β -SiAlON fazı içerirken, 25A'ya SiC ilave edilmesiyle elde edilen 25A-SiC malzemesi %100 β -SiAlON fazı içermektedir. SiC ilavesi ile α : β faz oranlarında meydana gelen değişim, SiC tanelerinin sistemdeki ilave oksit fazlarıyla oluşturdukları reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır. Bu reaksiyonlar ile sistemde α -SiAlON yapısı içerisinde yer alması gereken ilaveler gaz fazında uzaklaşmaktadır. SiC ilavesi, sistemdeki faz oranlarının dışında, β -SiAlON tanelerinin büyümesini engelleyici yönde bir etki göstermiştir. Mikroyapıda meydana gelen bu değişimlerin, malzemelerin mekanik özelliklerine de yansıdığı bulunmuştur. MDA1 kompozisyonu ise yüksek α -SiAlON içeriği ve yüksek z değeri ile yüksek sertlik özelliği ile ön plana çıkmaktadır.
- SiAlON malzemelerinin matkap ucu şeklinde üretilmeleri, matkap uçlarının karmaşık geometrik özellikleri nedeniyle taşlama ağırlıklı bir süreci zorunlu kılmaktadır. Taşlama sürecinin malzemelerin mekanik özelliklerine etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmada, kullanılan aşındırıcı boyutunun SiAlON malzemelerin mekanik özelliklerinde önemli bir etkisinin bulunduğu sonucuna varılmıştır. SiAlON malzemelerinin bileşiminde yer alan çoklu oksit sistemi bu malzemelerin Si_3N_4 seramiklerine kıyasla daha düşük sıcaklıklarda ($\cong 200^\circ\text{C}$), mükemmel bir çatlak iyileşme davranışına sahip olmasını sağlamaktadır. 1000°C sıcaklıkta 1 saat süre ile hava ortamında uygulanan ısıl işlem süreci ile gerçekleşen düşük hızlardaki oksidasyon reaksiyonları

çatlak iyileşmesine yetecek kadar bir amorf SiO₂ esaslı sıvı oluşturmaktadır. Sonuçta, bu sıcaklıkta mukavemet önemli ölçüde geri kazanılırken, sıcaklığın artması ile oksidasyon kinetiği artmakta ve yüzeyde oksit kristalleri oluşmaktadır. Bu durum, yüzey ve yüzey altı hasar bölgesinde soğuma sırasında ısıl genleşme farklılıklarına bağlı olarak kalıntı gerilmeler oluşturmakta ve mukavemet hızla azalmaktadır.

- 4 farklı matkap ucu geometrisinin SiAlON seramikleri için uygunluğu araştırılmıştır. Delaminasyonun temel nedeni olarak kabul edilen itme kuvveti, matkap ucunun kompozit malzeme içerisindeki ilerleme hızı ve matkap ucunun geometrik özellikleri tarafından belirlenmektedir. Gerçekleştirilen testler sonucunda, matkap ucunun düşük nokta açısına ve düşük keski kenar uzunluğuna sahip olması itme kuvvetinin de düşük olmasını sağlamaktadır. Buna göre, G-3 geometrisi sahip olduğu iki kademeli nokta açısı (120+30°) ile kesme bölgesinde en düşük itme kuvveti oluşturmaktadır. Ancak, delik kalitesi yalnızca delaminasyon miktarı ile değil, aynı zamanda delik çevresinde kesilmeden kalan fiberlerin miktarı ile de ölçülmektedir. Bu durumda, G3 geometrisi ile açılan deliklerde kesilmeden kalan fiberlerin miktarlarının fazla olması nedeniyle G-1 geometrisinin SiAlON malzemeler için daha uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Çalışma kapsamında farklı özelliklere sahip 25A, 25A-SiC ve MDA1 SiAlON esaslı matkap uçları ile WC-Co matkap ucunun kesme performansları birbirleriyle kıyaslanmış, malzemelerin özellikleri ile ilişkilendirilmiştir. SiAlON malzemeleri delme sürecinin başlangıcında kırılma yapılarına bağlı olarak mikro-pullanma mekanizması ile şiddetli bir aşınma gösterirken ilerleyen süreçte keski kenarının aşınmasıyla mekanizma düzenli aşınma şekline dönüşmektedir. Mikro-pullanma sürecinde kırılma direnci, düzenli aşınma sürecinde ise malzemelerin sertlikleri aşınma davranışında belirleyici olmaktadır. WC-Co malzemesinin yüksek kırılma direnci ile mikropullanmaya ve düşük Co içeriği ve WC tanelerinin yüksek sertliğiyle düzenli aşınma sürecine karşı dayanımının yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

- SiAlON matkap uçlarının aşınma dayanımlarının artırılması amacıyla uygulanan WC/(Ta+W) türü kaplamanın SiAlON altlık ile bağlanma mukavemetinin yetersiz olduğu ve bunun sonucunda da kaplanmış uçların, kaplanmamış olan uçlar ile benzer bir aşınma davranışına sahip olduğu görülmüştür.

CFRP kompozit malzemelerin delinmesinde, fiberlerin kırılmasıyla toz şeklinde oluşan ve yüksek aşındırıcı özelliğe sahip talaş, SiAlON matkap uçlarının şiddetli bir abrasif aşınmaya maruz kalmasına neden olmaktadır. Buna ilave olarak, farklı açılarda birbiri üzerine konumlandırılmış olan fiberler, kesme sırasında matkap ucu üzerinde çevrimsel yüklerin oluşumuna neden olmakta ve mikro-pullanma mekanizmasını tetiklemektedir. SiAlON seramikleri kırılma tokluğu ve sertlik açısından seramik malzemeler içerisinde önemli bir yere sahip olsalar da, delme sürecinde oluşan aşındırıcı etkiler, sürecin başarısında daha yüksek sertlik ve kırılma tokluğu kombinasyonunu zorunlu hale getirmektedir. Ancak, kesme sırasında oluşan talaş şeklinin değiştirilerek abrasif etkilerin azaltılması ile SiAlON seramiklerinin bu uygulamalarda kullanılabilmesinin mümkün olabileceği düşünülmektedir. Oluşan talaşın toz şeklinden, ucun kesme kenarı ile en az temas edebilecek parçalı şekle dönüştürülmesinin, yüksek kesme hızlarının kullanımı ile mümkün olabileceği ön görülmektedir. Seramik malzemeler için geliştirilen G-1 geometrisi için 600-1000 m/dk kesme hızlarının tavsiye edilmesi de bunun bir göstergesidir.

Çalışma kapsamında uygulanan WC/(Ta+W) sert kaplamanın SiAlON altlık ile düşük bağlanma mukavemetine sahip olması, kaplama teknolojisinin sürecin başarısı üzerine etkisinin belirlenmesini engellemiştir. Ancak, SiAlON malzemeler için uygun olduğu ifade edilen (Al,Ti)N veya benzer kimyasal uyum gösterebilecek bir kaplama türünün (Si_xN_y türü) tercih edilmesiyle aşınma dayanımının önemli derecede arttırılabileceği düşünülmektedir.

Matkap ucu geometrisi CFRP kompozit malzemelerin delme sürecinde geliştirilmeye açık parametrelerin başında gelmektedir. SiAlON matkap uçları için farklı geometrik tasarımların yapılarak aşındırıcı etkilerin en aza indirgenmesinin mümkün olabileceği düşünülmektedir.

15. KAYNAKLAR

- [1] Soutis, C., Fibre reinforced composite in aircraft construction, *Progr. Aerosp. Sci.*, **41**, 143–51, 2005.
- [2] Davim, J.P., Reis, P., Antonio, C.C., Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up, *Compos. Sci. Technol.*, **64**, 289–97, 2004.
- [3] Sinmezçelik, T., Avcu, E., Bora, M.Ö., Çoban, O., A review: fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, *Mater. Des.*, **32**, 3671–85, 2011.
- [4] Hufenbach, W., Dobrzanski, L.A., Gude, M., Konieczny, J., Czulak, A., Optimisation of rivet joints of CFRP composite material and aluminium alloy, *J. Achieve Mater. Manuf. Eng.*, **20**, 119–22, 2007.
- [5] Teti, R., Machining of composite materials. CIRP Annals, *Man. Technol.*, **51**, 611–34, 2002.
- [6] Abrao, A.M., Faria, P.E., Campos Rubio, J.C., Reis, P., Davim, J.P., Drilling of fiber reinforced plastics: a review, *J. Mater. Process. Technol.*, **186**, 1–7, 2007.
- [7] Mishra, R., Malik, J., Singh, I., Davim, J.P., Neural network approach for estimate the residual tensile strength after drilling in uni-directional glass fiber reinforced plastic laminates, *Mater. Des.*, **31**, 2790–5, 2010.
- [8] Wong, T.L., Wu, S.M., Croy, G.M., An analysis of delamination in drilling composite materials, *In: 14th National SAMPE technology conference*, Atlanta, GA, USA, 471–383, 1982.
- [9] Stone, R., Krishnamurthy, K., A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates, *Int. J. Mach. Tools. Manuf.*, **36**, 985–1003, 1996.

- [10] Gay, D., Hoa, S.V., Tsai, S.W., *Composite materials design and applications*, CRC Press, New York, A.B.D., 2003.
- [11] Lee, S.C., Jeong, S.T., Park, J.N., Kim, S.J., Chao, G.J., Study on drilling characteristic and mechanical properties of CFRP composites, *Acta Mechanica Solida Sinica*, **21**, 364–8, 2008.
- [12] Brinksmeier, E., Janssen, R., Drilling of Multi-Layer Composite Materials consisting of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP), Titanium and Aluminum Alloys, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **51-1**, 87-90, 2002.
- [13] Shyha, I.S., Soo, S.L., Aspinwall, D., Bradley, S., Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites, *J. Mater. Process. Technol.*, **210**, 1023–34, 2010.
- [14] Lopez De Lacalle, L.N., Lamikiz, A., Campa, F.J., Valdivielso, AFdz, Etxeberria, I., Design and test of multi-tooth tool for CFRP milling, *J. Compos. Mater.*, **43**, 3275–90, 2009.
- [15] Fan, Y.Q., Zhang, L.H., New development of extra-large composite aircraft components application technology – advance of aircraft manufacture technology, *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, **30(3)**, 534–43, 2009.
- [16] Gaitonde, vV.N., Karnik, S.R., Campos Rubio, J., Esteves Correia, A., Abrao, A.M., Paulo Davim, J., Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites, *J. Mater. Process. Technol.*, **203**, 431–8, 2008.
- [17] Jain, S., Yang, D.C.H., Delamination-free drilling of composite laminates, *ASME J. Eng. Indust.*, **116**, 475–81, 1994.
- [18] Hocheng, H., Dharan, C.K.H., Delamination during drilling in composite laminates, *ASME J. Eng. Indust.*, **112**, 236–9, 1990.

- [19] Faraz, A., Biermann, D., Weinert, K., Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **49**, 1185–96, 2009.
- [20] Khashaba, U.A., EI-Sobaty, I.A., Selmy, A.I., Megahed, A.A., Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part I–effect of machining parameters, *Composites: Part A*, **41**, 391–400, 2010.
- [21] Rawat, S., Attia, H., Characterization of the dry high speed drilling process of woven composites using machinability maps approach, *CIRP Annals–Manuf. Technol.*, **58**, 105–8, 2009.
- [22] Khashaba, U.A., Delamination in drilling GFR-thermoset composites, *Compos. Struct.*, **63**, 313–27, 2004.
- [23] Khashaba, U.A., EI-Sobaty, I.A., Selmy, A.I., Megahed, A.A., Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part II – effect of drill wear, *Composites: Part A*, **41**, 1130–7, 2010.
- [24] Sheikh-Ahmad, J.Y., *Machining of Polymer Composites*, Springer Science Business Media, LLC, 2009.
- [25] Astachov, V., *Geometry of Single Point Turning Tools and Drills–Fundamentals and Practical Applications*, Springer Verlag London Ltd., 2010.
- [26] Fernandes, M., Cook, C., Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part I. Fiver stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **46**, 70–5, 2006.
- [27] Iliescu, D., Gehin, D., Gutierrez, M.E., Girot, F., Modeling and tool wear in drilling of CFRP, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **50**, 204–13, 2010.
- [28] Khashaba, U.A., Seif, M.A. and Elhamid, M.A., Drilling analysis of chopped composites, *Composites Part A*, **38**, 61–70, 2007.

- [29] Zitoune, R., and Collombet, F., Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long-fibre composite structures, *Composites Part A*, **38**, 858–866, 2007.
- [30] Di Paolo, G., Kapoor, S.G., DeVor, R.E., An experimental investigation of the crack growth phenomenon for drilling of fiber-reinforced composite materials, *Journal of Engineering for Industry*, ASME Transaction, **118**, 104–110, 1996.
- [31] Jian, S., Yang, D.C.H., Effects of feed rate and chisel edge on delamination in composites drilling, *Journal of Engineering for Industry*, ASME Transaction, **115**, 398–405, 1993.
- [32] Karpat, Y., Değer, B, Bahtiyar, O., Drilling thick fabric woven CFRP laminates with double point angle drills, *Journal of Materials Processing Technology*, **212**, 2117-27, 2012.
- [33] Hocheng, H., Tsao, C.C., The path towards delamination-free drilling of composite materials, *J. Mater. Process. Technol.*, 167, 251–64, 2005.
- [34] Chen, W.C., Some experimental investigation in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **37**, 1097–1108, 1997.
- [35] Karnik, S.R., Gaitonde, V.N., Rubio, J.C., et al., Delamination analysis in high speed drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) using artificial neural network model, *Mater. Des.*, **29**, 1768–1776, 2008.
- [36] Tsao, C.C., Prediction of thrust force of step drill in drilling composite materials by Taguchi method and radial basis function network, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **36**, 11–8, 2008.
- [37] Velayudham, A. and Krishnamurthy, R., Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites, *J. Mater. Process. Technol.*, **185**, 204–209, 2007.

- [38] Piquet, R., Ferret, F., Lachaud, F., Swider, P., Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **31 (10)**, 1107–1115, 2000.
- [39] Durão, L.M.P., Gonçalves, D.J.S., Tavares J. M.R.S., Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates, *Composite Structures*, **92 (7)**, 1545-1550, 2010.
- [40] Hocheng, H., Tsao, C.C., Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits, *J. Mater. Process. Technol.*, **140**, 335–9, 2003.
- [41] Hocheng, H., Tsao, C.C., Effect of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials, *J. Mach. Tools Manuf.*, **46**, 1403–16, 2006.
- [42] Liu, D.F., Tang, Y.J., Cong W.L., A review of mechanical drilling for composite laminates, *Composite Structures*, **94**, 1265-1279, 2012.
- [43] Wang, J., Zhang Q., A study of high-performance plane rake faced twist drills. Part I: Geometrical analysis and experimental investigation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **48**, 1276– 1285, 2008.
- [44] Upadhyaya, G.S., Materials science of cemented carbides-an overview, *Materials and Design*, **22**, 483-489, 2001.
- [45] Chou, Y.K., Thompson, R.G., Kumar A., CVD-diamond technologies for dry drilling applications, *Thin Solid Films*, **518**, 7487–7491, 2010.
- [46] Williams, J.A., Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach, *Wear*, **225-229**, 1-7, 1999.
- [47] Zum Gahr, K.H., *Wear by hard particles*, *Tribology International*, **31 (10)**, 587-96, 1998.

- [48] Malhotra, S.K., Some studies on drilling of fibrous composites, *Journal of Materials Processing Technology*, **24**, 291–300, 1990.
- [49] Lin, S.C., Chen, I.K., Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed, *Wear*, **194**, 156–162, 1996.
- [50] Inoue, H., Aoyama, E., Hirogaski, T., Ogawa, K., Matushita, H., Kitahara, Y., Katayama, T., Influence of tool wear on internal damage in small diameter drilling in GFRP, *Composite Structures*, **39 (1)**, 55–62, 1997.
- [51] Velayudham, R., Krishnamurthy, T., Soundarapandian, Evaluation of drilling characteristics of high volume fraction fibre glass reinforced polymeric composite, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **45**, 399–406, 2005.
- [52] Weinert, K., Kempmann, C., Cutting temperatures and their effects on the machining behaviour in drilling reinforced plastic composites, *Advanced Engineering Materials*, **6 (8)**, 684–689, 2004.
- [53] Yoda, S., Takahashi, R., Wakashima, K., Umekawa, S., Fibre/matrix interface porosity formation in tungsten fibre/copper composites on thermal cycling, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **10 (11)**, 1796–1798, 1979.
- [54] Dharan, C.K.H., Fracture mechanics of composite materials, *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, **100 (3)**, 233–247, 1978.
- [55] Masuda, M., Kuroshima, Y., Chujo, Y., Failure of tungsten carbide–cobalt alloy tools in machining of carbon materials, *Wear*, **169**, 135–140, 1993.
- [56] Larsen-Basse, J., Koyanagi, E.T., Abrasion of WC–Co alloys by quartz, *ASME Journal of Engineering Industry*, **101**, 208–211, 1979.
- [57] Larsen-Basse, J., Abrasion mechanism-delamination to machining, in: *Proc. of Int. Conf. on the Fundamentals of Tribology*, MIT Press, Cambridge, 679–689, 1978.

- [58] Blombery, R.I., Perrot, C.M., Robinson, P.M., Abrasive wear of tungsten carbide–cobalt composites. Wear mechanisms, *Material Science and Engineering*, **13**, 93–100, 1974.
- [59] Rawat, S., Attia, H., Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites, *Wear*, **267**, 1022–1030, 2009.
- [60] Sheikh-Ahmad, J., Sirdhar, G., Edge trimming of CFRP composites with diamond coated tools: edge wear and surface characteristics. *SAE Technical Paper*, **1**, 1526, 2002.
- [61] Ramulu, M., Faridnia, M., Garbini, J.L., Jorgensen, J.E., Machining of graphite/epoxy materials with polycrystalline diamond (PCD) tools, in Ramulu, M., Hashish, M. (eds), *Machining Characteristics of Advanced Materials*, ASME Publication, New York, NY, **16**, 33–40, 1989.
- [62] Philbin, P., Gordon, S., Characteristics of the wear behaviour of polycrystalline diamond (PCD) tools when machining wood-based composites, *Journal of Materials Processing Technology*, **162–163**, 665–672, 2005.
- [63] Park, K.H., Beal, A., Kim, D., Kwonc, P., Lantripd, J., Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools, *Wear*, **271**, 2826-35, 2011.
- [64] Rosenflanz, A., Silicon nitride and sialon ceramics, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, **4**, 453–459, 1999.
- [65] Riley, F.L., Silicon Nitride and Related Materials, *J. Am. Ceram. Soc.*, **83** [2], 245–65, 2000.
- [66] Dressler, W. ve Riedel, R., Progress in Silicon-Based Non-Oxide Structural Ceramics, *Int. J. of Refractory Metals & Hard Materials*, **15**, 13-47, 1997.

- [67] Kramer, M., Wittmuss, D., Kuppers, H., Hoffmann, M. J. ve Petzow, G., Relations between crystal-structure and growth-morphology of beta-Si₃N₄, *J. Cryst. Growth*, **140**, 157–166, 1994.
- [68] Kramer, M., Hoffmann, M.J. ve Petzow, G., Grain growth studies of silicon nitride dispersed in an oxynitride glass, *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**, 2778–2784, 1994.
- [69] Satet, R. L., Hoffmann, M.J. ve Cannon, R. M., Experimental evidence of the impact of rare-earth elements on particle growth and mechanical behaviour of silicon nitride, *Materials Science and Engineering A*, **422** 66–76, 2006.
- [70] Huang, Z. K., Tien, T. Y. and Yen, D. S., Subsolidus phase relationship in the Si₃N₄±AlN±rare earth oxide systems, *J. Am. Ceram. Soc.*, **69**, C241-C242, 1986.
- [71] Shen, Z., Nygren, M. ve Halenius, U., Absorbtion spectra of rare- earth doped α-sialon ceramics, *J.Mater. Sci. Lett.*, **16**, 263-266, 1997.
- [72] Shen, Z. ve Nygren, M., On the extention of the α-sialon phase area in yttrium and rare-earth doped systems, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **17**, 1639-1645, 1997.
- [73] Izhevskiy, V.A., Genova, L.A., Bressiani, J.C. ve Aldinger F., Progress in SiAlON ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **20**, 2275-2295, 2000.
- [74] Fang-Fang, X., Shu-Lin, W., Nordberg, L.-O. and Ekström, T., Nucleation and growth of the elongated α-SiAlON, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **17**, 1631-1638, 1997.
- [75] Nordberg, L.-O., Shen, Z., Nygren, M. and Ekström, T., On the extension of the α-SiAlON solid solution range and anisotropic grain growth in Sm-doped α-SiAlON ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **17**, 575-580, 1997.
- [76] Hwang, C.J., Susintzky, D.W., Beaman, D.R., Preparation of multication α-SiAlON containing strontium, *J. Am. Ceram. Soc.*, **78(3)**, 588–92, 1995.

- [77] Shen, Z., Ekstrom, T., Nygren, M., Temperature stability of samarium-doped α -SiAlON ceramics., *J. Eur. Ceram. Soc.*, **16**, 43–53, 1996.
- [78] Wood, C.A., Zhao, H., Cheng, Y-B., Microstructural development of calcium α -SiAlON ceramics with elongated grains, *J. Am. Ceram. Soc.*, **82(2)**, 421–8, 1999.
- [79] Mandal, H., Thompson, D.P., α/β -Sialon transformation in calcium-containing α -SiAlON ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **5(5)**, 543–52, 1998.
- [80] Mandal, H., New developments in α -SiAlON ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **19(13–14)**, 2349–57, 1999.
- [81] Mandal, H., Hoffmann, M.J., Preparation of multiple-cation α -SiAlON ceramics containing lanthanum, *J. Am. Ceram. Soc.*, **82(1)**, 229–32, 1998.
- [82] Hampshire, S., Silicon nitride ceramics – review of structure, processing and properties, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **24 (1)**, 43-50, 2007.
- [83] Becher, P.F., Sun, E.Y., Plucknett, K.P., Alexander, K.B., Hsueh, C-H., Microstructural design of silicon nitride with improved fracture toughness: I. Effects of grain shape and size. *J. Am. Ceram. Soc.*, **81 (11)**, 2821–30, 1998.
- [84] Dressler, W., Kleebe, H.J., Hoffmann, M.J., Ruhle, M., Petzow, G.. Model experiments concerning abnormal grain growth in silicon nitride, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **16**, 3–14, 1996.
- [85] Lee, C.J., Kim, D.J., Effect of α -Si₃N₄ particle size on the micro-structural evolution of Si₃N₄ ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.*, **82(3)**, 753–6, 1999.
- [86] Kleebe, H.J., Pezzotti, G., Ziegler, G., Microstructure and fracture toughness of Si₃N₄ ceramics: combined roles of grain morphology and secondary phase chemistry, *J. Am. Ceram. Soc.*, **82(7)**, 1857–67, 1999.

- [87] Sun, E.Y., Becher, P.F., Plucknett, K.P., Hsueh, C-H., Alexander, K.B., Waters, S.B., Hirao, K., Brito, M.E., Microstructural design of silicon nitride with improved fracture toughness: II. Effects of yttria and alumina additives, *J. Am. Ceram. Soc.*, **81(11)**, 2831–40, 1998.
- [88] Sun, E.Y., Becher, P.F., Hsueh, C-H., Painter, G.S., Waters, S.B., Hwang, S-L., Hoffmann, M.J., Debonding behavior between β -Si₃N₄ whiskers and oxynitride glasses with or without an epitaxial β -SiAlON interfacial layer, *Acta mater.*, **47(9)**, 2777–85, 1999.
- [89] Li, L., He, N., Wang, M. ve Wang, Z.G., High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts, *Journal of Materials Processing Technology*, **129**, 127-130, 2002.
- [90] Lo Casto, S., Lo Valvo, E., Lucchini, E., Maschio, S., Piacentini, M., Ruisi V.F., Ceramic materials wear mechanisms when cutting nickel-based alloys, *Wear*, **225-229**, 227-233, 1999.
- [91] Ezugwu, E.O., Bonney, J., Yamane, Y., An overview of the machinability of aeroengine alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, **134**, 233-253, 2003.
- [92] Kumar, R., Calis Acikbas N., Kara, F., Mandal, H. ve Basu, B. Microstructure–Mechanical Properties–Wear Resistance Relationship of SiAlON Ceramics, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **40A**, 2319-32, 2009.
- [93] Çalış Açıkbaz, N., *Tribolojik uygulamalara yönelik SiAlON seramiklerinin geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2009.
- [94] Jones, M.I., Hirao, K., Hyuga, H., Yamauchi, Y. ve Kanzaki, S., Wear properties of Y– α/β composite sialon ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, **23**, 1743–1750, 2003.

- [95] Turrini C., *Ceramic drill bit for high speed drilling of composites*, A.B.D. Patent No: US2009/0028654 A1, 2009.
- [96] http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/corodrill_854_856
(11.06.2013)
- [97] ASTM standartları-B962, *Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle I*.
- [98] Evans, A. G., Charles, E. A., Fracture toughness determination by indentation, *J. Am. Ceram. Soc.*, **59**, 371– 376, (doi:10.1111/j.1151-2916.1976.tb10991.x), 1976.
- [99] Liu, Q., Gao, L., Yan, D.S. ve Thompson, D.P., Hard sialon ceramics reinforced with SiC nanoparticles, *Materials Science and Engineering A*, **269**, 1-7, 1999.
- [100] Koh, Y.H., Kim, H.W. ve Kim, H.E., Microstructural evolution and mechanical properties of Si₃N₄-SiC (nanoparticle)-Si₃N₄ (whisker) composites, *Journal of Materials Research*, **15**, 364-368, 2000.
- [101] Baldacim, S.A., Silva, O.M.M. ve Silva, C.R.M., TEM evaluation of interface of SiC-whiskers-reinforced Si₃N₄, *Acta Microscopica*, **12**,185-188, 2003.
- [102] Rendtel, P., Rendtel, A. ve Hubner, H., Mechanical properties of gas pressure sintered Si₃N₄/SiC nanoparticles, *Journal of European Ceramic Society*, **22**, 2061-2070, 2002.
- [103] Saito, H., Iwabuchi, A. ve Shimizu, T., Effects of Co content and WC grain size on wear of WC cemented carbide, *Wear*, **261**, 126–132, 2006.
- [104] Jack, K. H., Silicon nitride sialons and related ceramics, *In Ceramics and Civilization*, **3**, High-Technology Ceramics, *American Ceramic Society*, Columbus, OH, 259-288, 1986.

- [105] Calis Acikbas, N., Yurdakul, H., Mandal, H., Kara, F., Turan, S., Kara, A., Bitterlich, B., Effect of sintering conditions and heat treatment on the properties, microstructure and machining performance of α - β -SiAlON ceramics, *Journal of European Ceramic Society*, **32**, 1321-27, 2012.
- [106] Uludag, A., Turan, D., High temperature bending creep behavior of a multi-cation doped α - β -SiAlON composite, *Ceramics International*, **37**, 921–926, 2011.
- [107] Zhou, R., Feng, Z., Liang, Y., Zheng, F. ve Xian, Q., Reactions between SiC and sintering aids in Si₃N₄/SiC nanocomposites and their consequences, *Ceramics International*, **27**, 571–576, 2001.
- [108] Campbell, Geoffrey H., Whisker toughening: a comparison between aluminum oxide and silicon nitride toughened with silicon carbide, *Journal of the American Ceramic Society*, **73(3)**, 521-530, 1990.
- [109] Barikani, M., Saidpour, H., Sezen, M., Mode-I Interlaminar Fracture Toughness in Unidirectional Carbon-fibre/Epoxy Composites, *Iranian Polymer J.*, **11**, 413-23, 2002.
- [110] Rao, G.V.G., Mahajan, P., Bhatnagar, N., Micro-mechanical modelling of machining of FRP composites – Cutting force analysis, *Composites Science and Technology*, **67**, 579–593, 2007.
- [111] Liu, M., Takagi, J.I., Tsukuda, A., Strength recovery of ground ceramics via electric furnace heating, *Journal of Materials Processing Technology*, **127**, 107–114, 2002.
- [112] Zhang, B., Zheng, X.L., Tokura, H., Yoshikawa, M., Grinding induced damage in ceramics, *Journal of Materials Processing Technology*, **132**, 353–364, 2003.
- [113] Agarwal, S. ve Rao, P.V., Grinding characteristics, material removal and damage formation mechanisms in high removal rate grinding of silicon carbide, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **50**, 1077–1087, 2010.

- [114] Huang, H., Yin, L. ve Zhou, L., High speed grinding of silicon nitride with resin bond diamond wheels, *Journal of Materials Processing Technology*, **141**, 329–336, 2003.
- [115] Uhlmann, E. ve Hubert, C., Tool grinding of end mill cutting tools made from high performance ceramics and cemented carbides, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **60**, 359–362, 2011.
- [116] Li, W., Wang, Y., Fan, S., Xu, J., Wear of diamond grinding wheels and material removal rate of silicon nitrides under different machining conditions, *Materials Letters*, **61**, 54–58, 2007.
- [117] Ando, K., Houjyou, K., Chu, M.C., Takeshita, S., Takahashi, K., Sakamoto, S., Sato, S., Crack-healing behavior of Si₃N₄/SiC ceramics under stress and fatigue strength at the temperature of healing (1000°C), *Journal of the European Ceramic Society*, **22**, 1339–1346, 2002.
- [118] Houjou, K., Ando, K., Liu, S., Sato, S., Crack-healing and oxidation behavior of silicon nitride ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, **24**, 2329–2338, 2004.
- [119] Kim, Y.W., Ando, K. ve Chu, M.C., Crack-Healing Behavior of Liquid-Phase-Sintered Silicon Carbide Ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.*, **86** [3], 465–70, 2002.
- [120] Takahashi, K., Yokouchi, M., Lee, S.K., ve Ando, K., Crack-healing behavior of Al₂O₃ toughened by SiC whiskers, *J. Am. Ceram. Soc.*, **86**(12), 2143–47, 2003.
- [121] Chou, I.A., Chan, H.M. ve Harmer, M.P., Effect of annealing environment on the crack healing and mechanical behavior of silicon carbide-reinforced alumina nanocomposites, *J. Am. Ceram. Soc.*, **81**(5), 1203–208, 1998.

- [122] Liu, M., Takagi, J.I., Tsukuda, A., Investigation of strength degradation and strength recovery via short time heating for ground alumina ceramics with different grain size, *Journal of Materials Processing Technology*, **145**, 276–280, 2004.
- [123] Osada, T., Nakao, W., Takahashi, K. ve Ando, K., Kinetics of self-crack-healing of alumina/silicon carbide composite including oxygen partial pressure effect, *J. Am. Ceram. Soc.*, **92(4)**, 864–869, 2009.
- [124] Ono, M., Nakao, W., Takahashi, K. ve Ando, K., Strength recovery of machined Al₂O₃/SiC composite ceramics by crack healing, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **30**, 1140–1148, 2007.
- [125] Ando, K., Furusawa, K., Takahashi, K. ve Sato, S., Crack-healing ability of structural ceramics and a new methodology to guarantee the structural integrity using the ability and proof-test, *Journal of the European Ceramic Society*, **25**, 549–558, 2005.
- [126] Ando, K., Chu, M.C., Tsuji, K., Hirasawa, T., Kobayashi, Y., Sato, S., Crack healing behaviour and high-temperature strength of mullite/SiC composite ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, **22**, 1313–1319, 2002.
- [127] Lee, S.K., Ono, M., Nakao, W., Takahashi, K., Ando, K., Crack-healing behaviour of mullite/SiC/Y₂O₃ composites and its application to the structural integrity of machined components, *Journal of the European Ceramic Society*, **25**, 3495–3502, 2005.
- [128] Zhang, Y.H., Edwards, L. ve Plumbridge, W.J., Crack Healing in a Silicon Nitride Ceramic, *J. Am. Ceram. Soc.*, **81(7)**, 1861–68, 1998.
- [129] Jung, Y.S., Nakao, W., Takahashi, K., Ando, K. ve Saito, S., Crack Healing of Machining Cracks Introduced by Wheel Grinding and Resultant High-Temperature Mechanical Properties in a Si₃N₄/SiC Composite, *J. Am. Ceram. Soc.*, **92(1)**, 167–173, 2009.

- [130] Yao, F., Ando, K., Chu, M.C. ve Sato, S., Crack-healing behavior, high temperature and fatigue strength of SiC-reinforced silicon nitride composite, *Journal of Materials Science Letters*, **19**, 1081-83, 2000.
- [131] Harrer, W., Danzer, R. ve Morrell R., Influence of surface defects on the biaxial strength of a silicon nitride ceramic – Increase of strength by crack healing, *Journal of the European Ceramic Society*, **32**, 27–35, 2012.
- [132] Ando K., Shirai Y., Nakatani, M., Kobayashi, Y. ve Sato, S., (Crack-healing+proof test): a new methodology to guarantee the structural integrity of a ceramics component, *Journal of the European Ceramic Society*, **22**, 121–128, 2002.
- [133] Choi, S. R. ve Tikare, V., Crack Healing of Alumina with a Residual Glassy Phase: Strength, Fracture Toughness and Fatigue, *Mater. Sci. Eng.,A*, **171**, 77–83, 1993.
- [134] Choi, S. R. ve Tikare, V., Crack Healing Behaviour of Hot Pressed Silicon Nitride Due to Oxidation, *Scr. Metall. Mater.*, **26**, 1263–68, 1992.
- [135] Quinn, G. D., Ives, L. K. ve Jahanmir, S., On the Nature of Machining Cracks in Ground Ceramics: SRBSN Strengths and fractographic analysis, *Machining Science and Technology*, **9**, 169–210, 2005.
- [136] Taylor, D., The thermal expansion behaviour of framework silicates, *Mineralogical Magazine*, **38**, 593-604, 1972.
- [137] Okamoto, T. ve Ukyo, Y., Thermal expansion coefficient of Y- α -Sialon, *Journal of Materials Science*, **32**, 2473-2477, 1997.
- [138] Sun, Z., Zhou, Y., Wang, J. ve Li, M., Thermal Properties and Thermal Shock Resistance of γ -Y₂Si₂O₇, *J. Am. Ceram. Soc.*, **91(8)**, 2623–2629, 2008.
- [139] Dobrzanski, L.A., Stazsuk, M., PVD and CVD gradient coatings on sintered carbides and SiAlON tool ceramics, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **43(2)**, 552-576, 2010.

- [140] Movchan, B.A., Yakovchuk, K.Y., Graded thermal barrier coatings, deposited by EB-PVD, *Surface and Coatings Technology*, **188-189**, 85-92, 2004.
- [141] Dobrzanski, L.A., Mikula, J., The structure and functional properties of PVD and CVD coated Al₂O₃+ZrO₂ oxide tool ceramics, *Journal of Materials Processing Technology*, **167**, 438-446, 2005.
- [142] Dobrzanski, L.A., Staszuk, M., Konieczny, J., Kwaoeny, W., Pawlyta, M., Structure of TiBN coatings deposited onto cemented carbides and sialon tool ceramics, *Archives of Materials Science and Engineering*, **38(1)**, 48-54, 2009.
- [143] Dobrzanski, L.A., Staszuk, M., Golombek, K., Pancielejko, M., Properties of Ti(B,N) coatings deposited onto cemented carbides and sialon tool ceramics, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **41(1-2)**, 66-73, 2010.
- [144] Pakula, D., Dobrzanski, L.A., Kriz, A. ve Staszuk, M. Investigation of PVD coatings deposited on the Si₃N₄ and sialon tool ceramics, *Archives of Materials Science and Engineering*, **46(1)**, 53-60, 2010.
- [145] Dobrzanski, L.A., Staszuk, M., Surface modification of sialon ceramics and cemented carbides by PVD coating deposition *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **49(2)**, 158-65, 2011.
- [146] Almeida, F.A., Fernandes, A.J.S., Silva, R.F., Oliveira, F.J., Re-sharpenable thick CVD diamond-coated Si₃N₄ tools for hard metal turning, *Surface & Coatings Technology*, **201**, 1776–1782, 2006.
- [147] Cline, B.L. Olson, J.M. in: Asmussen, J. Reinhard D.K. (Eds.), *Diamond Films Handbook*, Dekker, New York, p. 425, 2001.

- [148] Belmonte, M., Fernandes, A.J.S., Costa, F.M., Oliveira, F.J., Silva, R.F., Adhesion behaviour assessment on diamond coated silicon nitride by acoustic emission, *Diamond Relat. Mater.*, **12**, 733-737, 2003.
- [149] Amaral, M., Oliveira, F.J., Belmonte, M., Fernandes, A.J.S., Costa, F.M., Silva, R.F., Tailored Si₃N₄ Ceramic Substrates for CVD Diamond Coating, *Surf. Eng.*, **19**, 410-16, 2003.
- [150] Mallika, K. ve Komanduri R., Low pressure microwave plasma assisted chemical vapor deposition (MPCVD) of diamond coatings on silicon nitride cutting tools, *Thin Solid Films*, **396**, 145–165, 2001.
- [151] Cappelli, E., Esposito, L., Pinzari, F., Mattei, G., Orlando S., Diamond nucleation and adhesion on sintered nitride ceramics, *Diamond and Related Materials*, **11**, 1731–1746, 2002.
- [152] Chae, K.W., Baik, Y.J., Kim, D.Y., Dependence of the diamond coating adhesion on the microstructure of SiC-based substrates, *Diamond and Related Materials*, **8**, 1018–1021, 1999.
- [153] Huang, T.H., Kuo, C.T., Lin, T.S., The role of cemented WC substrate morphology on the diamond film growth and cracking resistance, *Scripta Metallurgica*, **26**, 1481-86, 1992.
- [154] Yen, T.Y., Kuo, C.T., Hsu, S.E., Adhesion of diamond films on various substrates, *Mat. Res. Soc. Proc.*, **168**, 207, 1990.