

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜPERALAŞIMLARIN AÇIK VE KONTROLLÜ
ATMOSFERDE DÖKÜMÜ**

Metalurji ve Malz. Müh. Bülent BAHADIR

**FBE Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mustafa Çiğdem

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	iii
KISALTMA LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. SÜPERALAŞIMLARIN SINIFLANDIRILMASI.....	3
2.1 Demir Esaslı Süperalaşımlar.....	3
2.2 Kobalt Esaslı Süperalaşımlar	5
2.3 Nikel Esaslı Süperalaşımlar	6
3. SÜPERALAŞIMLARDA ALAŞIM ELEMENTİ ETKİSİ.....	12
4. SÜPERALAŞIMLARDA SERTLEŞTİRME MEKANİZMALARI.....	14
4.1 Katı Eriyik Sertleşmesi.....	14
4.2 Çökelme Sertleşmesi	14
4.3 Tane Sınırı Sertleştirmesi	15
4.4 Süperalaşımlarda Oluşması İstenmeyen Fazlar	17
5. SÜPERALAŞIMLARIN KULLANIM YERLERİ.....	18
5.1 Endüstriyel Gaz Türbinleri	20
6. SÜPERALAŞIM ÜRETİM YÖNTEMLERİ	23
6.1 Hassas Döküm.....	25
6.2 Açık Atmosferde Döküm.....	27
6.2.1 İndüksiyon Ocağı Çalışma Prensibi.....	28
6.2.2 İndüksiyon Ocak Potası	28
6.2.3 İndüksiyon Ocaklarında Kullanılan Astar Malzemesi.....	29
6.3 Vakum İndüksiyon Ocağı.....	29
6.3.1 Vakum Sistemi	31
6.3.2 Vakum Ölçerler ve Vakum Seviyeleri.....	32
6.4 Vakum İndüksiyon Ocağında Döküm İşlemleri	33
6.4.1 Kalıplama	33
6.4.2 Vakum İndüksiyon Ocağında Döküm Sıcaklığı Tayini.....	34

6.4.3	Vakum İndüksiyon Ocağında Ergitme.....	36
7.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	37
7.1	Deneyde Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar	37
7.2	Deneyde Kullanılacak Malzeme	37
7.3	Kalıp Hazırlama	39
7.4	Ergitme, Alaşımlama ve Döküm.....	40
7.5	Yapısal Muayene ve Testler	44
8.	DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	46
8.1	Kimyasal Analiz	46
8.2	Mikrosertlik	47
8.3	Mikroyapı İncelemesi.....	47
8.4	Çekme Deneyi.....	49
9.	SONUÇLAR.....	52
	KAYNAKLAR.....	53
	ÖZGEÇMİŞ.....	55

SİMGE LİSTESİ

γ	Gamma fazı
γ'	Gamma üstü (prime) fazı
γ''	Gamma iki üstü (double prime) fazı
σ	Sigma fazı

KISALTMA LİSTESİ

DS	Yönlendirilmiş katılaşma (directional solidification)
EGT	Endüstriyel gaz türbini
KHM	Kübik hacim merkez
KYM	Kübik yüzey merkez
VIM	Vakum indüksiyon ocağı (vakum induction melting)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Periyodik tablo üzerinde elementlerin süperalaşımlardaki etkileri (Gibbons 1985)...	7
Şekil 2.2 Süperalaşım mikroyapısı ve alaşım elementleri etkisi (Sims 1986)	8
Şekil 2.3 Süperalaşımlara uygulanan farklı katılaştırma teknikleri ve oluşan mikroyapılar (Pollock, 2008)	9
Şekil 3.1 Nikel esaslı süperalaşımlarda krom içeriğinin mikroyapıya etkileri (Bradley, 1989)	12
Şekil 4.1 Dayanım arttırma mekanizmalarının süperalaşımlar üzerindeki etkisi (Bradley 1989)	17
Şekil 5.1 Nikel esaslı süperalaşımların etkin olarak kullanıldığı gaz türbin motoru (Loria, 1992)	19
Şekil 5.2 Bilgisayarla simule edilmiş bir uçak motoru ve önemli bölümleri	20
Şekil 5.3 Gaz türbin gövdesi ve kanatlar	21
Şekil 6.1 Üretim yöntemlerinin malzeme özelliklerine etkisi (VerSnyder, 1996)	24
Şekil 6.2 Türbin kanatlarında tane yapısı kontrolü, (a) geleneksel eş eksenli taneler, (b) yönlendirilmiş katılaşma ile sütunsal taneler ve (c) tek kristal (Booth-Morrison, 2008).....	25
Şekil 6.3 Açık atmosfer indüksiyon Ocağı.....	27
Şekil 6.4 İndüksiyon ocağı potası.....	28
Şekil 6.5 Şematik olarak vakum indüksiyon ocağı (Hebeisen, 1971)	30
Şekil 6.6 Vakum indüksiyon ocağının teknik çizimi	32
Şekil 6.7 Kalıp odası dikey yerleştirilmiş iki odalı vakum indüksiyon ergitme ocağı	35
Şekil 7.1 X-Işını Spektrometresi.....	37
Şekil 7.2 Hazırlanan mum model salkımları	39
Şekil 7.3 Açık atmosfer dökümde kullanılan indüksiyon ocağı.....	40
Şekil 7.4 Kontrollü atmosfer dökümlerinde kullanılan vakum indüksiyon ocağı.....	41
Şekil 7.5 Döküm sonrası metalin seramikten arındırılması için kullanılan kumlama makinesi	42
Şekil 7.6 Döküm sonrası kalıbın görünümü	43
Şekil 7.7 Kumlama sonrası döküm parça.....	43
Şekil 7.8 Mikroyapı fotoğraflarının çekilmesinde kullanılan optik mikroskop	44
Şekil 7.9 Çekme deneylerinde kullanılan çekme deneyi cihazı	45
Şekil 8.1 Döküm sonrası numunelerin mikroyapı görüntüleri (2,5X) (a)Açık atmosfer döküm, (b) Kontrollü atmosfer döküm.....	48
Şekil 8.2 Döküm sonrası numunelerin mikroyapı görüntüleri (10X) (a)Açık atmosfer döküm, (b) Kontrollü atmosfer döküm.....	48
Şekil 8.3 Döküm sonrası numunelerin mikroyapı görüntüleri (50X) (a)Açık atmosfer döküm, (b) Kontrollü atmosfer döküm.....	48
Şekil 8.4 Çekme deneyi uygulanmış numuneler	49
Şekil 8.5 Açık atmosfer döküm numunelerine uygulanan çekme deneyi sonucu oluşan uzama eğrileri	50
Şekil 8.6 Döküm kalıbının vakum indüksiyon ocağı içerisinde görünümü	51

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Süperalaşımlar üzerinde elementlerin etkisi (Bradley, 1989).....	13
Çizelge 6.1 Vakum seviyeleri.....	32
Çizelge 7.1 IN738 alaşımın kimyasal bileşimi.....	38
Çizelge 8.1 Farklı döküm teknikleri sonrası deneyde kullanılan malzemeye ait kimyasal analiz değerleri (%).....	46
Çizelge 8.2 Döküm yöntemleri bakımından karşılaştırılan numunelere ait mikrosertlik sonuçları	47
Çizelge 8.3 Açık atmosfer döküme uygulanan çekme deneyi sonucunda ortaya çıkan değerler	49

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında değerli bilgi ve önerileriyle çalışmalarına yön veren saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Dökümlerin gerçekleşmesinde ve literatür araştırma sürecinde bana her türlü desteği sunan saygıdeğer yöneticim Serdar SEVİK'e, döküm çalışmalarında yardımlarından dolayı saygıdeğer teknisyen çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bugünlere gelmemi sağlayan ve hiçbir zaman desteğini esirgemeyen sevgili aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

ÖZET

Dünya ekonomisinin sürekli büyümesi ve dünya nüfusunun 10 milyardan 11 milyar seviyelerine gelmesinin beklenildiği 2050 yılında mevcut enerji ihtiyacının iki katına ihtiyaç duyulacaktır. Gelecekteki enerji ihtiyacı karşılamak zor olduğu kadar, bu sorunun üstesinden gelmek için, mevcut enerji üretim yöntemleri geliştirilmeli ve yeni enerji üretim teknikleri geliştirilmelidir.

Enerji sektöründe bu ihtiyaçlarla beraber elektrik üretiminin büyük yükünü çeken gaz türbin santrali parçaları ile beraber uçak motorlarında kullanılan süperalaşımların önemi artmıştır.

Ülkemizin süperalaşım parçalar konusunda yurtdışı bağımlığı olduğu bu günlerde, süperalaşımların önemi ülkemiz için daha önemlidir.

Bu deneysel çalışmada; süperalaşım üretim yöntemlerinden açık ve kontrollü atmosfer dökümleri araştırılmıştır. Her iki döküm yönteminin kimyasal kompozisyon ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimer: Süperalaşım, döküm, vakum indüksiyon ocağı

ABSTRACT

The continual growth of the world economy and expected world population of 10 to 11 billion people is expected to create energy demands more than twice current levels in 2050. Meeting these future energy demands will be difficult and must be accomplished by improvements to current energy production processes and development of new energy production techniques.

With the needs in energy area, the powerhouse of energy production industrial gas turbine parts and jet motor engine parts has come to more importance to superalloys.

Our country's dependence to out sources, makes it more important for Turkey.

In this study; superalloys production techniques of induction melting and vacuum induction melting studied. For both casting techniques, chemical composition and mechanical properties were investigated.

Key Words: Superalloy, casting, vacuum induction furnace

1. GİRİŞ

Yüksek sıcaklıklarda kullanılan alaşımların, kullanıldığı atmosferin aşındırıcı etkilerine karşı dayanıklı olması, dizayn şartlarına bağlı olarak yeterli mukavemete sahip olması ve bunların yanı sıra yüksek sıcaklıklarda metalürjik veya yapısal değişimlere karşı koyabilmesi için kararlı olması gereklidir.

Oksidasyon direnci ve yüksek sıcaklık korozyonu açısından en önemli alaşım elementi kromdur. Bu yüzden korozyon dirençli çelikler, paslanmaz çelikler, Ni-Cr alaşımları ve süperalaşım gibi malzemeler yeterli miktarda krom elementi içerir. Yüksek sıcaklık uygulamalarında da yüksek oranda krom elementi kullanılmaktadır (Betteridge vd, 1974).

Çok yüksek sıcaklıklardaki çalışma şartlarında; refrakter malzemesi olarak seramiklere olduğu kadar V-A grubu (vanadyum, niyobyum, tantalyum) ve VI-A grubu (krom, molibden, tungsten) metallere de ihtiyaç duyulmaktadır. Refrakter malzemesi olarak kullanılan metallerin oksidasyon direnci çok düşüktür, bu yüzden bu malzemeler daha çok oksidasyona uğramayan alanlarda kullanılmaktadır. Seramik malzemeler ise, birçok yapısal uygulama için yeterli tokluğa sahip değildir (Hagel, 1972). Uygulamalarda yetersiz kalan malzeme teknolojisi ve mevcut teknolojideki sınırlamalar, süperalaşım malzemelerinin kullanımını kaçınılmaz hale getirmiştir.

Süperalaşımlar; yüksek sıcaklıklarda kullanılmak için genellikle VIII-A grubu elementlerden geliştirilen alaşım türleridir. Yüksek sıcaklıklarda kullanılacak malzemelerde, yüzey kararlılığı ve nispeten yüksek mekanik gerilim özellikleri istenilmektedir (Bradley, 1979). Süperalaşım, yüksek sıcaklıklarda yüksek performans göstermesi gereken uçak türbin motorları ve süper turbo yükleyicilerin üretiminde kullanılmak için geliştirilen alaşımlardır (Betteridge vd, 1974). Bu alaşımlar genellikle demir, nikel, kobalt ve krom'un farklı birleşimlerde bir araya getirilmesiyle üretilmektedir. Ayrıca düşük miktarda tungsten, molibden, tantalyum, niyobyum, titanyum ve alüminyum da kullanılmaktadır. Süper alaşımların en önemli özellikleri;

- 650 C° nin üzerindeki sıcaklıklarda mukavemetlerini korumaları,
- Isı korozyonu ve erozyon dirençlerinin yüksek olması

şeklinde sıralanmaktadır.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan süperalaşımlar; demir, krom ve nikel ihtiva eden süperalaşımlar, kompleks demir-nikel-krom kobalt birleşimleri, karbürlerle güçlendirilmiş kobalt esaslı alaşımlar, katı çözelti olarak dayanç arttırılmış nikel esaslı alaşımlar ve çökelme sertleştirmesi uygulanmış nikel esaslı alaşımlardır.

Genellikle demir esaslı alaşımların, karmaşık demir-nikel-krom-kobalt alaşımların ve nikel esaslı katı çözelti olarak dayancı arttırılmış alaşımların dirençleri 650°C üzerindeki sıcaklıklarda, kobalt esaslı ve nikel esaslı (ikinci fazla güçlendirilmiş) alaşımların mukavemetlerinden daha düşüktür. Ergime noktalarına bağlı olarak, kobalt esaslı alaşımların 1100 °C üzerindeki sıcaklıklardaki mukavemeti, nikelli alaşımlara oranla daha yüksektir. Kobalt esaslı döküm alaşımlar, kübik yüzey merkezli kristal yapıya sahiptir ve matrisleri içersinde karmaşık karbürler oluşur (Loria, 1992). Bu malzemeler gaz türbini motorlarındaki hava üfleyicileri için kullanılmaktadır (Bradley, 1979).

2. SÜPERALAŞIMLARIN SINIFLANDIRILMASI

Nikel esaslı çökelme-sertleşmeli süperalaşım, önemli bir süperalaşım grubudur. Yüksek sıcaklıklarda, oksijen-yayılımlı dayanım kazandırılan alaşımlar ve hatta bazı kobalt alaşımları, nikel esaslı alaşımlar kadar dayanıklıdır. Süperalaşım içerisinde demir esaslı olanlar ve katı-eriyik ile dayancı arttırılan alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda, mukavemeti en düşük olanlarıdır. Bu yüzden, nikel esaslı IN718 alaşımı dışında, demir esaslı süperalaşım uygulamalarda az kullanılmaktadır. IN718, geniş bir kullanım alanına sahiptir (Hagel, 1972). Katı-eriyik alaşımları, yüksek dayanımın istenmediği alanlarda kullanılmaktadır.

Kobalt esaslı süperalaşımların kullanımı, kartel işlevi gören metallerden dolayı büyük bir oranda azalmıştır. MAR-M509 gibi kobalt alaşımları geniş çapta uçak türbin kanatçıkları dökümünde kullanılır ve Haynes 188 kobalt alaşımı ise uçak motorlarında kullanılan tutuşma malzemesidir (Bradley, 1979).

Süperalaşımlar genel olarak üç ana gruba ayrılır:

- Demir Esaslı Süperalaşımlar
- Kobalt Esaslı Süperalaşımlar
- Nikel Esaslı Süperalaşımlar

2.1 Demir Esaslı Süperalaşımlar

Demir esaslı alaşımlar, ana element olarak demir ihtiva edip, ilaveten önemli miktarda krom, nikel ve çok az miktarda da molibden veya tungsten içermektedir. Bu grup karbür, intermetalik çökelme ve/veya katı-eriyik sertleşmesi ile dayanımı arttırılır. İntermetalik çökelti genellikle $Ni_3(Al,Ti)$ γ' tipindedir. Bu grubun nikel-krom oranları ve mukavemetlendirme mekanizmaları, paslanmaz çeliklerden farklıdır. Paslanmaz çelikler %12-25 Cr ve %0-20Ni içermekte, demir esaslı süperalaşımlar ise %20 den daha fazla Ni içermektedir (%25-35).

Yüksek miktarda demir içeren birçok süperalaşım olmasına rağmen, bunların hepsi demir esaslı süperalaşım değildir. Çünkü bu süperalaşımlar demir, nikel, krom, kobalt, az miktarda molibden, tungsten ve niobiyum gibi elementlerin karmaşık birleşimleridir. Bu duruma örnek olarak; katı-eriyik dayanımlı %16Fe ve %49Ni içeren Hastelloy X ile γ' -

dayanım arttırılan %18.5Fe ve %52.5Ni içeren IN 718 alaşımları verilebilir. Bu alaşımlar, Fe ihtiva eden nikel esaslı süperalaşımlardır. γ' dayancı arttırılmış IN 901 süperalaşımı %42.5Ni ve %36Fe içeren nikel esaslı veya karmaşık demir-nikel-krom esaslı bir süperalaşımdır. Bu alaşım yüksek dayanımına ek olarak, sürekli düşük termal genleşme katsayısına sahiptir. Kompleks bileşimli katı-eriyik dayanımlı alaşıma örnek olarak Multimet (N-155) alaşımı da verilebilir. Bu alaşım %21Cr, %20Ni, %20Co, %32.5Fe, %3Mo, %2.5W ve %1Nb içermektedir.

Süperalaşımların özelliklerini geliştirmek için, alaşımlara değişik elementler eklenmektedir. KYM'li matrisli alaşımlar için en etkili dayanım arttırma nikel, alüminyum, tantalum ve niobiyumla yapılır. Molibden ve tungsten gibi bazı elementler dayanım arttırma aşamalarında katı-eriyik içine eklenir (Bradley, 1979).

KYM alaşımlar, karbon ilavesiyle sertleştirilmektedir. Nitrojen ve fosfor eklenerek bu sertleştirme tesiri artırılabilir. Karbon, aynı zamanda tane sınırlarında tane sınırı karbürü oluşturarak, dayanımı arttırmaktadır. Karbür çökmesi için, karbür oranı yaklaşık %0,5 olmalıdır.

Oksidasyon direnci genel olarak krom elementiyle sağlanır. Bununla birlikte nikel ve mangan da oksidasyon direncini artırır. Küçük miktarda bor ilavesiyle yüksek sıcaklık özellikleri de artırılır. Demir esaslı alaşımların 504⁰C üzeri sıcaklık uygulamaları için en önemli özellikleri KYM olmalarıdır. Çünkü kapalı paketli kafes, daha dirençlidir. İntermetalik bileşik çökelti tarafından dayanımı artan demir esaslı süperalaşımların ilk kullanım alanları, gaz türbin motorlarında kanatlar, diskler ve bağlayıcılardır. A-28 alaşımı; bazı gaz türbin motorları, türbin diskleri ve jantları için kullanılır. A-286 aynı zamanda türbin kutuları için de kullanılmaktadır.

Demir esaslı süperalaşımlara örnekler;

- INCOLOY (800, 801, 802, 807, 825, 903, 907, 909)
- A-286
- ALLOY 901
- DISCALOY
- HAYNES 536

- H-155
- V-57

2.2 Kobalt Esaslı Süperalaşımlar

Kobalt esaslı süperalaşımlar, ana element olarak kobalt içerir. Ayrıca önemli miktarda nikel, krom, tungsten az miktarda molibden, niyobyum, tantal, titanyum ve bazen demir gibi elementler de içermektedir.

Kobalt esaslı süperalaşımlar, katı-eriyik ve karbür fazları tarafından dayanımı arttırılır.

Kobalt katı-eriyik alaşımları üç gruba ayrılır:

- 650⁰C den 1150⁰C kadar sıcaklıklarda kullanılan Haynes 188, UMCö-50 ve S-816 alaşımları,
- Yaklaşık 650⁰C’de kullanılan bağlayıcı (fastener) alaşımlar MP-35N ve MP-159,
- Aşınma dirençli Stellite6B.

Kobalt esaslı süperalaşımların hiçbirisi tam katı - eriyik alaşımı değildir. Çünkü hepsi ikincil karbür fazları veya intermetalik bileşikler içerir. Bu durum yaşlanmaya ve ayrıca oda sıcaklığında süneklik kaybına neden olur

Genellikle bütün kobalt esaslı süperalaşımlar ısıt işlemleri ve yumuşatma sırasında KYM kristal yapıya sahiptir. Ancak MP-35N ve MP-159 alaşımlarında, kullanım öncesi, önerilen termomekanik işlemleri süresince sıkı-paket hegzagonal yapının miktarı kontrollü şekilde artırılır. 650⁰C ve 1050⁰C arasında ısıt işlemleri uygulanan Stellite 6B ve 650⁰C civarında ısıt işleme tabi tutulan Haynes 25 alaşımları, kısmen sıkı-paket hegzagonal yapıya dönüşebilir.

Haynes 25 yaygın olarak kullanılan kobalt esaslı bir süperalaşımdır. Bu alaşım gaz türbinlerinin yüksek sıcaklığa maruz kalan kısımlarında, nükleer reaktör parçalarında, cerrahi implantlarda ve soğuk çalışma şartlarında kullanılmaktadır.

Haynes 188 birçok mükemmel bir özelliğe sahip olup tutuşturucularda, geçiş kanalları ve gaz türbinlerinin iç tasarımında kullanılır. Bileşimlerinde lantan, silikon, alüminyum ve magnezyum vardır. Bu alaşımın, 1100 ⁰C de oksidasyon direnci ve sürünme direnci yüksektir. Oda sıcaklığında şekillendirilebilmekte ve uzun süreli yaşlanmadan sonra çalışma sıcaklığında sünekliğini korumaktadır.

%21 Fe içeren UMCö-50 alaşımı, Haynes 25 veya Haynes 188 kadar sert değildir. UMCö-50 fırın parçaları ve karıştırıcılar için kullanılmaktadır.

MP-35N ve MP-159 alaşımları, işlem sertleşebilirliği istenilen yerlerde kullanılır. Her iki alaşım da yüksek dayanım ve sünekliğe sahiptir. Bu alaşımlardaki yüksek dayanım ve süneklik özelliklerinin nedeni, işleme sonucu sertleşen KYM matriste sıkı-paket hegzagonal yapının küçük plakalar haline dönüşümüdür.

Kobalt katı-eriyik alaşımlarının son grubu Stellite 6B dir. Bu alaşım yüksek sıcaklık sertliği ve oksidasyon direncine sahiptir. Bu özelliği ise yüksek krom içeriğinden (yaklaşık %30) kaynaklanmaktadır. Stellite 6B, genellikle buhar türbinlerinde kullanılmaktadır.

Karbür-faz dayanımlı kobalt esaslı süperalaşımlar X-40, WI-52, MAR-M302 ve MAR-M509 yaygın olarak uçak yakıt motor türbinlerinde ve statik kanat uygulamalarında kullanılır. Bu alaşımlar, yüksek sıcaklık dayanımına ve oksidasyon direncine ayrıca kaynak ile onarılabilme özelliğine sahiptir (Bradley, 1989).

Kobalt esaslı süperalaşımlara örnekler;

- HAYNES 188
- L-605
- MAR-M918
- MP35N
- MP159
- STELLITE 6B
- ELGILOY

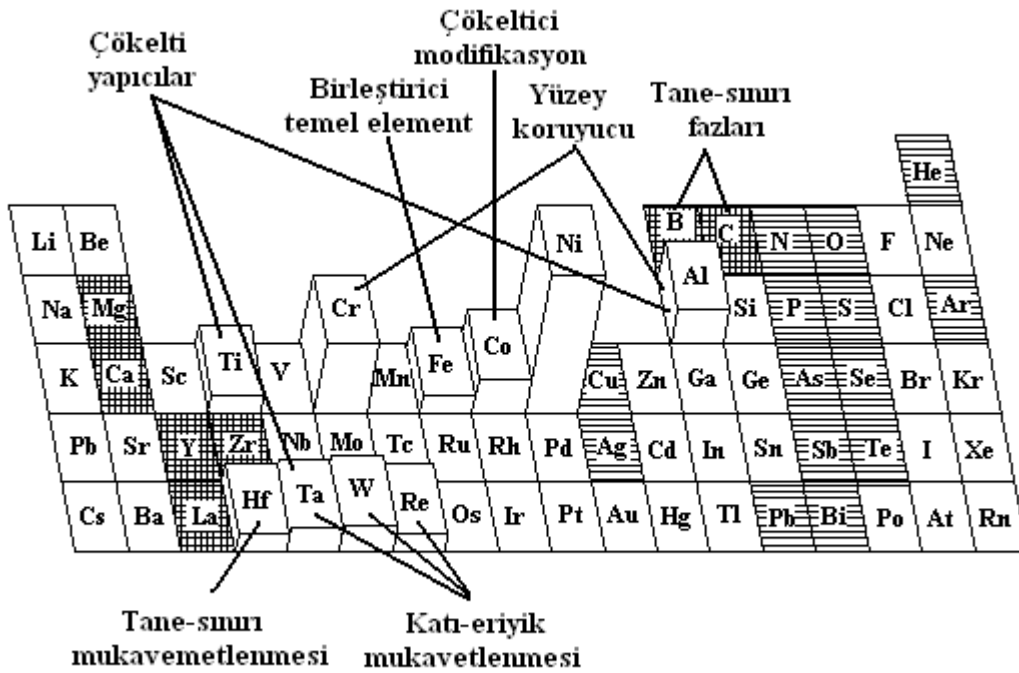
2.3 Nikel Esaslı Süperalaşımlar

Süperalaşım sistemlerinde en çok kullanım alanı olan alaşımlar nikel esaslı sınıfındaki süperalaşımlardır. Bileşim, yapısal ve mekanik özellik açısından büyüleyici olan süperalaşımlar, korozyona karşı güçlü dayanım göstermelerinin yanında, ergime sıcaklıklarının %80 ile %90 sıcaklıklarında sürünme ve yorulma dayanımı devam ettirmek gibi eşsiz özelliğe sahiptirler. Bahsedilen kapasiteleri sayesinde nikel esaslı süperalaşımlar,

türbin ateşleme sıcaklığını sınırlayan dolayısıyla türbin verimini etkileyen en önemli türbin uygulamalarından türbin rotor kanadı gibi parçaların malzemesi olarak tercih edilirler.

Bileşimsel, yapısal ve mekanik özellikleri açısından etkileyici olup, ergime ısılarının %80'i ile %90'ı arasındaki sıcaklık aralığında sürünme ve yorulma dayanımlarını koruyarak yüksek korozyon direnci gösterirler. Bu yetenekleri sayesinde türbin ateşleme sıcaklığı ve türbin veriminde kısıtlayıcı etken olan türbin kanatlarının malzemesi olarak geniş kullanım alanına sahiptirler. DS-ötektikler, intermetalikler, seramikler ve kompozitlerin, nikel esaslı alaşımların yerini almaları beklenirken aksine nikel esaslı alaşımlar yüksek sıcaklık türbin uygulamalarında esas malzeme olmaya devam etmektedir ve uzunca yıllar devam edecektir.

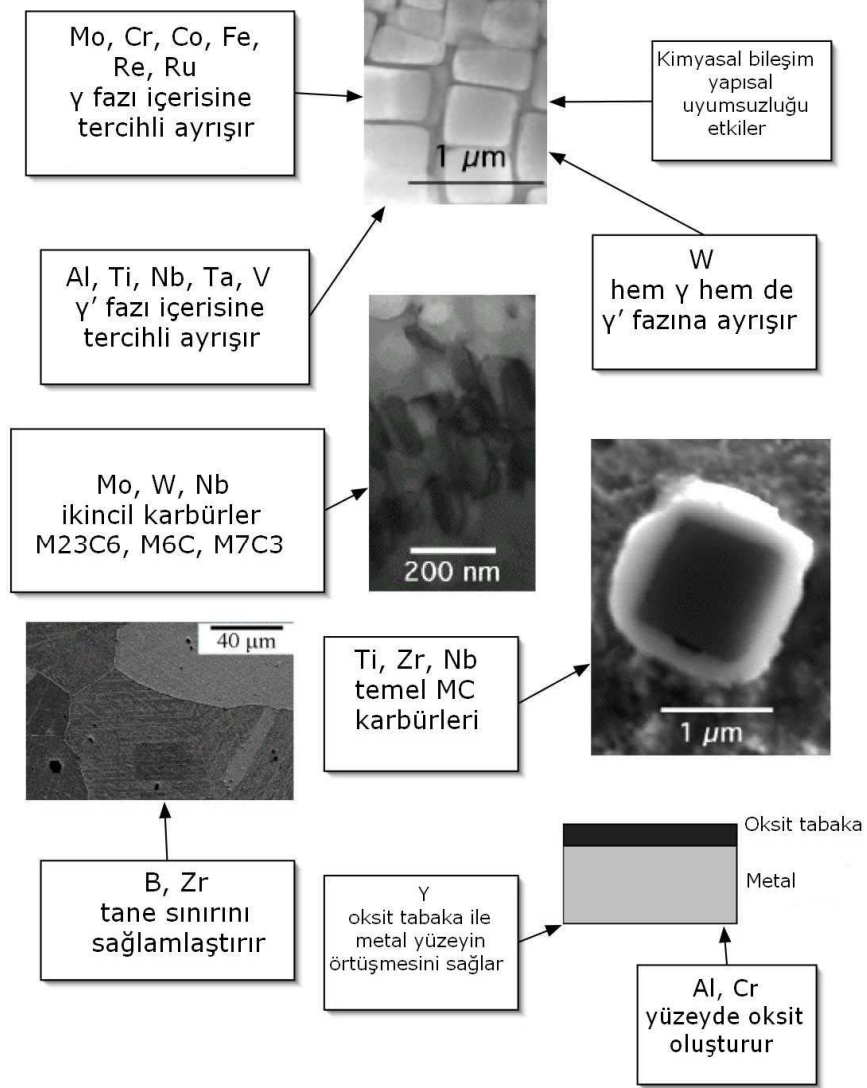
Nikel esaslı süperalaşım bileşikler 80Ni-20Cr (%ağırlık) bileşiminden başlayarak modern süperalaşımların temsilcisi olan daha karmaşık bileşiklere kadar geliştirilmiştir.



Şekil 2.1 Periyodik tablo üzerinde elementlerin süperalaşımlardaki etkileri (Gibbons 1985)

Çeşitli alaşım elementlerinin süperalaşımdaki etkileri Şekil 2.1'de özetlenmiştir. Ana alaşım elementleri korozyon direncini artırır, katı çözelti sertleşmesiyle ve koherent γ' fazının çökmesiyle mukavemet kazandırır. C, B, Hf ve Zr gibi diğer alaşım elementleri ise tane sınırlarının güçlendirilmesi için ilave edilirler. Süperalaşım üretiminin

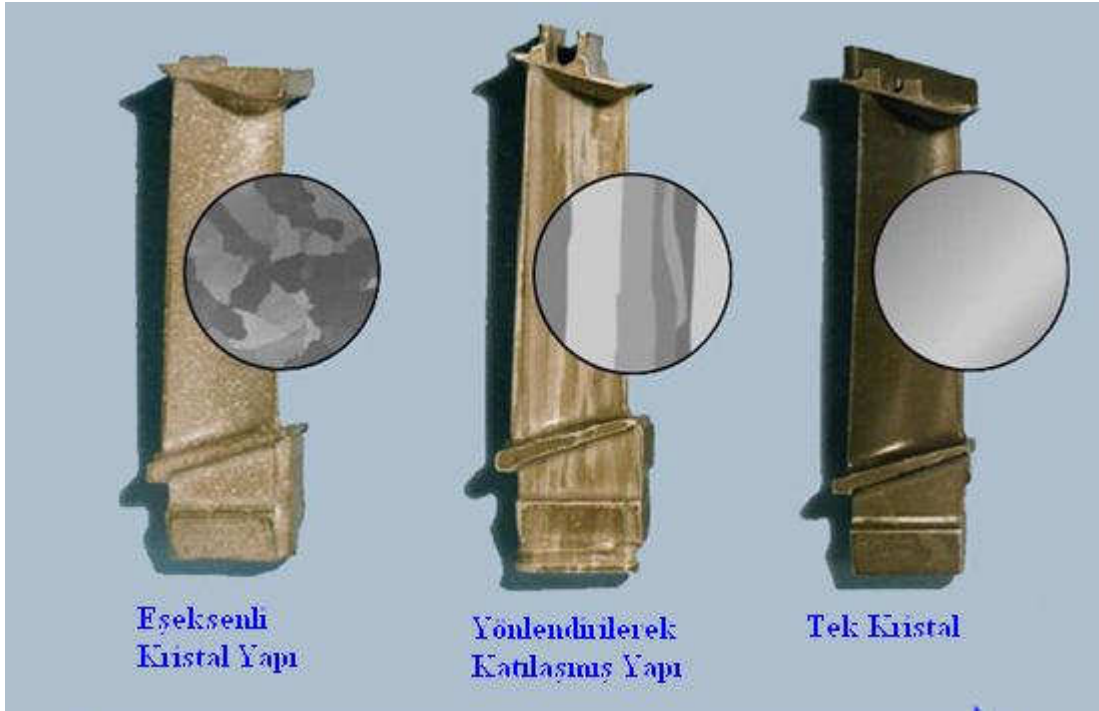
geliştirilmesiyle, yönlendirilmiş katılaşma veya tek kristalli döküm sayesinde tane sınırları azaltılıp hatta ortadan kaldırılarak az miktarda ilave edilen alaşım elementlerine gereksinim ortadan kalkmıştır. Günümüzde az miktarda alaşım elementlerinin ilavesiyle dökümde tanelerin oluşumunda hata toleransı sağlanmaktadır.



Şekil 2.2 Süperalaşım mikroyapısı ve alaşım elementleri etkisi (Sims 1986)

Birçok alaşım elementinin ilavesiyle oldukça karmaşık bir yapıda olan ve farklı etkilerden gelen dayanıma sahip nikel esaslı süperalaşım mikroyapısı ortaya çıkar (Şekil 2.2). Nikel esaslı süperalaşımların ana fazları, kübik yüzey merkezli γ (Ni) matris ve sıralı kübik yüzey merkezli koheren γ' (Ni_3X , $\text{X}=\text{Al}$, Ti , Ta veya Nb) çökelmiş fazıdır. γ' çökelmiş fazın hacimce oranını arttırarak nikel esaslı süperalaşımların yüksek sıcaklık dayanımları

arttırılabilir fakat bu uzun dönem mikroyapısal kararlılıkta sorunlara yol açar. γ ve γ' fazlarının oluşturduğu katı çökeltisi toplam dayanıma katkı sağlar. Diğer yararlı fazlar ise genellikle tane sınırlarında oluşan karbürler ve borürlerdir. Bu fazlar genellikle zararlı elementleri bir araya getirerek tane sınırı kaymasını azaltırlar. Alaşım bileşimi kontrol edilemezse veya yüksek sıcaklıklara çıkılırsa, μ ve σ gibi bazı istenmeyen yüzeysel sıkı paket fazlar, kübik yüzey merkezli γ matris oktahedral yüzeylerle aynı yönde tabaka veya iğne şekilli yapılar oluşturur. Bu fazların varlığı mekanik özellikler açısından fazlaca zararlıdır.



Şekil 2.3 Süperalaşımlara uygulanan farklı katılaştırma teknikleri ve oluşan mikroyapılar (Pollock, 2008)

Her ne kadar nikel esaslı süperalaşımlar doğası gereği dayanımlı olsalar da üretim aşamasında özellikleri daha da iyileştirilebilir. Birincil gerilme ekseninin kanat boyuna paralel olduğu türbin kanatlarında, taneleri gerilme yönü boyunca hizalayarak, sürünme çatlak ömrü 2 katı, sürünme çatlak sünekliği 4 katı ve ısıl yorulma direnci 8 katı oranında iyileştirilebilir (Şekil 2.3). Bu yönlendirilmiş yapılar, kolonsal tane veya tek kristalli yapı oluşturarak tane sınırlarını azaltan veya ortadan kaldıran yönlü katılaşma ile sağlanabilir.

Nikel esaslı süperalaşımlar ana element olarak %30 ile 70Ni ve önemli miktarda, %30 ile üstü Cr, içermektedir. Demir elementi Inconel, Nimonic ve Hastelloy gibi nikel esaslı süperalaşımlar içinde az miktarda, Incoloy 901 ve Inconel 706 gibi alaşımlarda ise yaklaşık %35 oranında bulunur. Bazı nikel esaslı alaşımlar, dayanım direnci ve korozyon direnci için az miktarda alüminyum, titanyum, niyobyum, molibden ve tungsten de ihtiva etmektedir.

Nikel esaslı süperalaşımlar katı-eriyik ve ikincil-faz intermetalik çökelti tarafından dayanımı arttırılmaktadır. İntermetalik şekillendirici olarak kullanılan elementler alüminyum, titanyum ve niyobyumdur.

Nikel esaslı süperalaşımlardaki nikel ve krom oranı, bu alaşımların oksidasyon direncini artırır. Nikel esaslı süperalaşımlar, özellikle 650 °C üstü sıcaklıklarda, mekanik dayanım açısından paslanmaz çeliklerden daha üstündür.

Inconel 600, Inconel 601 ve RA 333 gibi katı-eriyik alaşımları, yaygın olarak ısı işlem ekipmanları ve fırın parçalarında kullanılmaktadır. Bunun nedeni bu alanlarda yüksek oksidasyon-korozyon direnci ve yüksek dayanıma sahip malzemelere ihtiyaç duyulmasıdır.

Nikel esaslı süperalaşımların diğer bir kullanım alanı da enerji jeneratörleridir. Nükleer enerji fabrikalarında (buhar üretici tüpler ve reaktör karotların yapısal bileşenleri) ayrıca fosil-yakıt fabrikalarında (ısıtıcı tüpler, kül-alıcı sistemler ve ısı-korozyon ihtiyacı duyulan parçalar) da yaygın olarak kullanılırlar.

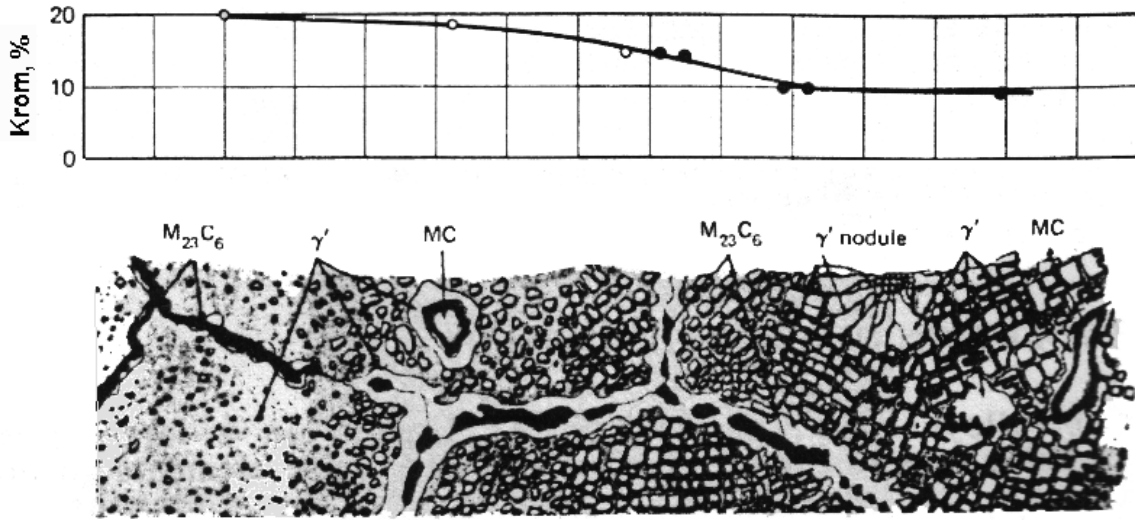
Nikel esaslı süperalaşımlara örnekler;

- INCONEL (587, 597, 600, 601, 617, 625, 706, 718, X750)
- NIMONIC (75, 80A, 90, 105, 115, 263, 942, PE.11, PE.16, Pk.33)
- Rene (41, 45)
- UDIMET (400, 500, 520, 630, 700, 710, 720)
- PYROMET 860
- ASTROLOY
- M – 252
- HASTELLOY (C-22, G-30, S, X)

- WASPALOY
- UNITEMP AF2-IDA6
- CABOT 214
- HAYNES 230'dur.

3. SÜPERALAŞIMLARDA ALAŞIM ELEMENTİ ETKİSİ

Her alaşım elementinin süperalaşımların genel doğasına ve özelliklerine etkisi bulunmaktadır. Alaşım geliştiriciler her alaşımın mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini hesaplayarak alaşım kimyası üzerine çalışmalar yapmaktadır. Alüminyum, sertleştirici $\square\square$ fazının hacim içerisinde oranını artırır. Aynı şekilde Wolfram ve Tantalyum, matriks fazı sertleştirmede yardımcı rolleri mevcuttur. Kobalt, Al ve Ti $\square$ matriks içerisinde çözünürlüğünü düşürerek, bu elementlerin $\square\square$ fazı içerisinde çözünmesini maksimuma getirir (Jena, 1984).



Şekil 3.1 Nikel esaslı süperalaşımlarda krom içeriğinin mikroyapıya etkileri (Bradley, 1989)

Krom, oksidasyon dayanımı arttırmak için ilave edilirken, tane sınırında oluşan $M_{23}C_6$ ve M_6C karbürleri sayesinde yüksek sıcaklıklarda çatlak yayılımını azaltmaya yardımcı olur. Bor, karbon ve zirkon yüksek sıcaklık özelliklerini geliştirirken, borun ayrıca yorulma performansını iyileştirici etkisi de mevcuttur. Ayrıca B ve Zr karbür kabalaşmasını engelleyerek tane sınırı dayanımını iyileştirir (Şekil 3.1). Demir, kobalt ve nikel esaslı süperalaşımlarda oluşan fazlardan hangi elementlerin etkisi olduğu Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Süperalaşımlar üzerinde elementlerin etkisi (Bradley, 1989)

Element Etkileri	Fe-esash	Co-esash	Ni-esash
Katı-eriyik Mukavemetlendiriciler	Cr, Mo	Nb, Cr, Mo, Ni, W, Ta	Co, Cr, Mo, Fe, W, Ta
Yüzey merkezli kübik matris stabilize ediciler	C, Ni, Co	Ni	Co
Karbür şekilleri; MC tipi M ₇ C ₃ tipi M ₂₃ C ₆ tipi M ₆ C tipi	Ti -- Cr Mo	Ti Cr Cr Mo, W	W, Ta, Ti, Mo, Nb Cr Cr, Mo, W Mo, W
Karbonitritler; M(CN) tipi	C, N	C, N	C, N
Karbürlerin genel çökelticileri	P	--	--
γ' Ni ₃ (Al, Ti)	Al, Ni, Ti	--	Al, Ti
Hegzagonal η (Ni ₃ Ti) dönüşüm geciktiriciler	Al, Zr	--	--
γ' 'nın çözücü sıcaklığını yükselticiler	--	--	Co
γ' 'nın çözücü sıcaklığını düşürücüler	--	--	Cr
Sertleşme çökelticiler ve/veya intermetalikler	Al, Ti, Nb	Al, Mo, W, Ta	Al, Ti, Nb
Oksidasyon direnci	Cr	Al, Cr, Ta	Al, Cr, Ta
Sıcak korozyon direnci geliştiriciler	La, Y	La, Y, Th	La, Th
Sülfidasyon direnci	Cr	Cr	Cr
Tane sınırı morfolojisi değişkenleri tarafından sürünme-kopma özelliklerini artırıcılar	B	B, Zr	B, Zr
Ara-sıcaklı sünekliğini geliştiriciler	--	--	Hf
Tane sınırı segregasyonuna neden olucular	--	--	B, C, Zr

4. SÜPERALAŞIMLARDA SERTLEŞTİRME MEKANİZMALARI

Metallerde, akma dayanımı dislokasyon sayısı ve hareketleri ile kontrol edilir. Malzemenin akma dayanımını arttırmak için, dislokasyon hareketleri kısıtlanmalıdır. Bu kısıtlanma, harekete karşı iç gerilim oluşturarak veya dislokasyon hareket düzlemine partiküller yerleştirerek, bağ oluşumu veya partikülleri kesmesi ile sağlanır. Süperalaşımların çok sayıda alaşım elementi içermesi nedeniyle dislokasyon hareketlerinin kısıtlanması, katı eriyik sertleşmesi, çökelme sertleşmesi veya tane sınırı sertleşmesi işlemleri ile gerçekleşir.

4.1 Katı Eriyik Sertleşmesi

Katı eriyik sertleşmesi çözünen atomları metal ana matrise bağlar. Nikel bazlı süperalaşımlarda, bu mekanizma, katı çözelti elementlerinin (Al, W, Mo, Cr, Fe, V, Ti, ve Co) γ matrise eklenmesi ile sağlanır. Katı çerişik sertleşmesi esnasında, çözünen atom akış gerilimi artışına sebep olabilir. Bu elementlerin sertleştirme etkileri yüksek sıcaklıklarda korunur. Oda sıcaklığında Co, Fe, V ve Ti elementleri Cr, Mo, Al ve W kıyasla daha zayıf katı eriyik sertleştiricilerdir.

4.2 Çökelme Sertleşmesi

Süperalaşımlarda sertleşme fazının oluşumu hakkında farklı düşünceler mevcuttur. Eiselstein'a göre alaşım, KYM Nb elementince zengin γ' fazının çökmesi sayesinde kuvvetlendirilmiştir. Raymond γ' fazınca kuvvetlendirilmesine katılırken, ancak Ni_3Nb fazının KYM değil KHM olduğunu savunmuştur. Birçok yazar bu sonuçlara zaman içerisinde itirazda bulunmuştur. Geline ortak noktada elektron kırılım deseni analizi ile süperalaşımların baskın sertleştirme mekanizmasının, KHM Ni_3Nb γ'' fazının çökmesi olduğu konusunda hemfikir olunmuştur. Bir A_3B intermetalik fazı tipi olan Ni_3Nb fazı östenitik matris içinde tutarlı bir şekilde çökler. A_3B tipi bileşiklerde, A bileşeni Ni, Co veya Fe gibi elektronegatif elementlerden oluşurken, B bileşeni Al, Ti, Ta veya Nb gibi daha elektropozitif elementlerden oluşmaktadır. Bu fazlar için verilen denklemler basit olmasına karşın alaşım ilaveleri kompozisyonunu daha karmaşık yapmaktadır.

Süperalaşımlarda yüksek dayanım seviyelerinin elde edilmesinde katkıda bulunan ana etmen, müsait kayma düzlemlerinin sınırlandırılmasıdır. Bir dislokasyon γ'' fazına ulaştığında dislokasyon tırmanarak, bağ yaparak veya keserek bu fazı atlmalıdır. Sınırlı sayıdaki kayma sistemi nedeniyle çapraz kayma engellenmekte ve bunun sonucunda dayanım artmaktadır. Süperalaşımlar düşük miktarlarda Al ve Ti içermektedir. Bu sayede γ' fazı γ'' fazını oluşturur

ve aynı anda matris içerisinde varlıklarını sürdürürler. Araştırmalara göre ağırlıkça %0,2'den az Al içeren bazı nikel esaslı süperalaşımlarda γ'' fazı baskınken Al konsantrasyonu ağırlıkça %0,5'i geçtiğinde γ' fazı baskın olmaktadır. γ' fazının alaşım sistemini sertleştiren iki ana yolu vardır. Birincisi antifaz sınırlarında sertleşmesi neticesinde oluşmaktadır. γ' fazının bölünmesi sırasında antifaz sınırı enerjisi meydana gelir. Bu enerji dislokasyonların hareketini engelleyerek malzemenin sertleşmesini sağlar. İkinci mekanizma ise γ' fazının tutarlı bir şekilde γ matrisinde çökmesine dayanır. Dislokasyonların γ' çökeltilerinin arasından geçmesini zorlaştıran bağdaşım gerinimleri oluşturur. Hem γ' hem de γ'' fazları dislokasyon hareketlerini engelleyerek daha dayanıklı malzeme elde edilmesini sağlarlar. Bu sebeple, alaşım sertliğinin azami dereceye çıkarılmasında bu fazların hacimsel oranını optimize etmek önemlidir.

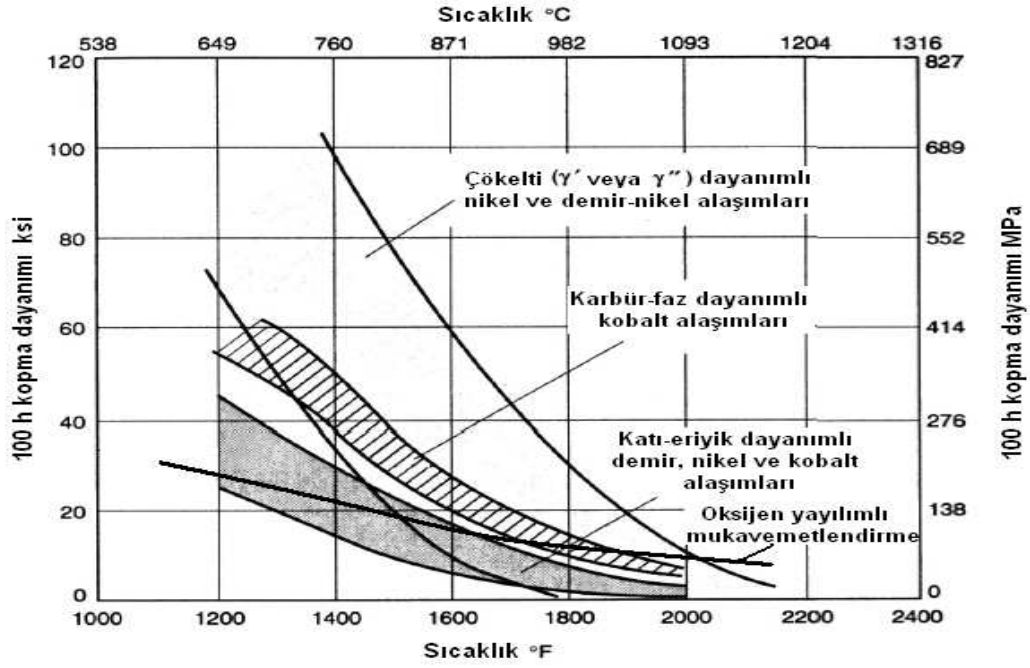
4.3 Tane Sınırı Sertleştirilmesi

Çok kristalli malzemelerin matrisini sertleştirme de kullanılan bir diğer yöntem tane sınırları sertleştirmesidir. Tane sınırları, mekanik özelliklerin belirlenmesinde önemli rol oynar. Süperalaşımlarda, çatlaklar tane sınırları boyunca yayılma eğiliminde olduklarından mekanik özelliklerin düşmesine neden olurlar. Bu sebeple bu tarzda çatlak oluşumuna meyilli alaşımlarda, tane sınırının zayıflığını engellemek amacıyla alaşım elementi ilavesi yapılması gereklidir. Süperalaşımlarda, ömür, uzama ve kopma gerilimini arttırmak için, ana matrise B ve Zr ilaveleri yapılır. Bu elementler tane sınırlarında boşlukları ve kafes bozukluklarını doldurarak yüksek sıcaklıklarda tane sınırı yayılımını azaltırlar. Ayrıca bazı dövme alaşımlarda Mg ilavesinin de iyileştirilmiş özellikler sağladığı görülmüştür.

Nikel esaslı süperalaşımlarda karbon ilavesi karbür oluşumunu teşvik eder. Nikel karbür oluşturmazken, karbürler diğer alaşım elementlerinin reaksiyonu sonucu meydana gelir. Bu oluşan karbürlerin görevleri ise karmaşıktır. Tane sınırı karbürlerinin morfolojisi süneklığe zararlı etkisi olduğu bilinir. Buna rağmen, tane sınırı karbürleri genel mekanik özellikler üzerinde yararlı sayılabilecek etkileri de mevcuttur. Örneğin tane sınırları karbürleri, yüksek sıcaklıklarda kopma dayanımını arttırırlar. Ayrıca matrisden tepkili elementlerin giderilmesi sayesinde sünekliliğe ve kimyasal kararlılığa olumlu etkileri vardır. Aksi takdirde tane sınır zayıflaması görülebilir. Daha önce Merrick tarafından belirtildiği gibi, nikel esaslı süperalaşımlarda karbür çökmesi, tane sınırı ve dislokasyonlar gibi hataları kapsayan farklı davranış biçiminde oluşurlar. Ayrıca araştırmacıların gözlemlerine göre, karbürler nikel esaslı süperalaşımlarda tane sınırında çökmeyi tercih ederken, kobalt ve demir bazlı alaşımlarda taneler arası yerleşim daha yaygındır.

Nikel esaslı süperalaşımlarda çeşitli karbür yapıları mevcuttur. En genel karbür yapıları, MC, $M_{23}C_6$ ve M_6C tipleridir. Bu karbürler, imalat sırasında, çalışma esnasında veya ısıtma işlemi sırasında çökebilirler. Araştırmacılara göre baskın tane sınırı çökmesi, niobyumca zengin MC karbürleri tarafından sağlanır. Kompozisyonları değiştirilebilir olmasına rağmen niobyum karbürler kararlı haldedirler. Bazı durumlarda titanyum niobyumun yerini alıp (Ti,Nb)C oluşturabilirler. Sudararaman çalışmalarında, karbürlerin tane sınırında çökmesinin yaşlandırma sıcaklığına bağlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu çalışmalarda artan yaşlandırma sıcaklığı ile karbür çökmesi içeren tane sınırı kırılması da artmıştır. Sudararaman'ın çalışmalarında bahsedilen bir başka nokta ise tane sınırlarındaki karbürler alaşımların çatlak oluşum tipini doğrudan etkiler, taneler arası hatalara sebebiyet verirler.

MC karbürler (TiC ve NbC) çok kararlı bileşiklerdir. Buna rağmen, süperalaşımların içerdiği Mo ve W gibi refrakter elementler, Ti ve Nb yerini doldurabilirler. Eğer bu durum gerçekleşirse, MC bağlama gücü zayıflar ve bozunmaya meyilli hale gelirler. Bu bozunma gerçekleşirse oluşacak karbürler $M_{23}C_6$ ve M_6C 'dir. $M_{23}C_6$ karbürleri, nikel esaslı süperalaşımların özelliklerine olumlu etkileri ile bilinirler. Bu etkiler, fazın morfolojisi ile gerçekleşir. Tane sınırlarında meydana getirdikleri sabit faz ile tane sınırı katmasını engeller ve bu sayede süneklik ve sürünme dayanımında artışa sebep olurlar. M_6C tipi karbürler ise hem tane sınırlarında bloklu morfolojide hem de Windmanstätten tanelerarası yapıda bulunurlar. Bu durumun dövme alaşım imalatında olumlu etkileri mevcuttur. Ayrıca $M_{23}C_6$ karbürlerinden daha kararlı olmaları, yüksek sıcaklıklarda tane boyutu kontrolünü kolaylaştırır. Süperalaşımların mukavemetlendirme mekanizmaları süperalaşımların sertlik, dayanım, ergime noktası, kopma dayanımı gibi özelliklerini etkiler (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Dayanım artırma mekanizmalarının süperalaşımlar üzerindeki etkisi (Bradley 1989)

4.4 Süperalaşımlarda Oluşması İstenmeyen Fazlar

Süperalaşımlarda çok fazla sayıda alaşım elementi bulunmaktadır. Bu elementler olumlu özellikleri için ilave edilse de bazı durumlarda istenmeyen fazların oluşmasına neden olabilmektedir. Co, Mo, W, Rh ve Cr gibi elementlerin hepsi alaşım üzerinde olumlu etkileri mevcutken, TCP, σ ve μ fazları oluşumuna sebebiyet vermektedir. Yapı içerisinde eser miktardan fazla bulunmaları halinde, bahsedilen kırılgan fazların oluşumu gerçekleşmekte ve süneklik ve mekanik özelliklerde kayıplara neden olmaktadır. Ayrıca Nb ilavesi süperalaşımlarda yararlı olduğu kadar zararlıda olabilmektedir. Niyobyum ilavesi sertleşmeyi desteklerken, yaşlandırma sırasında, ana sertleştirme fazı olan γ'' fazı termodinamik açıdan daha kararlı olan δ fazına dönüşebilmektedir. Desvalles'e göre süperalaşımlarda δ fazının bulunması, γ' ve γ'' fazlarının miktarını azaltmakta, ayrıca malzemenin akma dayanımını düşürmektedir. δ fazının çökeldiği noktalarda boşlukların oluşması ve büyümesi neticesinde, düşük çevrim yorulması ve yorulma dayanımı azaltılmış olmaktadır.

5. SÜPERALAŞIMLARIN KULLANIM YERLERİ

Süperalaşımlar yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle genellikle uçak parçaları, kimyasal ekipmanlar ve petrokimya ekipmanları olarak kullanılır (Şekil 5.1). Süperalaşımların yaygın olarak kullanıldığı uygulama alanları;

Uçaklar ve endüstriyel gaz türbinleri;

1. Diskler,
2. Civatalar,
3. Şaftlar,
4. Muhafaza kapları,
5. Pervane kanatçıkları,
6. Vanalar,
7. Yanma odaları (Mattingly, 1996).

Gaz türbini santralleri;

1. Civatalar,
2. Pervane kanatçıkları,
3. Gaz ısıtıcıların bacaları.

Motorlar (Şekil 5.2);

1. Turbo yükleyiciler,
2. Eksoz valfleri,
3. Isıtma elemanları,
4. Valflerde ve contalar.

Metal işçiliği;

1. Sıcak işleme takımları ve kalıplar,
2. Döküm kalıplar.

Tıbbi uygulamalar;

1. Dişçilik,
2. Protezcilik ekipmanları.



Şekil 5.1 Nikel esaslı süperalaşımların etkin olarak kullanıldığı gaz türbin motoru (Loria, 1992)

Isıl işlem ekipmanları;

1. Tepsiler,
2. Karıştırıcılar,
3. Konveyör bantları.

Nükleer güç sistemleri;

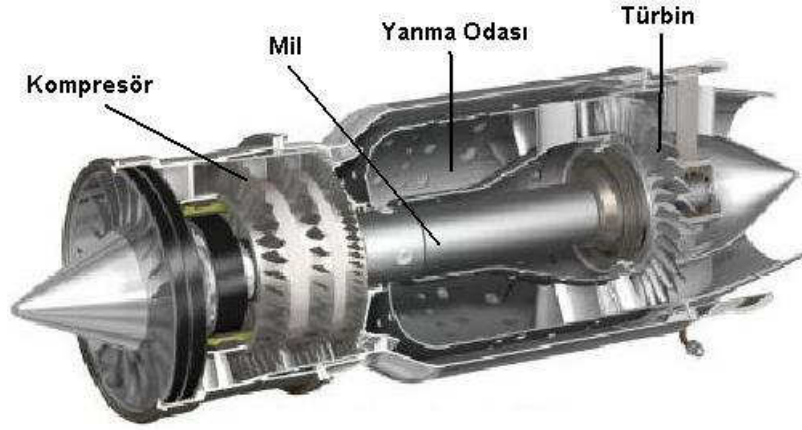
1. Hareket mekanizmaları için kontrol çubukları,
2. Akış valfleri,
3. Yaylar.

Uzay araçları;

1. Aerodinamik araç zırhları,
2. Roket motor parçaları.

Kimyasal ve petro-kimya sanayisi;

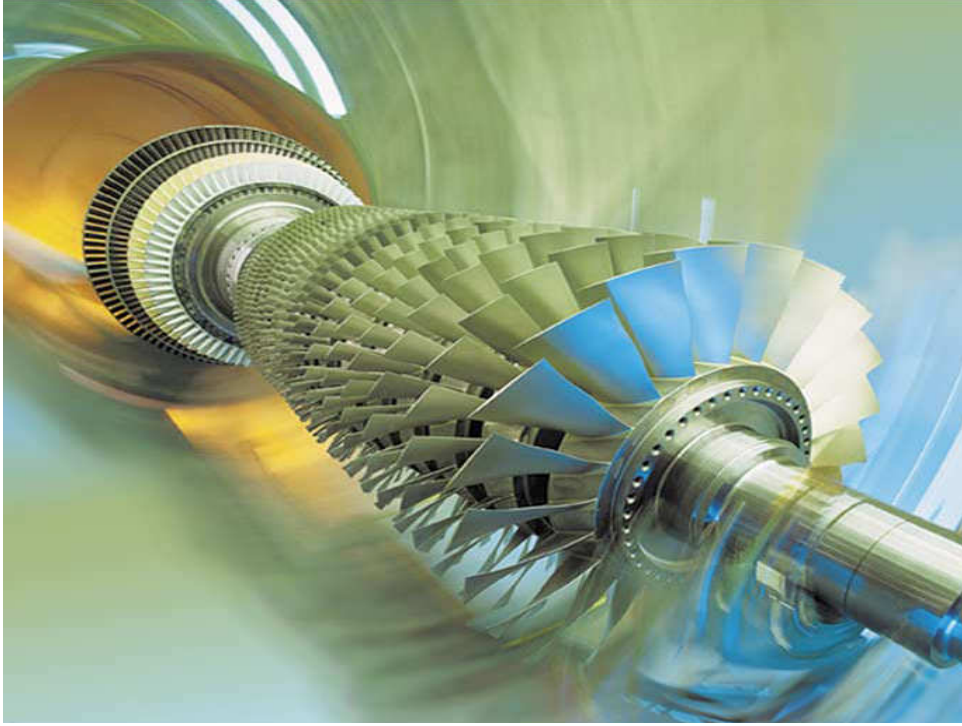
1. Civatalar,
2. Valfler,
3. Reaksiyon kapları,
4. Borular,
5. Pompalar



Şekil 5.2 Bilgisayarla simule edilmiş bir uçak motoru ve önemli bölümleri

5.1 Endüstriyel Gaz Türbinleri

Dünya ekonomisinin sürekli büyümesi ve dünya nüfusunun 10 milyardan 11 milyar seviyelerine gelmesinin beklenildiği 2050 yılında şuan mevcut enerji ihtiyacının iki katına ihtiyaç duyulacaktır. Gelecekteki enerji ihtiyacı karşılanması zor olduğu kadar, bu sorunun üstesinden gelmek için, mevcut enerji üretim yöntemleri ve yeni enerji üretim teknikleri geliştirilmelidir. Artan enerji ihtiyacı ile beraber daha temiz emisyon değerlerine gereksinim duyulduğundan gelişim sürecini daha da zorlu hale getirmektedir. Nükleer enerjideki ilerlemelerin çeşitli sebeplerle dünya çapında askıya alınması, diğer enerji kaynaklarının tüm enerji üretim yükünü üstlenmesini gerekmektedir. Günümüzde, geniş bulunabilirlik ve düşük maliyetinden ötürü başlıca enerji üretimi fosil yakıt kullanımı üzerine kurulmuştur.



Şekil 5.3 Gaz türbin gövdesi ve kanatlar

Buhar türbinleri tarihsel olarak fosil yakıtlardan enerji üretiminin yükünü çeken ana enerji üretim mekanizması iken gaz türbinleri enerji üretim yöntemlerinin zirvesi olarak yerini almıştır (Şekil 5.3). Bununla birlikte, kömür yakıtlı buhar türbinlerinin meydana getirdiği kirliliğin endişelenecek seviyelere gelmesinin yanı sıra doğal gaz gibi daha temiz fosil yakıtların günümüzde teminin ve kullanılabilirliğinin artmasıyla kombine çevrim teknolojisinin gelişmesi sağlanmıştır. Kombine çevrim teknolojisi, gaz türbinleri ve buhar türbinlerinin beraber çalışmasını sağlamıştır. Buhar türbinlerinin için gerekli ısının bir kısmı veya tamamı gaz türbinleri çıkışından alınan ısıyla sağlanmaktadır. Bu sayede santral enerji üretim verimliliği yaklaşık olarak %60 artmaktadır. Gaz türbinlerinde kullanılan enerji kaynağı sayesinde emisyon değerleri klasik kömür yakıtlı enerji santral değerlerinin çok altındadır. Kombine çevrim enerji santrallerinin enerji taleplerini karşılaması ve kapasite değerleri, endüstriyel gaz türbin teknolojisinin daha iyileştirilmiş üretim ve verim alınabilmesi için geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmasını sağlamıştır. Yapılan çalışmalar özellikle genel türbin boyutunun büyütülmesi ve gaz türbin sıcaklığını arttırmak üzerine yoğunlaşmıştır. Özellikle, yıllar süren çalışmalarla rotor giriş sıcaklığındaki artış elde edilmiş, bu sıcaklık artışı sayesinde de gaz türbin verim artışı sağlanmıştır.

Malzeme özellikleri açısından bakıldığında, gaz sıcaklığının en yüksek ve gerilim değerlerinin üst seviyelerde olduğu ilk kademe hareketli türbin kanatları, endüstriyel gaz türbinlerinin limit seviyelerinde çalışan parçası konumundadır. Yüksek sıcaklık dayanımı, mikroyapısal kararlılık ve korozyon dayanımı gibi özellikleri sayesinde, nikel esaslı süperalaşımlar özellikle gaz türbin parçalarında tercih edilen malzeme çeşididir. Rotor giriş sıcaklığının artmasıyla beraber verimin artmasını sağlayan gelişme aslında hareketli kanatların hem döküm yöntemlerinin hem de alaşımlarının geliştirilmesiyle sağlanmıştır. Döktüm yöntemleri, eşeksiz mikroyapı sağlayan klasik döküm tekniklerinden, sütunsu(columnar) tane ve tek kristal yapı sağlayan yönlendirilmiş katılaşma tekniklerine doğru ilerleme kaydetmiştir.

Uçak motorunun gaz türbinlerine kıyasla endüstriyel gaz türbinlerinin kendine has teknolojik sorunları mevcuttur. Endüstriyel gaz türbinlerinin gelişimine karşı en büyük sorun yaratan kısım sistemin boyutudur. Türbinlerin kendisi oldukça büyüktür. Bununla birlikte, uçak motorlarında asıl kısıtlayıcı faktör ağırlık olmuştur ve birincil derecede malzeme seçim kriterlerini etkiler. EGT kanatları, uçak motor kanatlarından 10 kat daha büyük ve 20 ila 30 kat daha ağırdır. EGT kanatları farklı boylarda olmasına rağmen, son kademe büyük türbin kanatları, 1 metre uzunluğa, bitmiş ağırlığı 20 kg ya yaklaşmaktadır.

Hem uçak hem de endüstriyel gaz türbinleri ağır çevrimsel yüke maruz kalmalarına rağmen, aslında iş çevrimleri birbirlerinden farklıdır. Uçak motorları, EGT'lere göre daha yüksek pik çevrim sıcaklıklarına ulaşsa da bu, kalkış esnasında sadece kısa bir zaman için gerçekleşir ve sonrasında ana çevrim sırasında daha düşük sıcaklık seviyeleri görülür. EGTler ise maksimum yük sıcaklığına ulaşırlar ve uçak motor çevrimlerine göre daha uzun süre sabit koşullarda çalışırlar. EGTlerin uçak motorlarına göre daha uzun süre yüksek sıcaklıklarda çalışması, farklı malzeme gereksinimleri doğurmuştur. Bu malzemeler yüksek sıcaklıklarda maksimum mukavemet değerlerinde en iyi şekilde kullanılabilir. Uçak motorlarında bu dayanım, □' çökeltilerinin yüksek hacimsel oranı ile kazanılmaktadır. Ne yazık ki, yüksek dayanımlı uçak motoru alaşımlarının uzun süreli mikroyapısal kararlılığı, EGTlerin görev çevrimleri için yeterli değildir. EGT uygulamalarında, uzun süre yüksek sıcaklıklarda çalışmak, farklı korozyon koşulları ile sonuçlanmaktadır. EGTlerde kullanılan yakıtın miktarı ve kalitesi nedeniyle korozyon gereksinimleri karmaşıkken, jet yakıt kalitesi sıkı kontrol altındadır. Bahsedilen farklılıklar sonucunda EGTlerin tasarım ve üretimlerinde eşsiz zorluklar göstermektedir.

6. SÜPERALAŞIM ÜRETİM YÖNTEMLERİ

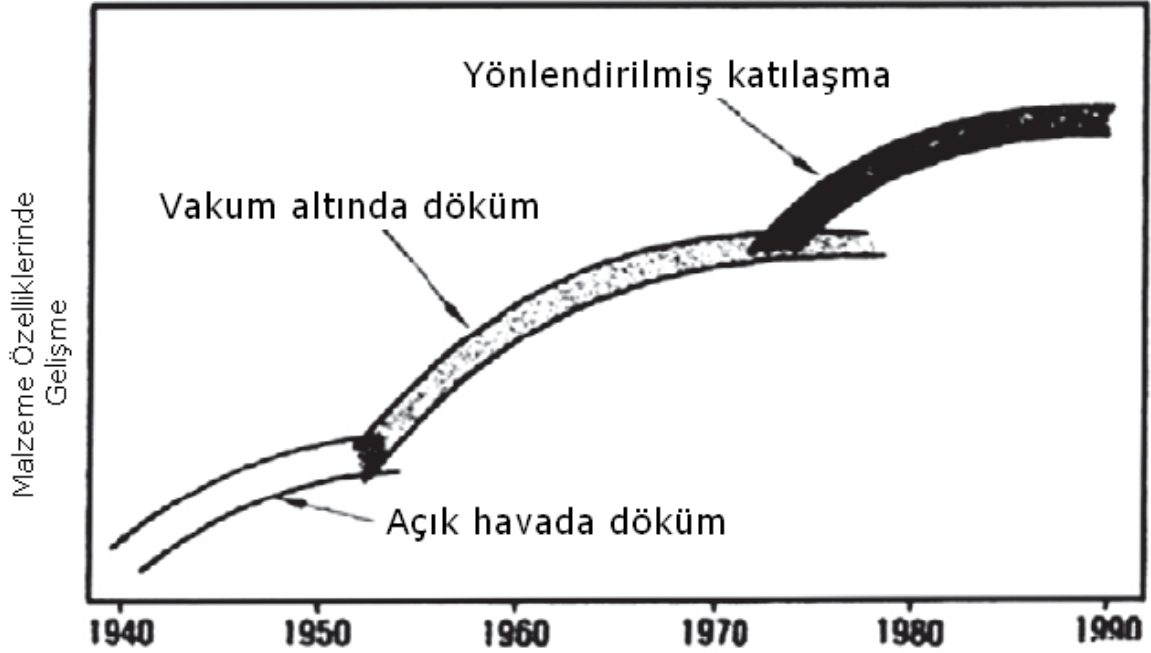
Süperalaşımlarda, mikroyapı karbürlerin dağılımına, çökeltme miktarı ve morfolojisine, tane boyutu ve şekline bağlıdır. Yapı kontrolü, doğru kompozisyon seçimi ve üretim yöntemi ile sağlanır. Süperalaşımlar dövme veya döküm yöntemi ile üretilirler. Her iki yöntem sonunda malzemede farklı kazanımlar elde edilir. Yüksek sıcaklıklara dayanımlı ve hava soğutma kanallı karmaşık şekilli gaz türbin kanatı üretiminde dövme yöntemi kullanılamamaktadır. Karmaşık şekilli parçaların üretimi için geliştirilen hassas döküm işlemi ise, süperalaşımların bünyesinde bulunan, gazlarla bileşik yapma eğilimli elementler nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Özellikle azot ve oksijen ile reaksiyon oluşumu ve bu nedenle kompozisyon değişimi gerçekleşir.

İstenmeyen reaksiyonları engellemek ve alaşım kompozisyonunu kontrol edebilmek için vakum altında ergitme yöntemi geliştirilmiştir. Bu sayede metalik olmayan oksit kirliliklerinin oluşumu azaltılmakta ve oksidasyon oluşturacak elementlerin tepkimeleri engellenmektedir. Vakum indüksiyon ocağında ergime odasının atmosferi, vakum sistemi sayesinde kontrol altına alınır. Bu yöntemle ingota cüruf ve çeşitli kirliliklerin bulaşması engellenir. Uygulanan vakum sayesinde homojen alaşım kompozisyonu ve sistemde bulunan ısıölçerler (pirometre ve termokapl) sayesinde ergitme sıcaklığı kesin olarak ayarlanır. Vakum indüksiyon ergitme yöntemi ile katılaşma süresince kalıp sıcaklığı kontrol altına alınır. Bu sayede ısıl çarpılmalar engellenir ve büyük parçaların katılaşma hızı kontrol altına alınır.

Vakum altında ergitme sayesinde reaktif elementlerin ilavesi artmış, yüksek mukavemet, yüksek çalışma sıcaklığı ve korozyon direnci gösteren süperalaşımların üretimi gelişmiştir. Türbin kanadı üretimi için uygun olan nikel esaslı süperalaşımlar, %50 oranında nikel içermelerinin yanı sıra, yüksek miktarda titanyum ve alüminyum içerdikleri için vakum altında ergitilmeleri gerekmektedir. Titanyum ve alüminyum reaktif yapıya sahiptir ve açık atmosferde oksidasyon meydana getirir. Süperalaşımlarda titanyum ve alüminyum elementleri gamma prime (γ') ve gamma double prime (γ'') fazlarını ortaya çıkararak sertleşmeyi hızlandırmaktadır. Vakum indüksiyon ergitme yöntemi ile titanyum ve alüminyumun reaksiyona girmeleri engellenmekte, yapıda istenilen gamma prime gibi fazların oluşumu sorunsuzca gerçekleşmektedir.

Süperalaşımlarda gaz içeriğini azaltmak sadece yüksek sıcaklık dayanımı sağlamamaktadır. Aynı zamanda önemli miktarda sünekliği ve işlenebilirliği artırır. Süneklik ve gevreklik arasındaki geçiş sıcaklığını düşürdüğü gibi elektriksel ve manyetiksel özellikleri iyileştirir. Vakumla ergitme yöntemi ile üretilen malzemelerde bir diğer avantaj borun mekanik

özelliklere yararlı etkisidir. Yüksek ergime sıcaklıkları ve yüksek sertlik ve aşınma direnci borun malzemeye sağladığı özelliklerdir. Açık hava dökümlerinde meydana gelen bor-oksijen reaksiyonlarının vakum altında engellenmesi bor kompozisyonunu daha kolay kontrol altına alınır hale getirmiştir.

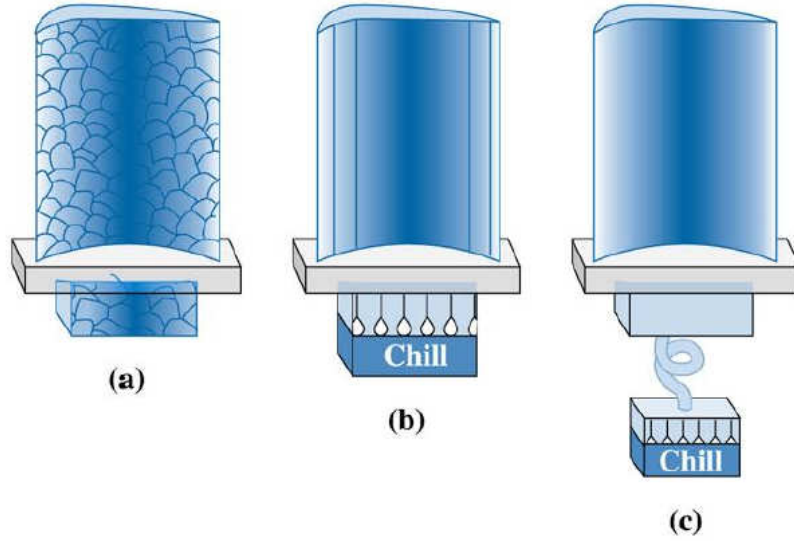


Şekil 6.1 Üretim yöntemlerinin malzeme özelliklerine etkisi (VerSnyder, 1996)

Eşeksenli tane yapısına sahip dövme ve dökme alaşımlarda, meydana gelen termal yorulma ve sürünmeye bağlı kırılma hataları, alaşımın maruz kaldığı gerilimin, tane sınırlarının enine yönünde etki etmesinden dolayı meydana gelir. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki, alaşımın enine yönünde yerleşen tane sınırları ve şeklinin kontrolü ile tane sınırlarında meydana gelen kırılmalar engellenmekte, süneklik artmaktadır. Soğutma sistemlerindeki gelişmeler sayesinde tane boyutu ve dizilişin kontrolü mümkün hale gelmiştir. Türbin kanadı dökümlerinde dikkate değer başarı, uzun sütunsal tanelerin kanat eksenine paralel yönlenmesiyle sağlanmaktadır. Yönlenmiş taneler, kalıbın altına soğutma sistemi yerleştirilmesi, soğumanın kalıp boyunca kontrol altına alınması ile elde edilmektedir (Şekil 6.1). Bu yöntem ile malzemenin sürünme gerilimi geleneksel döküme göre %20–30 artmakta, yüksek sıcaklıklarda geleneksel dökümle karşılaştırıldığında, sütunsal döküm daha iyi kopma uzaması göstermektedir.

Araştırmalar bununla sınırlı kalmamış, türbin kanadı ve tane sınırı ilişkisinden yola çıkarak, tek taneli(tane sınırsız) yapı üzerine yoğunlaşmış ve başarılı olmuştur. Yönlendirilmiş katılaşmaya göre daha yüksek sıcaklık dayanımı ve daha iyi sürünme ve kopma dayanımı, tek

kristal katılaşma yöntemi sayesinde elde edilmiştir. Tek kristal katılaşmada, yönlendirilmiş katılaşmada olduğu gibi sütunsal tanelerin katılaşması yine soğuk yüzeyde başlar (Şekil 6.2). Buna karşın helisel kesişmeden dolayı, sadece bir sütunsal tane, döküm parçasının ana gövdesine doğru büyüyebilir. Tek kristal dökümün, hiç tane sınırı yoktur ve en uygun yönelenmedeki kristalografik düzlem ve doğrultulara sahiptir.



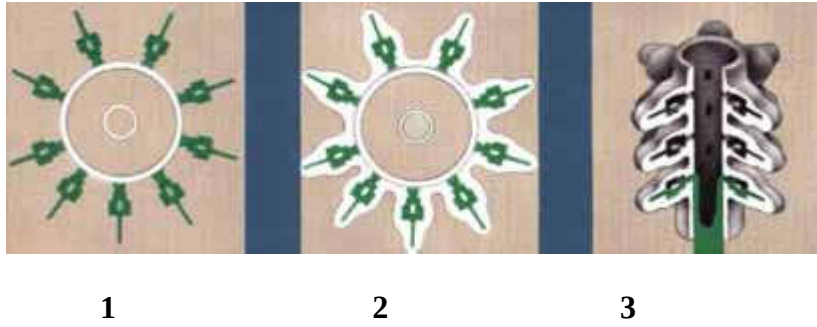
Şekil 6.2 Türbin kanatlarında tane yapısı kontrolü, (a) geleneksel eş eksenli taneler, (b) yönlendirilmiş katılaşma ile sütunsal taneler ve (c) tek kristal (Booth-Morrison, 2008)

6.1 Hassas Döküm

Gaz türbin parçalarındaki gelişimle beraber parçalar hassas şekilli, karmaşık kanallı ve en düşük seviyede rötuş ihtiyacı ile üretilmeye başlanmıştır. Türbin içindeki gaz akışını en iyi hale getirebilmek için türbin kanatlarının şekilleri hassasiyet kazanmıştır. Bu sebeple türbin kanatlarının tasarım ve üretim süreçleri de önem arz etmektedir. Ayrıca çalışma sıcaklıklarındaki artış, çalışan malzemeyi soğutma ihtiyacı doğurmaktadır. Bu nedenle yeni türbin kanatları soğutma kanallı dizayn edilir. Bu gelişmeler ile birlikte, döküm ile üretilen parçalar için kalıp seçimi önem taşımaktadır. Sadece kalıbın şekil hassasiyeti değil mekanik özellikleri de önemlidir. Kalıp malzemesi kararlı yapıda olmalı, eriyik ile reaksiyona girmemelidir. Özellikle yönlendirilmiş katılaşmada daha iyi eriyik-kalıp uyumu gerekmektedir. Eşeksenli katılaşmaya kıyasla yönlendirilmiş katılaşmada, döküm öncesi kalıbın nerdeyse alaşım ergime noktasına yakın sıcaklıklara ısıtılması gerekmektedir. Bununla beraber, seçilen kalıp, ısı akışının kontrol altına alınıp katılaşmanın parça boyunca devamlı bir şekilde meydana gelmesini sağlamalıdır

Hem eşeksenli hem de yönlendirilmiş katılaşmada hassas döküm kalıpları tercih edilmektedir. Bu yöntem yüksek yüzey hassasiyeti ve yüzey kalitesi isteyen karmaşık şekilli parçaların dökümü için geliştirilmiştir. Hassas döküm teknolojisi sayesinde malzeme üzerinde ek işlem ihtiyaçları en aza indirilir.

Hassas kabuk döküm kalıp hazırlama tekniğinde, öncelikle dökülmesi istenilen parçanın, mum veya benzeri bir malzemeden modeli hazırlanır. Genellikle alüminyum bir kalıp imal edilir ve plastik enjeksiyon yöntemi ile istenildiği kadar mum model elde edilir.



- (1) Parçalar yine mumdan yapılmış bir gövdeye yapıştırılarak "mum salkım" hazırlanır. Mum malzeme, 70–90 °C arasında olabilen düşük ergime sıcaklığına ve düşük ısıl genleşme özelliğine sahiptir. Mum, düşük ısıl genleşme özelliği sayesinde seramik kabuğu çatlatmayan bir malzemedir.
- (2) Model, seramik banyosuna batırılarak (sulu alçı görünümünde bir sıvı) çevresine ince bir tabaka kaplanması sağlanır. Seramik tabaka kuruyup katılaşmaya kadar bir fırında bekletilir. Yeteri kalınlıkta seramik kaplanıncaya kadar son iki işlem tekrarlanır. Dış tabakalarda daha kalın seramik tozu kullanılır.
- (3) Dış cidarı sert seramik kaplı parça bir fırına sokularak modelin eriyip dışarı akması sağlanır. Seramik malzeme ise yüksek sıcaklığa dayanıklı olduğundan şeklini muhafaza eder. Bu esnada mum modelin akarak çıkmayan kısımları da tamamıyla buharlaşır. Ardından, fırın sıcaklığı yükseltilerek belli bir süre içinde seramik kabuk pişirilerek sinterlenir ve sonraki döküm işlemlerine dayanacak şekilde mukavemetinin artması sağlanır. İşlem tamamlandığında kalıp döküm için hazırdır.

6.2 Açık Atmosferde Döküm

Elektrikle çalışan ocakların en önemlisi indüksiyon ocaklarıdır (Şekil 6.3). Son yıllarda metalurji sanayisinde kaliteli çelik imali için diğer ocakların yerini almıştır. Bu ocakların kullanılmasıyla çelik maliyetleri düşmüş, sıcaklık ve bileşim kontrolü sağlanmıştır. Elektrodinamik banyo çalkalanmasından dolayı homojen yayılımı çelik niteliklerini de yükseltmiştir. Çelik ergitme uygulamasından birkaç yıl sonra demir dışı metallerin ergitilmesinde de kullanılmaya başlanmıştır.

Volfram-kobalt ve nikel-krom çeliklerinin endüksiyon ocaklarında kolayca ergitilebilmesi ve krom, nikel, molibden, vanadyum gibi elementlerin çeliğin özellikleri üzerine etkilerinin tespitinden sonra bu ocağın önemi daha da artmıştır.

İndüksiyon ocaklarının temiz, göreceli olarak sessiz ergitme ünitelerine sahip olmaları da indüksiyon ocaklarına eğilimi artırmış ve sayısal açıdan diğer tüm ocakların üzerine çıkarmıştır.



Şekil 6.3 Açık atmosfer indüksiyon Ocağı

6.2.1 İndüksiyon Ocağı Çalışma Prensibi

Bir iletken, içinden alternatif akım geçtiğinde civarında alternatif manyetik alan oluşturur. Aynı şekilde iletken bir malzeme alternatif manyetik alanın içine girdiğinde üzerinde bir akım akışı oluşur. Bu akım, dıştaki mevcut manyetik alanı yok edici yönde bir zıt manyetik alan oluşturur. Dışarıdaki manyetik alan malzemenin içine ilerlerken bu zıt manyetik alanı yok edici yönde bir zıt manyetik alan oluşturur. Dışarıdaki manyetik alan malzemenin içine ilerlerken bu zıt manyetik alandan dolayı zayıflar. Bu nedenle akımın büyük kısmı yüzeye yakın oluşur. Zıt manyetik alanın şiddeti frekansın bir fonksiyonudur. Frekans arttıkça yüzeyde oluşan akım, zıt manyetik alan oluşturmada daha etkili olur.

Pota ve sabit haznenin etrafında bulunan indüksiyon bobini ve ocağın içerisindeki metal, indüksiyon ocağının ergitme için gerekli en temel donanımını oluşturmaktadır. Pota dışındaki indüksiyon bobininden geçirilen alternatif akım, sürekli yön değiştiren elektromanyetik değişken alanlar meydana getirir. Malzeme içerisinde oluşan bu endüktif elektrik alanları ise malzemenin öz direnci vasıtası ile ısı enerjisine dönüşür.

6.2.2 İndüksiyon Ocak Potası

İçerisinde metal ve alaşımlarının ergitildiği bakır bobinlerin, içerisinden geçen suyla soğutulan yüksek ısıya dayanıklı, refrakter malzemelerden oluşmuş hazneye ocak potası denir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 İndüksiyon ocağı potası

6.2.3 İndüksiyon Ocaklarında Kullanılan Astar Malzemesi

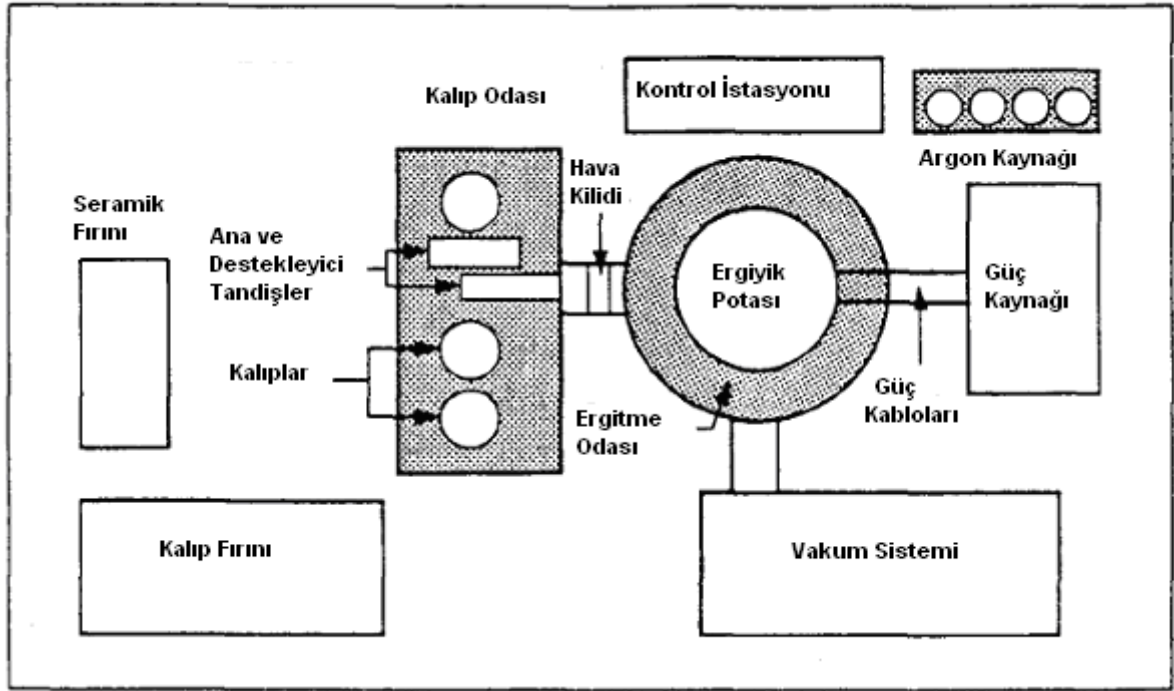
İndüksiyon ocakları için en fazla kullanılan bazik astar malzemesi magnezyum oksit (MgO) tir ve çoğunlukla magnezit olarak bilinir. Bazik bir magnezit astar normal olarak periklas ve kil, krom oksit, silika, demir oksit ve kalsiyum oksit ile MgO ' ın bileşimlerinden meydana gelir. Bağlayıcıların ilavesi daha sağlam sinterlemeyi sağlar.

Magnezit astarın en büyük dezavantajı banyodan metal kapmasıdır. Bir çelik ergitildiği zaman banyodan çatlaklara girer ve diğer ergitimde bir kısmı banyoya geçerek o ergitmenin yapısını bozabilir.

Bazik magnezit astarlar, esas itibariyle yüksek sıcaklığa ve daha koroziv cürüflara maruz kalacak çelik endüstrisinde kullanılmaktadır. Aynı zamanda süperalaşım dökümleri içinde uygundur.

6.3 Vakum İndüksiyon Ocağı

Değişik tipte vakum indüksiyon ocakları bulunmasına rağmen günümüzde en çok kullanılan model iki veya üç odalı sistemdir. Bu sistemlerde vakum indüksiyon ocağı, ergitme odası ve kalıp odası olarak ayrılmıştır. 3 odalı sistemlerde yükleme (şarj) odası ayrı olarak bulunur. Bu sayede ergitme odası devamlı olarak vakum altında tutulabilir hale gelmiştir. Ayrıca yeni vakum indüksiyon ocakları, yönlendirilmiş katılaşma yöntemine uygun dizayn edilmekte ve kalıp odasında, kalıbın yerleştirildiği soğutma plakaları bulunmaktadır.



Şekil 6.5 Şematik olarak vakum indüksiyon ocağı (Hebeisen, 1971)

Ergitme odasında indüksiyon bobini ile çevrilmiş refrakter kaplı pota bulunmaktadır (Şekil 6.5). Hava kilit sistemine sahip ergitme odası sayesinde eriyik metalin çevre gazlarla etkileşimi kontrol altında tutularak alaşımdaki kompozisyon değişiklikleri önlenir. Ergitilecek alaşım ergitme odasında bulunan potaya yerleştirilir.

Dökümde yüksek verim sağlamak için önemli noktalardan biri pota seçimidir. Seçilen potanın çıkılan sıcaklıklara dayanımı, fiziksel ve kimyasal tepkimeleri, dikkat edilmesi gereken noktalardır. Eriyik metalin refrakter malzeme ile reaksiyona girmesi, pota malzemesi seçimini sınırlandırmıştır. İndüksiyon ocaklarında tercih edilen potalarda kullanılan malzemeler sadece seramik oksit ve grafittir. Süperalaşımlar için MgO , $MgO+MgO \cdot Al_2O_3$ ve $MgO + Al_2O_3$ geniş kullanım alanı bulmuştur. MgO reaksiyon sonucu olarak ortama magnezyum verir. Vakum altında yaklaşık $1600^\circ C$ ye kadar kararlılığını koruyan MgO , sıcaklığın yükselmesiyle beraber reaksiyon sonucu olarak ortama magnezyum verir. Düşük ergime sıcaklığına sahip magnezyum, döküm esnasında sıcaklığın yükselmesiyle vakum altında buharlaşarak dışarı atılır.

6.3.1 Vakum Sistemi

Yüksek kalite malzeme üretimi için vakum sisteminin önemi büyüktür. Ergime ve döküm işlemi sırasında fırın içerisindeki gaz ve basınç kontrolü üretilen malzemenin verimini doğrudan etkiler. Daha öncede bahsedildiği gibi süperalaşımlarda mevcut olan reaktif elementlerin, reaksiyona girmesi engellenerek, kompozisyonda ve sonuç olarak malzemenin mekanik özelliklerinde değişimi engellenir. Vakum sistemi ile farklı gaz kaynakları kontrol altına alınır ve döküm işlemini olumsuz etkileyecek koşullar engellenir.

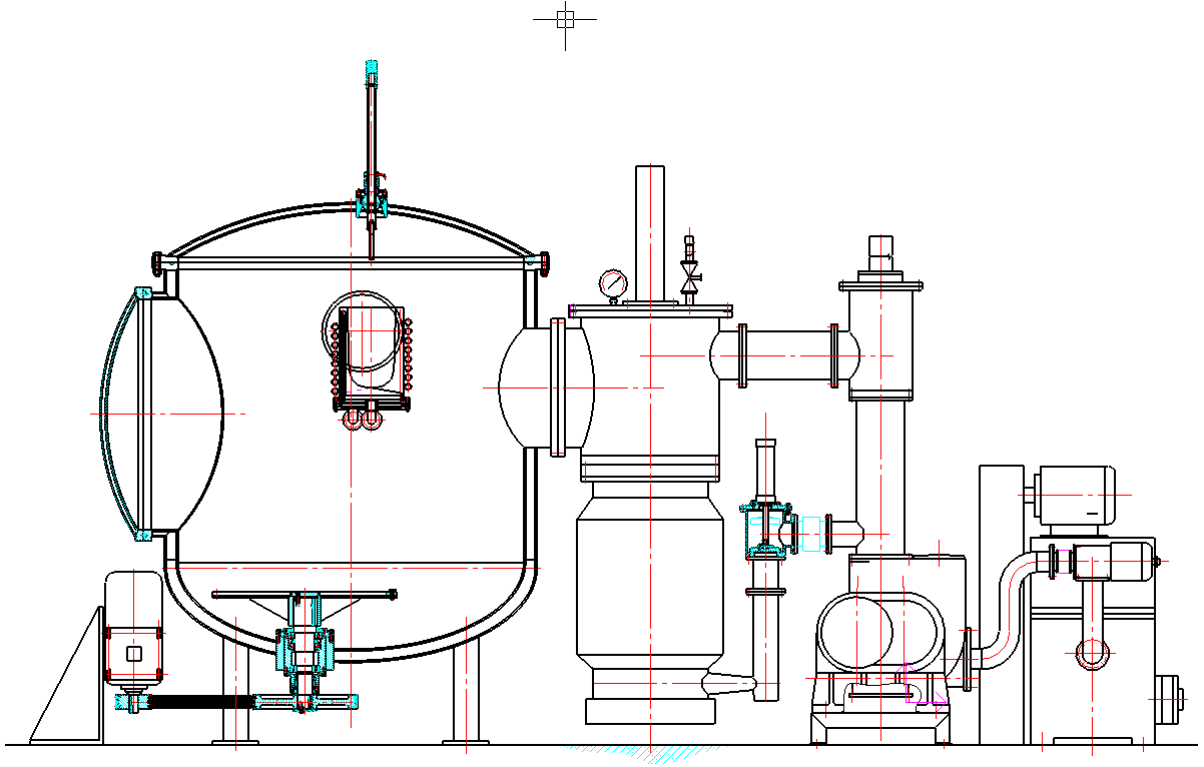
1. Normal koşullar altında oda içerisinde var olan hava
2. Oda duvarları ve refrakter astarın emdiği hava
3. Şarjın içinde çözünen gazlar
4. Vakum altında oksitlerin redüksiyonu sonucu ortaya çıkan gazlar
5. Fırının içine sızan hava

vakum sistemini kontrolündedir.

Üretilecek süperalaşımın kalitesi ve üretim hızı için yüksek vakum kapasitesi gerekmektedir. Vakum-pompa sistemi yukarıdaki değişik çeşitlerdeki gazları dışarı atabilecek özellikte ve geniş basınç aralığı uygulayacak kapasitede olmalıdır. Bu durum için üç tip pompa gerekmektedir: (1) mekanik pompa, atmosfer basıncından 200 mikron basınca kadar düşmeyi sağlar. Ayrıca mekanik pompanın kapasitesi en az 1000 m³/saat olmalıdır. Bu sayede fırın içerisinde emilen hava ve gazın sistemden dışarı çıkışı sağlanır, (2) rotari pompası, difüzyon pompası ile mekanik pompa arasındaki gaz geçişini sağlar, (3) difüzyon pompası, 200 ile 1 mikron arası basınç altındaki gazların kontrolünü sağlar. Difüzyon pompası oda içerisindeki gazı giderir. Çıkan gazı mekanik pompanın dışarı atabileceği basınca sıkıştırarak dışarı atılmasını sağlar.

İndüksiyon ocağı ve vakum pompalarının devreye girmesiyle beraber ergitme işlemi başlamıştır. Metal döküm sıcaklığına ulaşmadan, önceden hazırlanan kalıp veya kalıplar, kalıp odasına yerleştirilmeli, ayrıca kalıp odasında bulunan gaz dışarı atılıp, ortam uygun basınca düşürülmelidir.

Ergime odasında potaya metal yükleme(şarj) yapıldıktan sonra sistem çalıştırılır. Sistemin çalışmasıyla beraber vakum pompaları devreye girer. Vakum indüksiyon ocağının odalarında bulunan hava boşaltılır ve her oda için, oda basıncı, istenilen değerlere indirilir.



Şekil 6.6 Vakum indüksiyon ocağının teknik çizimi

6.3.2 Vakum Ölçerler ve Vakum Seviyeleri

Vakum döküm sistemimiz düşük, orta ve yüksek vakum seviyesine vakum pompaları yardımıyla inebilmektedir

Çizelge 6.1 Vakum seviyeleri

Vakum Aralığı	Pa	mbar	Torr
Düşük	10^5 - 10^2	1000-1	760-1
Orta	10^2 - 10^{-1}	1 - 10^{-3}	1 - 10^{-3}
Yüksek	10^{-1} - 10^{-6}	10^{-3} - 10^{-8}	10^{-3} - 10^{-8}
Çok Yüksek	$< 10^{-6}$	$< 10^{-8}$	$< 10^{-8}$

Vakum döküm sisteminde muhtelif noktalarda vakumu ölçmek için mekanik manometre, pirani ve sıcak katot iyonizasyon tipi vakum ölçüm kafaları bulunmaktadır. Bu üç ayrı tip vakum ölçüm sisteminden:

- Mekanik manometre çok düşük vakum seviyelerini;
- Pirani (Termal) vakumölçer düşük ve orta vakum seviyelerini;
- Sıcak katot iyonizasyon vakumölçer ise yüksek vakum seviyelerini ölçer (Çizelge 6.1).

Yukarıdaki tabloda da görüleceği üzere değişik vakum ölçerlerin değişik çalışma aralıkları vardır. Pirani tipi vakumölçerde ısı iletkenlik esasına göre ölçüm yapılır. Sıcak katot iyonizasyon vakumölçerde ise ısıtılan bir flaman (katot) elektron yayar ve bu elektronlar vakum odası içindeki gazları iyonize eder. İçeride çok atom varsa yani vakum seviyesi yüksekse daha fazla gaz iyonize olabilir. Flamanın dışına konumlandırılmış olan toplama ızgarasına ulasan iyonlar belirli bir iyon akımı oluşturur. İçerideki basınç düştükçe yani yüksek vakuma doğru gidildikçe iyon akımı azalır.

Sıcak katot iyonizasyon vakumölçer, akkor halinde bir flamana sahip olduğunda yüksek basınçlarda (düşük ve orta vakum) kullanılamaz. Çünkü odadaki oksijen bu flamanı hızla oksitleyerek vakum ölçerin ömrünü kısaltır. Bu yüzden sıcak katot iyonizasyon vakum ölçer belirli bir vakum seviyesine (yaklaşık 1Pa) gelindikten sonra devreye alınır.

Mekanik (bourdon) tipi vakum ölçerlerden sistem üzerinde toplam 2 adet vardır. Bunlar difüzyon valfinin üstünde konumlanmış olup ergitme vakum odasının düşük vakum seviyesini ölçmeye yarar.

Pirani tipi vakum ölçerlerden de sistemde bir adet olup vakum odasının düşük ve orta vakum seviyelerini ölçer.

Yüksek vakum seviyelerini ölçmeye yarayan sıcak katot iyonizasyon vakumölçerlerden de bir adet olup vakum odasının yüksek vakum seviyelerini ölçer.

6.4 Vakum İndüksiyon Ocağında Döküm İşlemleri

6.4.1 Kalıplama

Vakum indüksiyon ocaklarında kullanılacak kalıpların kararlı yapıları ve fırına yerleştirildiklerinde reaksiyona girme eğilimli olmamaları gerekmektedir. Geleneksel kum ve organik bağlayıcılı kabuk kalıplar yüksek miktarlarda uçucu malzeme içeriklerinden dolayı vakum altında dökümde kullanılamazlar. Geleneksel dökümde kullanılan silika ve zirkon seramikleri, bazı yönlendirilmiş katılaşma uygulamalarında da kullanılır. Metalle temas halinde olan ilk kaplama tabakası koloidal silika veya etil silikanın hassas bir biçimde ayrılmış zirkon ($ZrSiO_4$), alümina (Al_2O_3) veya silika (SiO_2) tabakalarından biridir. Kalıba

ana desteği sağlayan maddeler ise ince tabakalardan sonra gelen büyük parçacıklı zirkon, silika, mullit veya fused silikadır.

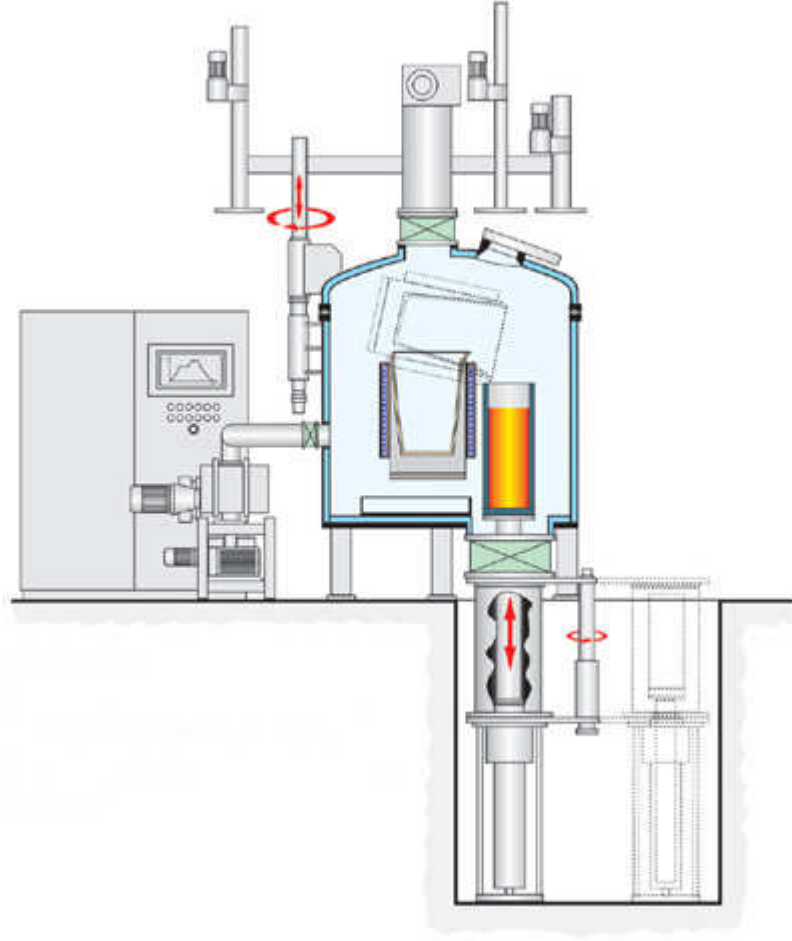
Parçada, hava soğutmalı türbin kanatlarında olduğu gibi, karmaşık iç kanallar istenirse, kalıbın içerisine istenilen kanalların şeklinde, dökümden sonra kimyasal olarak eriyecek seramik maçalar yerleştirilir. Maça malzemesi döküm sırasında eriyik ile reaksiyona girmeyecek derecede kararlı olması gerekmektedir. Ayrıca maça malzemesi, döküm sonrası parça üzerinden kolayca ayrılabilir yapıda olmalıdır.

Kalıp odası hazır konumdayken, döküm sıcaklığı beklenir. İstenilen sıcaklığa ulaşıldığında iki oda (ergime ve kalıp) arasındaki kapak açılır ve hem pota hem de kalıp döküm pozisyonuna getirilir.

6.4.2 Vakum İndüksiyon Ocağında Döküm Sıcaklığı Tayini

Süperalaşımlar gibi içerisinde çok miktarda element barındıran ve yüksek sıcaklıklarda çalışması beklenen alaşımlarda döküm sıcaklığı kritik önem taşımaktadır. Doğru döküm sıcaklığı seçilmemesi, alaşım kompozisyonundan mekanik özelliklere birçok kritik fonksiyonu doğrudan etkiler. Döküm için seçilen sıcaklık yükseldikçe, katılaşma sırasında oluşacak tanelerin büyümesine neden olur. Büyük taneli yapı ise beklenen mekanik özellikleri sağlayamaz. Malzeme çalışma esnasında, yüksek sıcaklıklarda, ısıl dayanım gösteremeyerek yırtılma ve kopma gibi hasarlar meydana gelir. Bu nedenle döküm sıcaklığı mümkün oldukça düşük seçilmelidir. Aşırı düşük döküm sıcaklıklarından da kaçınmak gerekir. Kalıbın hassas noktalarının erimiş metalle tam dolmaması veya kalıbın tam dolmasına rağmen parça içerisinde mikro gözenek oluşumu gibi kusurlar meydana gelir. Döküm sıcaklığının doğru tayin edilebilmesi için vakum ergitme ocağı, pirometre ve termokapıya sahip olmalıdır. Ayrıca yönlendirilmiş katılaşma sisteminde, döküm esnasında ısıl şok ve gerilime bağlı olarak meydana gelebilecek kalıp hatalarını en aza indirmek için kalıp sıcaklığı, alaşım katılaşma sıcaklığının üzerine çıkarılması gerekmektedir. Bu nedenle vakum ergitme ocağının kalıp sıcaklığı ölçümü yapılmasına elverişli olmalıdır (Şekil 6.7).

Genel uygulamalarda döküm sıcaklığı erime aralığının 50 ila 150 °C üstünde seçilir (Inconel 738 erime aralığı 1231–1315°C). Kalıp önısıtma sıcaklığı ise kalıptaki bütün detayların tam dolması için önemlidir. Yalıtım olmadan, kalıbın önısıtma fırınından kalıp odasına aktarımı sırasında, sıcaklığını belirli sınırlar arasında koruması gerekmektedir.



Şekil 6.7 Kalıp odası dikey yerleştirilmiş iki odalı vakum indüksiyon ergitme ocağı

Yönlendirilmiş katılaşma uygulanacak alaşımların (yönlendirilmiş katılaşmaya uygun MAR M-200 alaşımı) ergime sıcaklıkları 1500°C civarındadır. Döküm sıcaklığının, alaşım ergime sıcaklığının 50 ile 150°C üzerinde seçildiği düşünüldüğünde, vakum indüksiyon ocağının en azından 1700°C ergitme sıcaklığına çıkabilir olmalıdır. Yönlendirilmiş katılaşma sistemi için ayrıca rezistans veya kalıp ısıtıcısına sahip vakum indüksiyon ocağı kullanılmalıdır. Kalıbın, kalıp odasında istenilen sıcaklığa ısıtılabilmesi için üst kısım ve alt kısımda en az birer adet ısıtma elemanı olmalıdır. Ve ayrıca düzgün ve homojen ısı ölçümü yapılabilmesi için her bölgede 2 ayrı termokapl bulunmalıdır. Yönlendirilmiş katılaşma işleminin gerçekleşmesi için kalıbın altında soğutma plakası bulunmalıdır. Soğutma, bu plaka sayesinde, kalıbın alt yüzeyinden başlayarak parça boyunca devam eder. Bu yöntemde kalıp sıcaklığı neredeyse ergime sıcaklığına yakın seçilir (yaklaşık 1315°C). Döküm sıcaklığı ise $1450\text{--}1455^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Eşeksenli üretim yönteminde kalıp sıcaklığı yaklaşık $980\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ arası, alaşımın döküm sıcaklığı ise $1450\text{--}1455^{\circ}\text{C}$ arası seçilir. Döküm sıcaklığına ulaşıldığında fazla zaman

geçirilmemelidir. Uzun süre yüksek sıcaklıklarda metali bekletmek, alaşım kompozisyonunda değişimler meydana getirebilir.

6.4.3 Vakum İndüksiyon Ocağında Ergitme

Döküm işleminin hızlı gerçekleşmesi, kalıptaki ince kısımların dolması ve tane boyutu kontrolü için çok önemlidir. Genellikle döküm hızı saniyede 7-9kg olmalıdır. Dökme işlemi, yana yatırma mekanizması ile gerçekleşir. Potayı yana yatırma açıları, en az öne 105° ve arkaya 10° olmalıdır. Bu sayede pota içerisindeki eriyik metalin tamamı kalıba dökülebilir. Döküm öncesinde ve sonrasında kalıp çekme işlemi düşük hızlarda olmalıdır. Titreşim ve sarsıntılardan kaçınılmalıdır. Doğru döküm sıcaklığına ulaşıldığında, eriyik kalıba hızlı ve tek seferde dökülmelidir. Döküm işlemi tamamlandıktan sonra aradaki kapak kapanır ve diğer döküm işlemi için ocak hazır hale gelir. Kalıp odasından çıkarılan kalıbın üst kısmına ekzotermik karışım dökülerek eriyiğin katılaşması sırasında beslenmesine yardımcı olunur.

Eşeksenli katılaşma uygulamalarında kalıp oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Katılaşma işlemi tamamlandığında parça üzerindeki seramik kabuk hassas şekilde temizlenir. Ardından, gerekli çapak alma, temizleme ve yüzey parlatma işlemleri yapılır. Son olarak ise mekanik testler yapıp, türbin kanadının uygunluğu gözden geçirilir.

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, IN738 süperalaşım malzemenin açık ve kontrollü atmosferde dökümleri yapılmıştır. Her iki tür döküm sonrası yapıda oluşan değişiklikler ve mekanik özellikler incelenmiştir.

7.1 Deneyde Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar

Deneyisel çalışmalarda kullanılacak malzemenin kimyasal kompozisyonunu belirlemek ve döküm sonrası kimyasal kompozisyonda oluşan değişiklikleri belirlemek için xrf analizi yapılmıştır. IN 738 süperalaşım hürdası Philips WDXRF 2404 X-Işını Spektrometresinde incelenmiştir (Şekil 7.1).



Şekil 7.1 X-Işını Spektrometresi

Döküm kalıplarının hazırlanmasında mum enjeksiyon presi, seramik çamur karıştırıcı ve yağmurlama makinaları kullanılmıştır.

Deneyisel dökümlerde kullanılan magnezit refrakterin içeriği %95 MgO, %5 CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ tür. Tane inceliği ise 0,5mm'dir.

7.2 Deneyde Kullanılacak Malzeme

Bu deneyisel çalışmada kullanılacak alaşım, nikel esaslı süperalaşımlardan en çok kullanılan IN738 alaşımıdır (Çizelge 7.1). 980-1000°C sıcaklıklara kadar sürünme dayanımı göstermesi ve ayrıca sıcak korozyon çalışmaları ortamlarında yüksek dayanımı sayesinde gaz türbinlerinde

tercih edilen bir alaşımdır. IN738 alaşımı bahsettiğimiz süperalaşım sertleştirme mekanizmalarına olumlu cevap vermekte ve her 3 yöntemle dayanım kazanmaktadır. Krom, molibden, tungsten ve kobalt katı-eriyik sertleşmesi ile, nikel-alüminyum-titanyum bileşikleri γ' fazının çökelme sertleşmesi ile ve karbürler ve boritlerde tane sınırı dayanımını ile alaşıma dayanç kazandırmaktadır. Diğer birçok nikel esaslı süperalaşımlara göre daha iyi sıcak korozyon dayanımına sahip olması, içeriğinde bulunan krom, kobalt, tantal ve titanyum içeriğine bağlıdır. IN738 alaşımı hem dövme hem döküm olarak da üretilebilirliği jet motorlarında gaz türbin parçalarına kadar geniş kullanım alanına sahiptir.

Çizelge 7.1 IN738 alaşımın kimyasal bileşimi

Element	%
Nikel	Balans
Krom	16,0
Kobalt	8,5
Alüminyum	3,5
Titanyum	3,5
Tantal	3,5
Wolfram	2,6
Molibden	1,8

Süperalaşımların içerisinde bulundurduğu çok sayıda alaşım elementi ve ingot hammadde olarak üretimindeki zorluklar, ülkemizde fazla rağbet gören bir alaşım da olmamasıyla beraber üretim tesisin olmaması tek temin seçeneğinin yurtdışı olmasını gerektirmiştir. Süperalaşım üreticisi firmalar ile yapılan görüşmelerde teslim süresi ve istenilen miktarın az olmasından kaynaklı yüksek fiyatı, malzemenin yurtdışından temini maddi ve zaman açısından tercih edilmemiştir. Türkiye’de kullanılmış IN738 alaşımı türbin kanat hurdalarından yararlanmak istenmiş ve bu sayede süperalaşımların geri dönüşümü açısından da deneysel çalışma ve sonuçlar hedeflenmiştir.

7.3 Kalıp Hazırlama

Yukarıda anlatılan hassas döküm yöntemi adımları takip edilerek, ilk önce dökümü yapılacak parçaların çelik kalıpları yapılmıştır. Çelik kalıpları yapılan parçalar düz plaka ve çekme çubuklarıdır. Düz plakalar metalografik inceleme, çekme çubukları ise mekanik özelliklerin tayini için gereklidir. Hazırlanan kalıbın içerisine 60-70°C arasında 5-6 atm basınçla mum basılmıştır. Mum modelleri hazırlanan parçalar döküm doldurma ve hatasız çıkma hesapları yapılarak salkım dizaynları gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.2).



Şekil 7.2 Hazırlanan mum model salkımları

Hazırlanan salkımların kaplanması koloidal bağlayıcı fused silica seramik malzeme kullanılmıştır. Mum salkımlara öncelikle -200 meshlik çamurun içine daldırılmış ve 0,2-0,3mm'lik seramik partiküllerinin püskürtme ile tatbikiyle ilk iki katları gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki katlar -100 meshlik çamura daldırma ve 0,7-0,8mm'lik seramik partikülleri püskürtmeyle toplamda 7-8 kat oluncaya kadar devam edilmiştir.

Daha sonra seramik kaplı mum modelden oluşan kalıbın içerisinden mum giderme işlemi için otoklava sokulmuştur. Mum giderme işlemi sırasında mum buharlaşacağı sıcaklıklara ısıtılmasıyla, seramik kalıp içerisinde mum kalıptan uzaklaştırılmıştır. Mum giderme işlemi sonrasında dışı seramik kaplı, içi boş kalıp elde edilmiştir. Artık mumun giderilmesi ve seramik kalıba mukavemet kazandırmak için son pişirme işlemi uygulanmıştır. Pişirme işlemi sonrasında kalıplar döküme hazır hale gelmiştir.

7.4 Ergitme, Alaşımlama ve Döküm

Açık atmosferde döküm işlemi Inductotherm marka 25kglık düşük frekanslı indüksiyon ocağında yapılmıştır (Şekil 7.3). Kontrollü atmosfer dökümleri 20kg potalı vakum indüksiyon ocağında yapılmıştır (Şekil 7.4).



Şekil 7.3 Açık atmosfer dökümde kullanılan indüksiyon ocağı



Şekil 7.4 Kontrollü atmosfer dökümlerinde kullanılan vakum indüksiyon ocağı

Öncelikle eritilecek IN 738 hurdaları hem açık atmosfer hem de kontrollü atmosfer pota şekillerine göre kesilip hazırlanmıştır.

Döküm öncesi, hazırlanmış olan seramik döküm kalıpları, döküm sırasında ve sonrasında meydana gelebilecek termal çarpılma, yürümeme, katlanma ve erken katılaşma tarzı döküm hatalarını engellemek için fırında yaklaşık 900-1000°C sıcaklıklara ısıtılmıştır.

Açık atmosfer dökümde döküm öncesi erigiyik metale akışkanlığı arttırmak için 50gr FeSi ilavesi yapılmıştır. Açık atmosfer dökümleri 1540°C’de yapılmıştır. Döküm sonrası kalıp açık atmosferde soğumaya bırakılmıştır.

Kontrollü atmosfer dökümlerinde ergitme için vakum indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Vakum indüksiyon ocağı içerisinde kalıp ısıtıcısı bulunmadığından, döküm kalıbı yukarıda belirtildiği gibi dışarıda ısıtıldıktan sonra vakum odasına yerleştirilmiştir. Vakuma alma işlemine potada eritilecek malzemenin ve kalıbın yerleştirilmesinden sonra başlanmıştır. Kontrollü atmosferde döküm, 8×10^{-1} Pa vakum seviyesi ve 1450°C döküm sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Kontrollü atmosferde yapılan dökümlerde kalıp, vakum odasında soğumaya bırakılmıştır.

Döküm sonrası seramik salkımlar ilk önce kumlama makinesi (Şekil 7.5) ile parça üzerindeki seramiklerden arındırılmış ve daha sonra kesme taşı ile ana yolluğa bağlı numune ve çekme çubukları gövdeden kesilmiştir.



Şekil 7.5 Döküm sonrası metalin seramikten arındırılması için kullanılan kumlama makinesi



Şekil 7.6 Döküm sonrası kalıbın görünümü



Şekil 7.7 Kumlama sonrası döküm parça

7.5 Yapısal Muayene ve Testler

Döküm sonrası numuneler oda sıcaklığına kadar soğumaları beklenmiştir. Seramik kabukları kırılıp ana salkımdan ayrılan parçalar, Struers Unitom 50 numune kesme cihazında kesilmiş ve metalografik incelemeler için, numuneler Struers Rotapol 25 markalı zımpara ve parlatma cihazlarında hazırlanmıştır. Numune hazırlama işleminde; sırasıyla 60, 120, 180, 220, 320, 400, 600, 800 ve 1000 meshlik SiC zımparalar kullanılmıştır. Numuneler, 0,05 μm 'luk alümina pasta ve 3 μm 'luk Struers marka elmas pasta ile parlatılmıştır. Dağlama ayraç olarak 20 ml saf su, 20 ml HCl ve 5 ml H₂O₂ kullanılmıştır.



Şekil 7.8 Mikroyapı fotoğraflarının çekilmesinde kullanılan optik mikroskop

Daha sonra, numunelere ait mikroyapı fotoğrafları Nikon Eclipse L-150 ile çekilmiş ve görüntüler literatürde geçen süperalaşım tane yapı fotoğrafları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 7.8).

Mekanik özelliklerin belirlenmesi için, çekme çubuğu şeklinde dökülen numuneler çekme deneyi testine tabi tutulmuştur.

Mekanik özelliklerin tayininde Zwick Z250 marka çekme deney cihazı kullanılmıştır (Şekil 7.9).



Şekil 7.9 Çekme deneylerinde kullanılan çekme deneyi cihazı

8. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Dökümü gerçekleştirilen numunelere ait kimyasal kompozisyon, mikroyapı görüntüleri ve mekanik test sonuçları aşağıda verilmiştir.

8.1 Kimyasal Analiz

Döküm sonrası yapılan kimyasal analiz sonucunda elde edilen değerler Çizelge 8.1’de verilmiştir.

Çizelge 8.1 Farklı döküm teknikleri sonrası deneyde kullanılan malzemeye ait kimyasal analiz değerleri (%)

	Hurda Süperalaşım	Açık Atmosferde Dökülmüş Süperalaşım	Kontrollü Atmosferde Dökülmüş Süperalaşım
Al	3,49	3,14	3,42
Co	7,69	7,76	7,64
Cr	16,47	16,50	16,51
Mo	1,74	1,78	1,71
Ni	59,32	61,31	59,64
Si	0,27	0,52	0,5
Ta	3,46	1,49	3,52
Ti	3,55	3,41	3,58
W	2,71	2,53	2,56

Analiz sonuçları incelendiğinde, ilk dikkati çeken açık atmosfer dökümlerinden sonra yapıda Tantalyum azalması olmuştur. Booth-Morrison (2008) tarafından gerçekleştirilen Tantalyum ilavesi üzerine süperalaşımlarda meydana gelen yapı ve mekanik özelliklerin değişimi konulu çalışmada değinildiği üzere, Tantalyumun ana faz yapıcı elementlerden biri olduğu, güçlü bir gamma prime fazı oluşturunucusu olarak, katı-eriyik sertleşmesine katkıda bulunarak ana malzemenin sertlik ve mukavemet değerlerine olumlu etkisi görülmüştür. Tantal’ın yapı içerisinde matris mukavemetlendirici etkisinin yanı sıra, çökelme sertleşmesinde α fazının hacim içerisinde daha yüksek oranda çözünmesine olanak sağlamasıdır. α fazının çözünme oranının artması ise malzemede süneklik dayanımında artışa neden olmaktadır.

Ayrıca ana faz elementlerini oluşturan ve yüksek sıcaklık ve oksidasyon direnci sağlayan Al ve Ti'de vakum döküme göre açık atmosfer dökümde azalmalar görülmüştür. Bu nedenle vakumda dökülen alaşımda kimyasal kompozisyon korunurken, açık atmosfer dökümde kimyasal kompozisyon farklılık göstermiştir.. $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ ana fazı içerisinde Alüminyumun azalması mukavemet özelliklerinden yüksek sıcaklık dayanımına kadar süperalaşımlardan istenen mekanik özelliklerin azalmasına sebebiyet verebileceği görülmüştür (Sims, 1986).

8.2 Mikrosertlik

Kimyasal kompozisyon analizlerinde ortaya çıkan, açık atmosfer dökümlerinden sonra malzemede tantalyum azalmasının etkisini daha iyi anlamak için mikrosertlik deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyin sonuçları Çizelge 8.2'de gösterilmektedir.

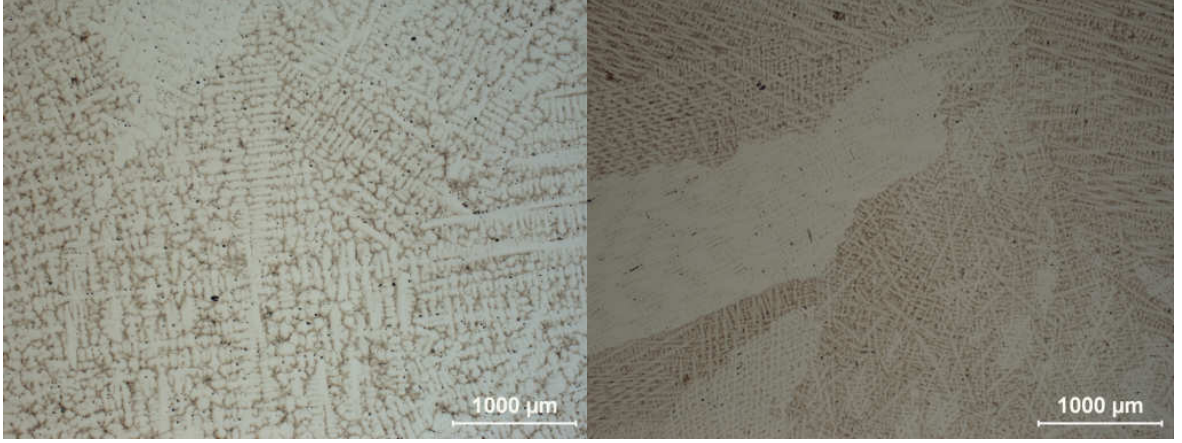
Çizelge 8.2 Döküm yöntemleri bakımından karşılaştırılan numunelere ait mikrosertlik sonuçları

Vickers Mikrosertlik (GPa)	Açık Atmosfer	Kontrollü Atmosfer
1	2,1	3,3
2	2,1	3,1
3	1,8	3,4

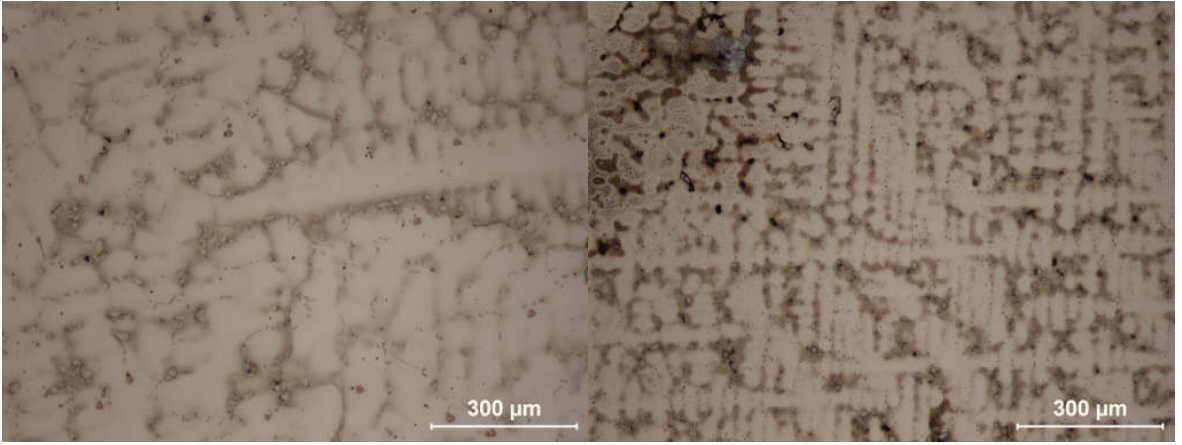
Kontrollü atmosfer dökümlerinden alınan numune boyutunun küçük olması mikro sertlik deneyinin sadece döküm hallerine deney yapılmasına olanak sağlanmıştır. Yaşlandırma işlemi yapılamamış ve sadece bir parametre altında(döküldüğü gibi) sonuçlar değerlendirilmiştir.

8.3 Mikroyapı İncelemesi

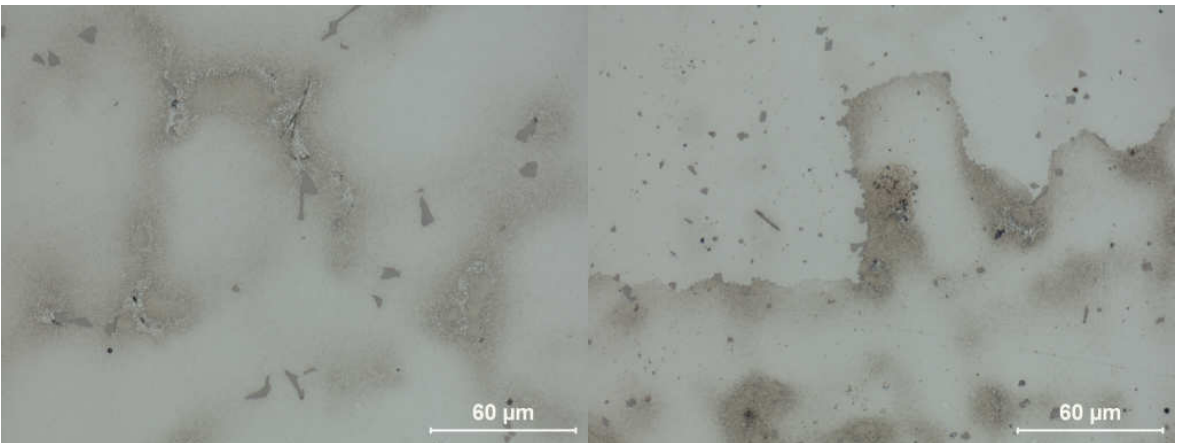
Metalografik numune hazırlama yöntemleri sonrasında hem açık atmosfer dökümlerinden hem de kontrollü atmosfer dökümlerinden mikroyapı resimleri alınmıştır (Şekil 8.1, 8.2, 8.3).



Şekil 8.1 Döküm sonrası numunelerin mikroyapı görüntüleri (2,5X) (a)Açık atmosfer döküm, (b) Kontrollü atmosfer döküm



Şekil 8.2 Döküm sonrası numunelerin mikroyapı görüntüleri (10X) (a)Açık atmosfer döküm, (b) Kontrollü atmosfer döküm



Şekil 8.3 Döküm sonrası numunelerin mikroyapı görüntüleri (50X) (a)Açık atmosfer döküm, (b) Kontrollü atmosfer döküm

Kontrollü atmosfer dökümünden küçük miktarda numune alınabildiğinden ısıtıl işlem uygulanamamıştır. Döküm sonrası numunelerden görülen mikroyapılar, dendritik yapılardadır. Dendritik yapılardan herhangi bir fark gözlemek mümkün olmamıştır.

8.4 Çekme Deneyi

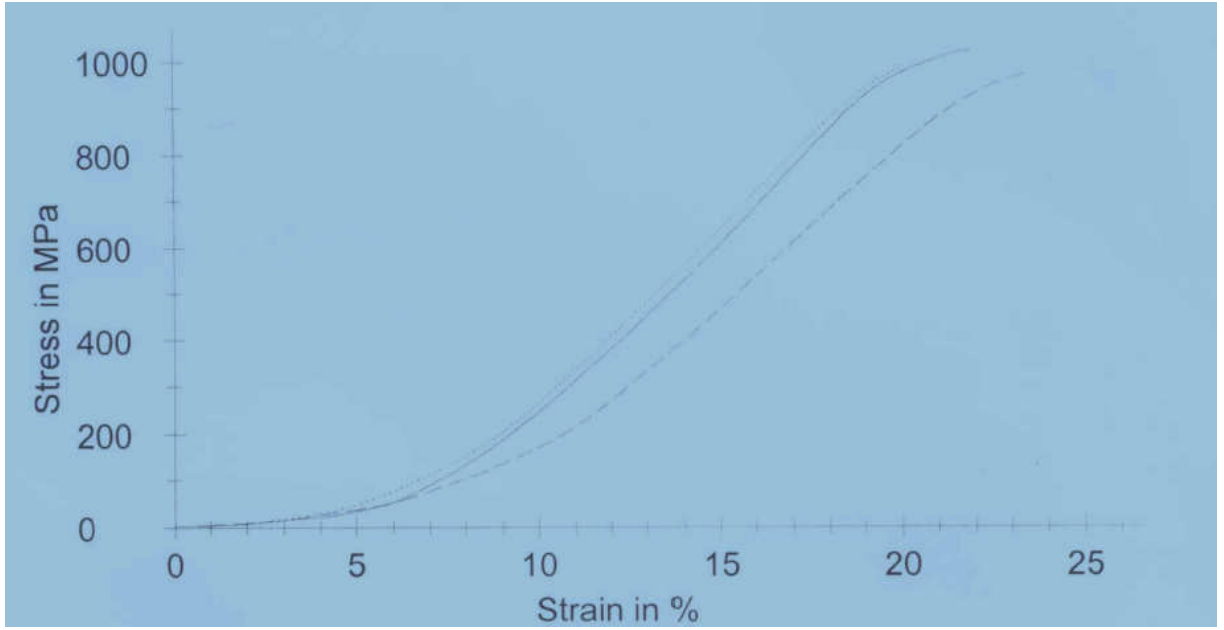
Süperalaşımların yüksek sertlik değerleri işlenebilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle çekme çubukları, mum modelden imal edilip, döküm kalıplarına monte edilmiştir. Döküm sonrası, hafif yüzey çapak temizliği ile deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 8.4). Yapılan çekme deneyi sonrası ortaya çıkan değerler Çizelge 8.3’de, çekme eğrisi Şekil 8.5’da gösterilmiştir.



Şekil 8.4 Çekme deneyi uygulanmış numuneler

Çizelge 8.3 Açık atmosfer döküme uygulanan çekme deneyi sonucunda ortaya çıkan değerler

Sıra	Çap Mm	Elastiklik Modülü MPa	Akma Sınırı R0,2 MPa	Rm MPa	Uzama %
1	6,22	7954,70	953,03	1019,04	1,79
2	6,28	7103,55	880,58	970,57	1,46
3	6,19	7917,08	935,65	995,42	0,93



Şekil 8.5 Açık atmosfer döküm numunelerine uygulanan çekme deneyi sonucu oluşan uzama eğrileri

Collier (1986) tarafından gerçekleştirilen W, Nb ve Ta gibi refrakter elementlerin nikel esaslı süperalaşımların mikroyapı, mikrokimya ve mekanik özelliklere etkisinin araştırıldığı çalışmada mekanik özellikler incelendiğinde uzama değerlerinin %7 ila 10 arasında değiştiği görülmüştür. Gerçekleştirdiğimiz açık atmosfer döküme uyguladığımız çekme deneyi ile literatürdeki uzama ve kuvvet değerlerinin uzağında kalmıştır. Açık atmosfer dökümde yaşanan elementel kayıplar, kontrollü atmosfer ergitme yönteminin malzemenin mekanik özellikleri açısından ne kadar önemli olduğu görülmüştür.

Aynı testler kontrollü atmosfer dökümlerine gerçekleştirilmek istendiğinde, kontrollü atmosfer dökümlerinde karşılaşılan döküm tekniği açısından zorluklar kalıbın tam doldurulması sağlanamamıştır. Dökümlerin kapalı bir oda içerisinde gerçekleşiyor olması, döküm esnasında müdahaleyi olanaksız kılmıştır. Vakum indüksiyon ocağında sistemin dökümü yani pota devirmeyi otomatik yapması, pota içerisinde metalin hızlıca boşalmasına sebebiyet vermiştir. Numune kalıbının küçük olması ve pota ile arasındaki mesafeden dolayı (Şekil 8.6) ergimiş metal döküm esnasında daha kalıba gelmeden oda içine dökülmüştür. Bunu önlemek için ayrıca seramik huni kullanarak dökümler gerçekleştirilmiş fakat aynı sorunla tekrar karşılaşmıştır.



Şekil 8.6 Döküm kalıbının vakum indüksiyon ocağı içerisinde görünümü

9. SONUÇLAR

Süperalaşımların, açık ve kontrollü atmosferde dökümlerinin incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Türkiye’de Gaz Türbin Santralleri ve Jet Uçak Motorlarında kullanılan türbin kanadı ve benzeri süperalaşım parçalar hurda bakımından zengin ve geri dönüşüme müsait yapıdadır.
2. Süperalaşımların kontrollü atmosferde ergitilmesi, içerisindeki reaktif elementlerin korunması için gerekli ergitme yöntemidir. Açık atmosfer dökümlerinden sonra yapılan analizlerde Tantalyum ve Alüminyum gibi ana matris için önemli iki elementte büyük oranda azalma olduğu görülmektedir.
3. Hem açık atmosfer hem de kontrollü atmosfer dökümlerinden sonra parçalar incelendiğinde, kontrollü atmosferde dökülen parçaların yüzeyinin daha hassas olduğu görülmüştür.
4. Kontrollü atmosferde döküm işlemleri kapalı oda içerisinde gerçekleştiğinden, döküme müdahalenin zor olduğu sonucunu çıkarılmıştır. Kontrollü atmosfer dökümleri için döküm öncesi kalıp dizaynı doğru yapılmalıdır.
5. Kontrollü atmosfer dökümleri sonrası yapılan kimyasal kompozisyon analizleri, hurdanın kimyasal kompozisyon açısından korunduğunu göstermiştir. Gaz türbin santralleri ve uçak motor bakım merkezlerinden çıkan süperalaşım hurdalarının doğru ergitme yöntemi ile tekrar değerlendirilebileceği görülmüştür. İkinci bir hammadde sağlama özelliği sayesinde hammadde üretim maliyetlerinin düşmesine sebep olabilecektir.

KAYNAKLAR

Belk, J.A., (1983), Vacuum Techniques in Metallurgy, Pergamon Press, New York.

Brooks C.R., (1992), Adepted from heat treatment, Structure and properties of Nonferrous Alloys, American Society for Metals .

Aerospace Material Specification, (1989), SAE Publication.

Babu, S.S., Miller, M.K., Vitek, J.M. ve David, S.A., (2001), Characterization Of The Microstructure Evolution In A Nickel Base Superalloy During Continuous Cooling Conditions, Metals and Ceramics Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, USA Acta mater. 49, 4149–4160.

Betteridge, W., (1974), The Nimonic Alloys, and Other Nickel-Base High-Temperature Alloys, New York.

Booth-Morrison C., Noebe R. D. ve Seidman D.N., (2008), Superalloys 2008, TMS, Illinois.

Bradley, E.F.. (1979), Source Book on Materials for Elevated-Temperature Applications, American Society for Metals, Metals Park, OH. 29.

Bradley, E.F., (1989) Superalloys, ASM International Metals Park, OH 44073.

Choudhury, I.A. ve El-Baradie, M.A. (1998), , “Machinability of nickel-base super alloys: a general review”, Journal of Materials Processing Technology 77 . 278–284.

Collier, J.P. (1986), “The Effects of Replacing the Refractory Elements W, Nb, and Ta with Mo in Nickel-Base Superalloys on Microstructural, Microchemistry, and Mechanical Properties”, Met and Mat Trans A 17(4):651-661.

Dye, D., Hunziker, O., Roberts ve S.M., Reed, R.C. (1987), “Modelling of the Mechanical Effects Induced by the Tungsten Inert Gas Welding of IN718 Superalloy.” Met. Trans., 32A, pp. 1713-1723.

Forde, P.T., (1996), “Tantalum in Superalloys”, Adv. Mater. Processes, 149(4):39-40.

Hagel, W.C., Wiley, J., (1972), The Superalloys. New York.

Hammond, C.M.ve Flinn, R.A., (1956), The Effect of Melting and Casting Atmospheres on the Stress-Rupture Properties of Cast Nickel-Base Alloys, The University of Michigan

Hebeisen, M.C., Wagner, H.J. ve Nelson, S.G. (1971), Vacuum Melting and Casting of Superalloys, NASA, Washinton DC

Henderson^a, M.B., Arrell^b, D., Heobel^d, M., Larsson, R.ve Marchant^c, G., “Nickel-Based Superalloy Welding Practices for Industrial Gas Turbine Applications”. ^aALSTOM Power Technology Centre, Whetstone, UK, ^bALSTOM Power Sweden AB, Finspang, Sweden, ^cALSTOM Power (UK) Ltd., Lincoln, UK, ^dALSTOM Power Technology Centre, Daettwil, CH.

Huang, X., Chaturvedi, M.C. ve Richards, N.L. (1996), "Effect of Homogenisation heat treatment on the Microstructure and Heat Affected Zone Microfissuring in Welded Cast Alloy IN718." *Met., Trans., A*, 27A, pp.785-790.

Jena, A.K.ve Chaturvedi, M.C. (1984), "The Role of Alloying Elements in the design of Nickel-Base Superalloys", *J. Mater. Sci.*, 19, 10:3121-3129

Dunker R. (1993), *European Commission Aeronautics Research Series*, John Wiley & Sons, USA Pg.41.

Lula, R.A. (1986), *Stainless Steel*, American Society for Metals.

Loria, E.A. (1992), Recent Development in The Progress of Superalloy 718, *JOM* 44 (6), 33–36.

Mattingly, J.D. (1996), *Elements of Gas Turbine Propulsion*, Mcgrawhill Co.

VerSnyder, F.L. (1967), "Directional Solidification in the Precision Casting of Vacuum-Melted Superalloys", *Transactions of the Vacuum Metallurgy Conference* 68-84

Shannon, J.L. (2001), *Nickel Base Alloys*, *Aerospace Structural Metals Handbook*, Purdue Research, Indiana

Sims, C.T, Hagel, W.C. (1986), *Superalloys II*, Wiley, New York

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	22.03.1983	
Doğum Yeri	Paris/Fransa	
Lise	1998-2001	İstanbul Köy Hizmetleri Anadolu Lisesi
Lisans	2001-2007	Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fak., Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurum

2007-Devam ediyor	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi
-------------------	-----------------------------------