

## 1 modul 2. lecke: Nikkel alapú szuperötvözetek

---

**A lecke célja:** a nikkell alapú szuperötvözetek példáján keresztül megismerjük általában a szuperötvözetek viselkedését és alkalmazásait. A kristályszerkezet és a fő ötvözési célok után a különböző ötvözőkkel alkotott fázisokat, a fázisátalakulásokat, valamint a hőkezelést követjük végig.

**Követelmények: Ön akkor sajátította el a tananyagot, ha képes;**

- meghatározni jellemzői alapján a nikkell és ötvözetek szerkezetét, felsorolni tulajdonságait,
- megkülönböztetni a kristályszerkezeteket és a különböző ötvözetfázisokat (szövetszerkezeteket)
- meghatározni a hőkezelési célokat és módokat, a megismert fázisátalakulásokat jellemezni,
- példák alapján meghatározni/bemutatni az alapvető ötvözők és ötvözési célok szerepét,
- alkalmazni a rendkívüli módszereket szilárdságnövelés, kúszásállás növelésére, ötvözésre, tisztításra

**Időszükséglet:** előadás időtartama 1,5 óra. Otthoni, egyéni tanulásban kb. +2 óra az elsajátítás ideje.

**Kulcsfogalmak:**

- kristályszerkezet
- fázisátalakulás
- $\gamma$ -fázis,  $\gamma'$ -fázis
- különleges ötvözők
- szuperötvözetek
- szuperötvözetek repülőgépipari alkalmazásai
- hőkezelés

**Tartalom:**

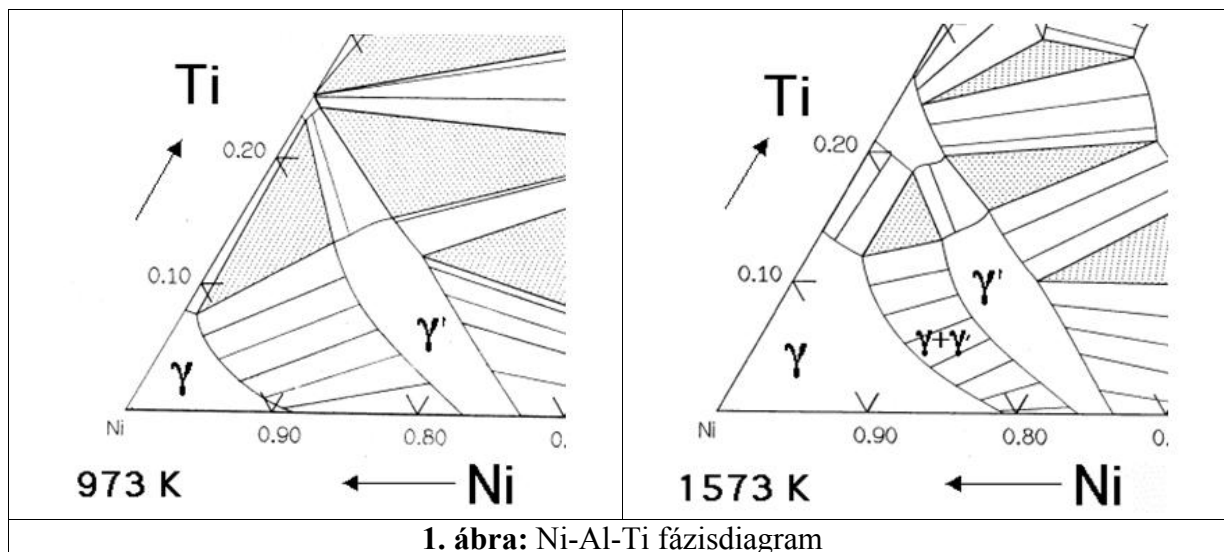
**Tevékenység:** Az alábbi részfejezetek (1-2) tanulmányozása során, jegyezze meg, hogy mi jellemzi a szuperötvözeteket, a nikkell és ötvözetek szerkezetét, és jellemzőik alapján tegyen különbséget a szövetszerkezetek között.

### 1. Szuperötvözetek

A szuperötvözetek olyan fémötvözetek, amelyeket magas hőmérsékleten (gyakran az olvadáspont 70%-a környékén) használnak. A nagy szilárdság, a kúszással és az oxidációval szemben való ellenállás az elsődleges kritérium, amit ki kell elégíteniük. Vas, kobalt és nikkell alapú szuperötvözetekkel lehet találkozni, az utóbbi az, amely a repülőgép motorokban a legsikeresebben alkalmazott anyag.

### 2. A nikkell fő ötvözői

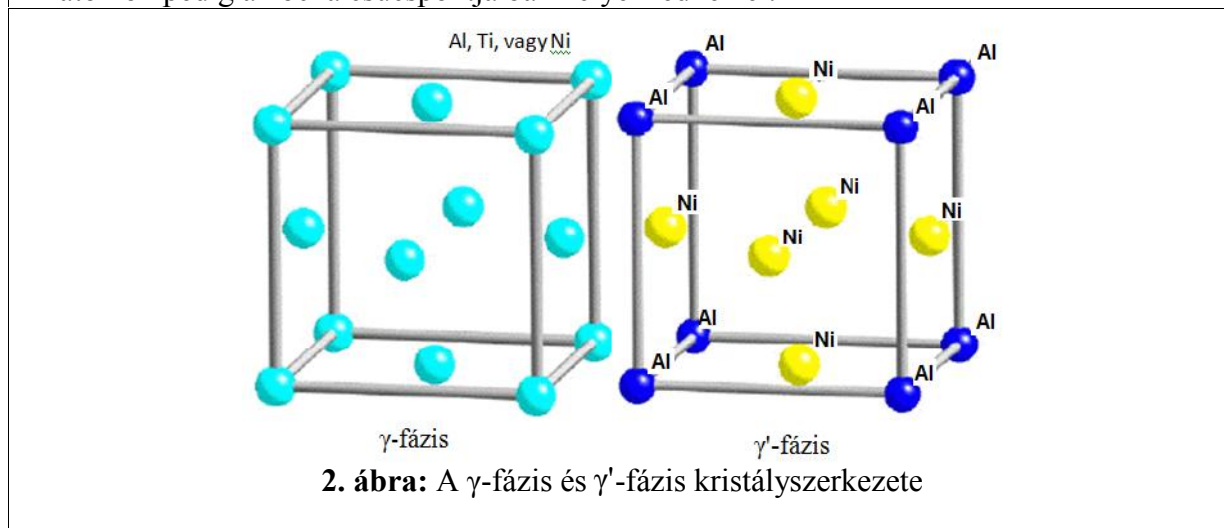
A nikkell alapú szuperötvözetek legfontosabb ötvözői az alumínium és/vagy a titán. Az ötvöző arány 10%-nál kisebb. A mikroszerkezetük két fázist tartalmaz: a gamma ( $\gamma$ ) és az ún. gamma-prime ( $\gamma'$ ) fázisokat. A  $\gamma'$ -fázisnak lényeges szerepe van a magas hőmérsékleten való nagy szilárdság és a kúszásállóság kialakulásában. A  $\gamma'$ -fázis mennyisége függ a kémiai összetételtől és a hőmérséklettől, ahogyan a háromalkotós fázisdiagramokon látszik, 1. ábra.



Egy adott kémiai összetétel esetében a  $\gamma'$ -fázis aránya csökken a hőmérséklet növelésével. Ez az alapja a nikkell szuperötvözetek hőkezelésének. Ez általában úgy történik, hogy először megfelelően magas hőmérsékletre hevítik az ötvözetet, ahol a  $\gamma'$ -fázis már nem stabil, aztán alacsonyabb hőmérsékleten tartják, ahol egyenes eloszlásban, finom szemcseméretű szilárdságnövelő  $\gamma'$ -kiválások alakulnak ki.

A  $\gamma$ -fázis lapközepes köbös kristályszerkezetű fázis, ahol a különböző fajtájú (Ni, Ti, Al) atomok véletlenszerűen oszlanak el a rácspontokban.

A  $\gamma'$ -fázis szintén lapközepes köbös kristályszerkezetű fázis, a  $\gamma$ -fázissal ellentétben azonban itt az atomok elhelyezkedése meghatározott: a lapközepeken Ni atomok vannak, az Al vagy Ti atomok pedig a kocka csúcspontjaiban helyezkednek el.



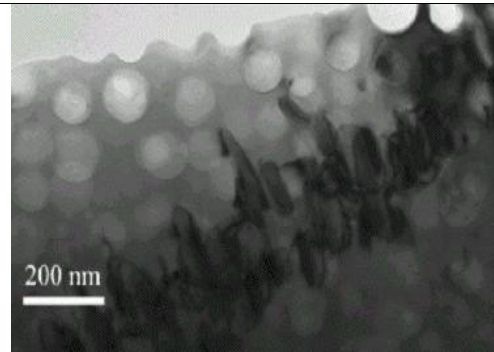
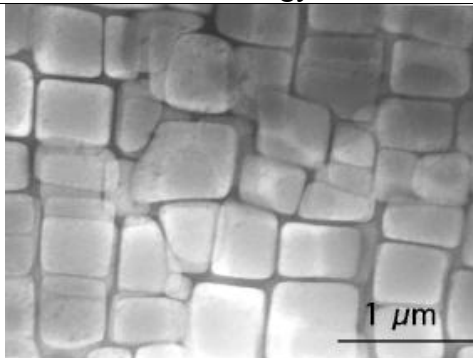
A  $\gamma$ -fázis alkotja a mátrixot, amelyben a  $\gamma'$ -kiválások megjelennek. Mivel mindkét fázisnak azonos, lapközepes köbös kristályszerkezete van, a kristályszerkezetek orientációja kapcsolatban van egymással: a köbös cellák élei párhuzamosak egymással. Továbbá, mivel a rácsparaméterek is közel azonosak, kisméretű kiválások esetében a  $\gamma'$ -fázis összefüggő szerkezetet alkot a  $\gamma$ -fázissal. Az összefüggő szerkezet ellenére a diszlokációk nehezen tudnak

átlépni a  $\gamma$ -fázisból a  $\gamma'$ -fázisba. A  $\gamma'$ -fázisban az atomok elhelyezkedése rendezett, ez a rendezettség gátolja a diszlokációk mozgását, amely növeli az ötvözet szilárdságát.

A  $\gamma$ -fázis és a  $\gamma'$ -fázis rácsszerkezete közötti kicsiny eltérés a következők miatt fontos:

A  $\gamma$ -fázis és a  $\gamma'$ -fázis rácsszerkezete közötti kicsiny eltérés a következők miatt fontos: Mivel a két fázis köbös kristályrácsának az orientációja megegyezik, ezért a fázishatáron a felületi energia alacsony. A kiválások növekedését a felületi energiának a minimumra való törekvése határozza meg. A  $\gamma$ -fázis és a  $\gamma'$ -fázis összefüggő, vagy közel összefüggő szerkezete ezért nagyon stabil, és ez a tulajdonság magas hőmérsékleten is megmarad. A  $\gamma$ -fázis és a  $\gamma'$ -fázis rácsszerkezete közötti kicsiny eltérés befolyásolja a szerkezet viselkedését magas hőmérsékleten való terhelések hatása alatt. Az eltérés iránya és mértéke befolyásolható az alumínium és a titán tömegarányának változtatásával. Az eltérést pozitívnak tekintjük, ha az  $\gamma'$ -fázis rácsparamétere nagyobb, mint a  $\gamma$ -fázisé.

A 3. ábrán transzmissziós elektronmikroszkóppal készített mikroszerkezeti felvételek láthatóak. A bal oldali képen mutatott ötvözetekben a  $\gamma'$ -fázis aránya nagyobb, mint 0,6. Ez a szokatlanul nagy arány a repülőgépek turbinalapátjainak anyagánál fordul elő, ahol 1000°C-nál magasabb a működési hőmérséklet. A kisebb  $\gamma'$ -fázis arány (kb. 0,2, jobb oldali kép) megválasztása ott szokásos, ahol alacsonyabb a működési hőmérséklet (750°C), és ahol hegesztést alkalmaznak a gyártás során.



**3. ábra:** Transzmissziós elektronmikroszkóppal készített mikroszerkezeti felvételek.

<p><math>\gamma'</math>-szemcsék sokasága <math>\gamma</math>-mátrixban: Ni-9.7Al-1.7Ti-17.1Cr-6.3Co-2.3W atom%. Hillier, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, 1984</p>	<p>A <math>\gamma</math>-mátrixban elhelyezkedő <math>\gamma'</math>-szemcsék aránya kisebb: Ni-20Cr-2.3Al-2.1Ti-5Fe-0.07C-0.005 B wt%. A bal alsó saroktól átlósan jobbra felfelé haladó szemcsehatáron elhelyezkedő <math>M_{23}C_6</math> karbid szemcsék is megfigyelhetők.</p>
---	---

### 3. Nagy szilárdság magas hőmérsékleten

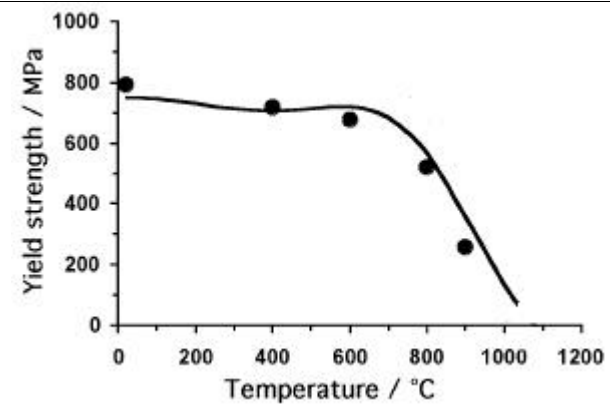
**Tevékenység:** Tanulmányozza a hőkezelési célokat és módokat, tudja jellemezni a megismert fázisátalakulásokat.

A legtöbb fémötvözet szilárdsága csökken a hőmérséklet növekedésével, egyszerűen azért, mert magasabb hőmérsékleten a diszlokációknak könnyebb áthaladni az akadályokon. A nikkal alapú szuperötvözetek, mivel tartalmaznak  $Ni_3(Al,Ti)$  összetételű  $\gamma'$ -fázist, rendkívül nagy szilárdságú anyagok magas hőmérsékleten is.

A diszlokációk a legsűrűbb illeszkedésű  $\{111\}$ -síkon jelennek meg a  $\gamma$ -fázisban és a  $\gamma'$ -fázisban is. Ha a diszlokációk (és a csúszásuk) minden hőmérsékleten ezekben a síkokban

jelennének meg, akkor a szilárdság csökkenne a hőmérséklet növekedésével. A  $\gamma'$ -fázisban azonban a diszlokációk képesek az  $\{100\}$  síkokon is elmozdulni, mivel ezekben a síkokban a hőmérséklet növekedésével csökken a fázishatár energia. Azok a diszlokációk, amelyek részben a sűrű illeszkedésű síkon (az  $\{111\}$ -síkon), részben pedig a kocka oldallapján (az  $\{100\}$ -síkon) haladnának keresztül, blokkolódnak a szerkezetben, és ez a jelenség az, amely a szilárdság növekedéséhez vezet. A szilárdság csak  $600^\circ\text{C}$  körül kezd csökkenni, ahol a hőmérséklet növekedésének a diszlokációk mozgására való serkentő hatása miatt a blokkolt diszlokációk is le tudják győzni az akadályokat.

A nikkeltartalmú szuperötvözetek magas hőmérsékleten is megmaradó nagy szilárdságának az oka tehát a  $\gamma'$ -fázis jelenléte.



4. ábra 20%  $\gamma'$ -fázis tartalmú szuperötvözet rugalmassági határa

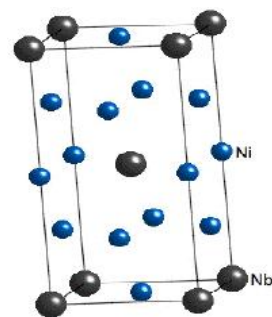
A diagramon (4.ábra) a pontok mért adatokat jelölnek, a görbe a pontok alapján becsült lefutás.

Kb.  $600^\circ\text{C}$ -ig figyelhető meg a hőmérséklettől való függetlenség.

Ha különösen nagy a szilárdsági igény alacsonyabb hőmérsékleten is (pl. turbinalemez), az ötvözetet tovább erősítik az ún.  $\gamma''$ -fázissal. Ez a fázis nióbbiummal vagy vanádiummal való ötvözés esetén keletkezik,  $\text{Ni}_3\text{Nb}$  vagy  $\text{Ni}_3\text{V}$  összetételnél. A lemezeket alkotó  $\gamma''$ -fázis tetragonális cellái a  $\gamma$ -fázis köbös celláival azonos orientációban helyezkednek el, úgy, hogy a cellák élei párhuzamosak.

A  $\gamma''$ -fázis kristályszerkezete hasonlít a térközepes tetragonális rácsszerkezethez, amelyen belül a nikkelt és a nióbbium atomok rendezetten helyezkednek el az 5. ábrán látható szabályosság szerint.

Az erősítő hatás a  $\gamma$ -fázis és a  $\gamma''$ -fázis azonos orientációjának és az atomok rendezett elhelyezkedésének köszönhető.



5. ábra: A  $\gamma''$ -fázis tetragonális kristályszerkezete, rácspárhuzamosak  $a=0.362$  nm and  $c=0.741$  nm

#### 4. Egyéb ötvözök

**Tevékenység:** a példák alapján tudja meghatározni az alapvető ötvözök és ötvözési célok szerepét.

A kereskedelmi forgalomban megtalálható nikkell szuperötvözetek az alumíniumon és a titánon kívül tartalmaznak más ötvözőket is. A króm és az alumínium az ötvözet oxidációs ellenállását javítja. Kis mennyiségű ittrium segít abban, hogy a felületi védő oxidréteg és a belső térfogat között koherens átmenet alakuljon ki. A polikristályos szuperötvözetek a szemcsehatárokon további erősítő elemeket tartalmaznak. Az ilyen céllal hozzáadott bór és a cirkónium a szemcsehatárokon szegregálódik, ezáltal tovább csökken a szemcsehatárok felületi energiája, amely tovább javítja a kúszásállóságot.

Szokás még karbidképző ötvözők (C, Cr, Mo, W, Nb, Ta, Ti és Hf) ötvözése is. A karbidok is a szemcsehatárok mentén képeznek kiválásokat, amelyek megátolják a szemcsehatárok elcsúszását.

$\gamma$ - és  $\gamma'$ -szilárd oldatok képzésére az alumíniumon és a titánon kívül alkalmas még a kobalt, vas, króm, nióbium, tantál, molibdén, vanádium, wolfram és alumínium is. Az ötvözők együttes aránya azonban egy adott határértéket nem haladhat, a határértéket meghaladó ötvöző arány esetén káros kiválások képződnek. A káros kiválások közé tartoznak a ridegséget okozó Laves- és szigma-fázisok, amelyek keletkezését feltétlenül el kell kerülni. Nincs egyszerű formulával megfogalmazható szabálya a kritikus koncentrációk meghatározásának, a mért és számított fázisdiagramok elemzése ajánlatos az ötvözések tervezésénél.

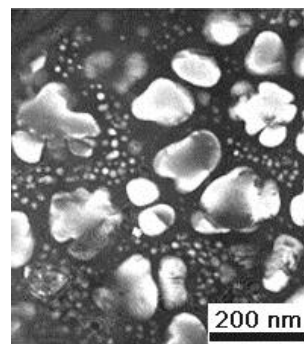
A szuperötvözet egykristályoknak első, második és harmadik generációját különíti el a szakirodalom. A második és a harmadik generáció kb. 3 wt% (tömegszázalék) és 6wt% réniumot tartalmaz. A rénium nagyon drága ötvöző, azonban a kúszásállóságnak a lényeges javítását lehet vele elérni. Bebizonyították, hogy a rénium a  $\gamma$ -fázisba épül be, és a  $\gamma$ -fázis és  $\gamma'$ -fázis rácsszerkezete között korábban említett eltérést lényegesen eltolja negatív irányba. Azt is sikerült igazolni, hogy a rénium általában gátolja a diffúziót a nikkell bázisú szuperötvözetek szerkezetében.

## 5. Mikroszerkezet és hőkezelés

Optimális tulajdonságok kialakítása céljából a nikkell szuperötvözeteket az öntészeti úton való előállítás után két különböző hőmérsékleten hőkezelik. A magasabb hőmérsékleten való hőkezelés során durvább  $\gamma'$ -fázis kiválások alakulnak ki.

Az ezután alkalmazott alacsonyabb hőmérsékleten való hőkezelés során további  $\gamma'$ -kiválások keletkeznek, ezeknek a másodlagos kiválásoknak a mérete, eloszlása finomabb lesz.

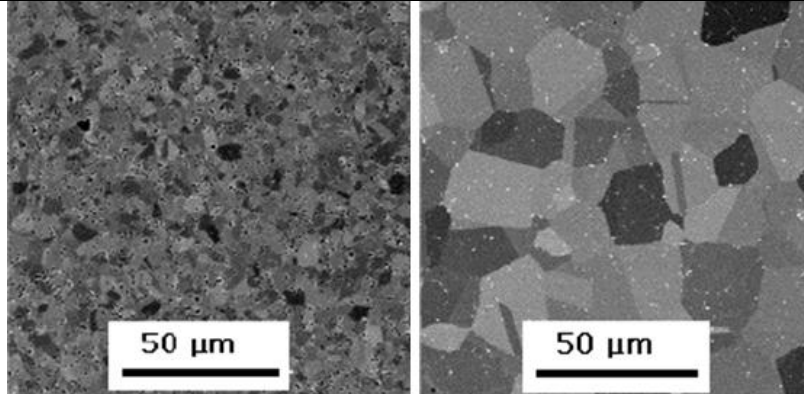
Az eredmény a kétféle  $\gamma'$ -kiválások 6. ábra szerinti eloszlása.



6. ábra: Hőkezelt nikkell szuperötvözet mikroszerkezete

A hőkezelés hőmérséklete nemcsak a  $\gamma'$ -fázis, hanem a  $\gamma$ -fázis szemcséinek a méretét is meghatározza. A szemcseméretük nagyobbak lesznek, ha a hevítés és hűtést során a  $\gamma'$ -fázis teljes mennyisége oldódik.

A 7. ábra baloldali része olyan mikroszerkezetet mutat, ahol a hőkezelés megkezdésekor a  $\gamma'$ -fázis szemcséi még nem oldódtak fel teljesen. A jobb oldali kép magasabb hőmérsékleten hőkezelt szuperötvözet szerkezetet mutat, ahol a hőkezelés megkezdésekor a teljes  $\gamma'$ -fázis mennyiség oldott.

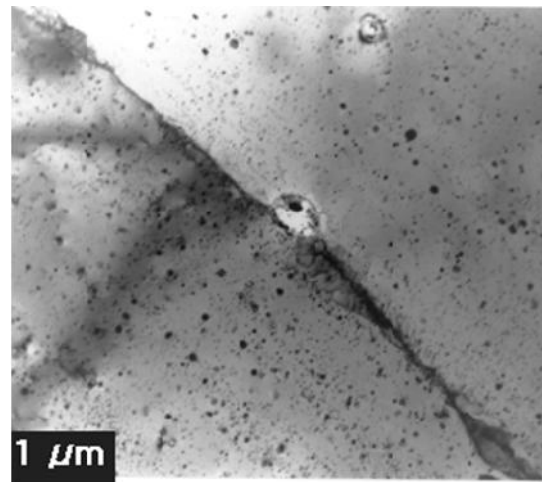


**7. ábra:** Alacsonyabb és magasabb hőmérsékleten hőkezelt nikkell szuperötvözetek mikroszerkezete

## 6. Oxidok eloszlása az erősített szuperötvözetekben

A magas hőmérsékleten is nagy szilárdsággal rendelkező anyagok egyik fontos példáját tárgyaljuk ebben a pontban. Az oxidok diszperziójával erősített szuperötvözeteket fémporokból és ittriumoxid porokból kiindulva mechanikai ötvözéssel állítják elő. Ennek során az ittrium nagyon finom eloszlásban jelenik meg a végtermék szerkezetében. A mechanikai ötvözés azonban nagyon nehezen kivitelezhető, ezért ezeket az ötvözeteket csak nagyon indokolt esetben alkalmazzák.

A 8. ábrán transzmissziós elektronmikroszkóppal készített felvételen láthatjuk az oxidok eloszlását a mechanikai ötvözéssel előállított szuperötvözet szerkezetében.



**8. ábra:** ODS MA6000 szuperötvözet mikroszerkezete

## 7. Nikkel szuperötvözetek alkalmazásai

### Turbinalapátok


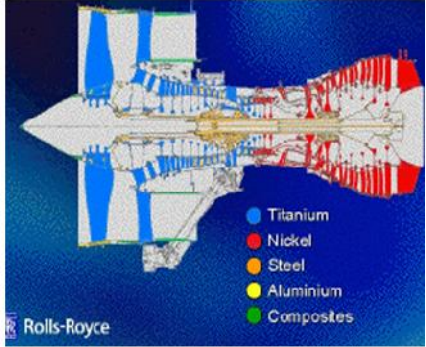
A nikkell szuperötvözetek egyik legfontosabb felhasználási területe a repülőgépek turbinalapátjainak a gyártásánál adódik. Az egykristályok esetében a  $\gamma$ -fázis szemcsehatárok hiányoznak a térfogatóból, ezért a kúszásállóság nagyon erős. A meghatározott



kristályorientáció szerint irányított dermedési folyamat során oszlopszerűen kialakuló szemcseszerkezetben már több szemcse van, azonban az oszlopszerű szemcsék határai többnyire párhuzamosak a fő terhelés irányával. Az ilyen szerkezetű lapátok nem olyan jók, mint az egykristályból készült lapátok, azonban sokkal jobbak, mint az anizotróp módon véghezvitt dermedési folyamat során előállított szerkezetek.

Az egykristályoknak a hagyományos polikristályos ötvözetekkel szemben nagy előnye, hogy hiányoznak a szemcsehatárokat erősítő szilárd oldat kiválások is. Emiatt az olvadáspont magasabb, és a hőkezelés is magasabb hőmérsékleten végezhető. Végül ez az oka annak, hogy az egykristály szuperötvözeteket magasabb hőmérsékleten lehet alkalmazni, mint a polikristályos szuperötvözeteket.

A nikkal szuperötvözetből készített lapátok megtalálhatók a repülőgép motorokban és a gázturbinákban, azokban az egységekben, ahol a hőmérséklet meghaladja a  $400^{\circ}\text{C}$ -ot. Az ennél alacsonyabb hőmérsékleten működő részekben titán ötvözetből készült lapátokat használnak. A titán ötvözetek ugyanis  $400^{\circ}\text{C}$ -nál magasabb hőmérsékleten bizonyos körülmények között gyulladásra hajlamosak.

			
a)	b)	c)	d)
Egykristályból készült turbinalapát	Irányított dermedési folyamattal előállított polikristályból készült turbinalapát	Anizotróp dermedési folyamattal előállított polikristályból készült turbinalapát	Rolls-Royce motorban található ötvözetek, piros színnel látjuk a nikkal szuperötvözetet
<b>9. ábra:</b> Nikkel szuperötvözetek alkalmazása			

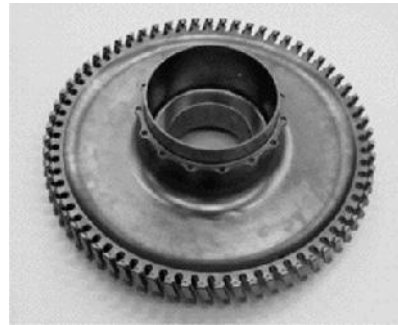
### Turbinatárcsák

A turbinalapátokat a turbinatárcsához erősítik, amely a turbina tengelye körül forog. A turbinatárcsa tulajdonságai különböznek a turbina többi részétől, mivel a környezetében

alacsonyabb a hőmérséklet. A tárcsának a fáradásos töréssel szemben kell ellenállónak lennie. A turbinatárcsát általában öntést követő kovácsolással állítják elő polikristályos ötvözetből.

Az egyik nehézség az, hogy az öntés után az ötvözet szerkezete oszlopszerű szemcsékből áll, amelyek meglehetősen sok szennyező kiválást tartalmaznak, és ezek nem távolíthatók el tökéletesen a termékből. Ez a mechanikai tulajdonságok szóródásával jár.

Az egyik lehetőség ennek elkerülésére az, hogy finomszemcsés, tiszta porokból kiindulva, nagy nyomás alatt történő préseléssel, sajtolással, azután kovácsolással gyártják a tárcsát. A folyamatot az alapanyagként használt tiszta poroknak a körülményes és költséges előállítása nehezíti meg.



**10. ábra:** Porkohászati úton előállított turbinatárcsa

### Turbófeltöltők

A belsőégésű motorok általában a levegő és a benzin adott arányú keverékével működnek. A turbófeltöltő olyan eszköz, amely több levegőt présel a motorba, ezáltal minden ütemben nagyobb mennyiségű üzemanyag elégetése válik lehetővé, és következésképpen fokozza a motor teljesítményét. A turbófeltöltő két részből áll. Az egyik egy turbina, amelyet a motor kipufogógázával működtetnek. A turbina forgásának a segítségével pumpálják be a többletlevegőt a motorba. A turbina fordulatszáma percenként 100-150 ezer. Mivel a turbófeltöltőt kipufogógázzal működtetik, korróziós közegekben is, ezért magas hőmérsékleten is nagy szilárdsággal kell rendelkeznie és az oxidációnak ellen kell állnia.



**11. ábra:** Nikkel szuperötvözetből készített turbófeltöltő. Az anyag: Inconel 713C, összetétele: Ni-2Nb-12.5Cr-4.2Mo-0.8Ti-6.1Al-0.12C-0.012B-0.1Zr

### Az átolvasztás folyamata

A szuperötvözetek alumínium és titán tartalma kémiai reakciókra hajlamosak (elsősorban oxigénnel). Ezért az átolvasztást vákuum alatt végzik, amelynek az az előnye, hogy a kis mennyiségű káros elemek párolgás útján is eltávozhatnak. Általában vákuum alatti indukciós olvasztást alkalmaznak, mivel ez elősegíti a homogenizációt, és az erőltetett olvadáskáramlás miatt a gázok és szennyeződések optimálisan eltávolíthatók.



A vákuumos olvasztást sok fajta ötvözet tisztításánál alkalmazzák. Az elrendezés vázlatja a 12. ábrán látható. Az átolvasztandó anyag maga az elektróda (a), amelyet ívkisüléssel hevítenek. Az elektróda végén megolvadó cseppecskék átszivárognak a vákuumon, miközben a vákuumos tisztító hatás érvényesül. Az olvadt fémot vízzel hűtött tartályban gyűjtik. Az olvadékban (b) a szilárd szennyeződések ülepedésével további tisztító hatások érhetők el. A tervezett szövetszerkezetű fém alul szilárdul meg (c).



**12. ábra:** Vákuumos átolvasztás elvi rajza.

A másik átolvasztó eljárásnak, az elektrosalakos tisztításnak a folyamata a vákuumos átolvasztáshoz hasonló. Az a különbség, hogy a fémolvadék egy 10 cm vastag salakréteggel van befedve. A salakréteg anyaga mész, timföld, vagy fluorit (folypát). Ismét az átolvasztandó anyag az elektróda, amely érintkezik a salakkal. A salaknak nagy az elektromos ellenállása, ezért megolvad, és a hőmérséklet meghaladja a fém elektróda olvadáspontját. Az elektróda csúcsa megolvad, a megolvadt cseppek átszivárognak a salakon, miközben érvényesül a tisztító hatás, végül a berendezés alján gyűlik össze a fémolvadék.

A szuperötvözetek esetében általában kétszer vagy többször is elvégzik az átolvasztásos tisztítás műveletét.

### Turbinalapátok öntése

A nikkal alapú szuperötvözetből készült turbinalapátokat precíziós öntéssel állítják elő. Az öntőszerszám elkészítésének a folyamata összetett, a lapátok bonyolult alakja, a hűtőcsatornák és más szerszámelemek kialakítása miatt.

### Irodalom:

1. H. K. D. H. Bhadeshia: Nickel based superalloys, MSc egyetemi jegyzet, Cambridge University, 2003,  
<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/Superalloys/superalloys.html>
2. Tapany Udomphol: Nickel and its alloys, MSc egyetemi jegyzet, Suranaree University of Technology Thailand, 2007,  
[http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/Nonferrous/06\\_Nickel%20and%20its%20alloys.pdf](http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/Nonferrous/06_Nickel%20and%20its%20alloys.pdf)

### Kérdések:

1. Jelölje meg a következő válaszok közül, melyek a szuperötvözetekkel szemben elvárt legfontosabb tulajdonságok!
  - a) Magas hőmérsékleten ellenáll az oxidációnak (x),
  - b) Nagy szilárdság magas hőmérsékleten (x),
  - c) különleges hővezető képesség
  - d) magas hőmérsékleten is nagy keménység
  - e) magas hőmérsékleten is jó kúszásállóság (x)

- f) sósavval szemben való kémiai ellenállás
2. Mi a különbség a  $\gamma$  és a  $\gamma'$  fázis kristályszerkezete között?
- a kristályszerkezet maga
  - a lapközepes köbös elemi cella mérete (x)
  - véletlenszerű és rendezett elrendeződése az atomoknak a cellán belül (x)
  - a sűrűn pakolt síkok orientációja különböző
3. Mivel befolyásolható a  $\gamma$  és a  $\gamma'$  fázis kristályszerkezete között kicsiny eltérés?
- kis mennyiségű nióbbium hozzáadásával
  - kis mennyiségű vanádium hozzáadásával
  - hőkezeléssel
  - az alumínium és a titán tömegarányának változtatásával (x)
4. Milyen alkalmazásnál jellemző a nagy  $\gamma'$  fázis arány?
- repülőgép motorok
  - ahol hegesztést alkalmaznak a gyártás során
  - repülőgép turbinalapátok 1000°C-nál magasabb a működési hőmérsékletén (x)
  - vegyipari alkalmazások
5. Mi az oka annak, hogy magas hőmérsékleten is nagy szilárdsággal rendelkeznek a nikkal alapú szuperötvözetek?
- a  $\gamma$  és a  $\gamma'$  fázis határán blokkolódó diszlokációk
  - a diszlokációk, amelyek részben a sűrű illeszkedésű síkon, részben pedig a kocka oldallapján haladnának keresztül, blokkolódnak a szerkezetben (x)
  - a  $\gamma$  és a  $\gamma'$  fázis azonos kristályorientációja és eltérő cellamérete
  - a kémiai összetételen belül a Ti és Al különleges aránya
6. Milyen eljárást alkalmaznak, amikor különösen nagy szilárdság van előírva alacsonyabb hőmérsékleten?
- tetragonális  $\gamma''$ -fázist hoznak létre, Nb, V ötvözéssel (x)
  - tetragonális  $\gamma''$ -fázist hoznak létre, C, Cr ötvözéssel
  - tetragonális  $\gamma''$ -fázist hoznak létre, Fe, V ötvözéssel
  - $\gamma'$  fázis arányát növelik
7. Mivel lehet különösen hatékonyan javítani a kúszásállóságot?
- különleges hőkezeléssel
  - nagyon drága rénum ötvözésével (x)
  - nagyon drága ittrium ötvözésével
  - nagyon drága ittrium ötvözésével és különleges hőkezeléssel
8. Hőkezelés során mivel szabályozzák az újrakristályosodó  $\gamma'$  fázis szemcséinek méretét?
- ötvözéssel
  - hevítési és hűtési idő helyes megválasztásával
  - hevítési és hűtési hőmérséklet helyes megválasztásával
  - a hevítés és hűtés során a  $\gamma'$ -fázis adott mennyiségének a felolvadásával (x)
9. Milyen módon oldják meg a magas hőmérsékleten szilárdságnövelő ittriumoxid ötvözését?
- öntés után hőkezeléssel

- b) precíziós öntéssel és hőkezeléssel
- c) nanotechnológiai módszerekkel
- d) fémporokból és ittriumoxid porokból kiindulva mechanikai ötvözéssel (x)

10. Milyen eljárással tisztítják a nikkelt alapú szuperötvözetek szerkezetét?

- a) zónás tisztítással és elektrosalakos tisztítással
- b) vákuumos olvasztással és elektrosalakos tisztítással (x)
- c) zónás tisztítással és vákuumos átolvasztással
- d) vákuumos olvasztással, zónás tisztítással és elektrosalakos tisztítással