

# PATENTOVÝ SPIS

(19)  
ČESKÁ  
REPUBLIKA



ÚŘAD  
PRŮMYSLOVÉHO  
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: 1993 - 1304  
(22) Přihlášeno: 29.06.1993  
(30) Právo přednosti:  
29.06.1992 US 1992/905462  
(40) Zveřejněno: 14.11.2001  
(Věstník č. 11/2001)  
(47) Uděleno: 11.09.2002  
(24) Oznámeno udělení ve Věstníku: 13.11.2002  
(Věstník č. 11/2002)

(11) Číslo dokumentu:

**290 913**

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl. <sup>7</sup>:

C 22 C 19/05  
C 30 B 11/00  
C 30 B 29/52

(73) Majitel patentu:  
Cannon-Muskegon Corporation, Muskegon, MI, US;

(72) Původce vynálezu:  
Erickson Gary L. ing., Muskegon, MI, US;

(74) Zástupce:  
PATENTSERVIS PRAHA, Jívenská 1/1273, Praha 4,  
14021;

(54) Název vynálezu:  
**Monokrystalická vysoce legovaná slitina na  
niklové bázi**

(57) Anotace:  
Vysoce legovaná slitina na bázi niklu obsahuje v %  
hmotnostních: 5,0 až 7,0 % rhenia; 1,8 až 4,0 % chromu; 1,5  
až 9,0 % kobaltu; 7,0 až 10,0 % tantalu; 3,5 až 7,5 %  
wolframu; 5,0 až 7,0 % hliníku; 0,1 až 1,2 % titanu; 0,25 až  
2,0 % molybdenu, až 0,5 % niobu; 0,15 % hafnia, zbytek nikl  
a obvyklé doprovodné nečistoty, přičemž slitina vykazuje  
fázové stabilizační číslo N<sub>V3B</sub> menší než 2,10.

**Monokrystalická vysoce legovaná slitina na niklové bázi****Oblast techniky**

5

Vynález se vztahuje k monokrystalickým vysoce legovaným slitinám na niklové bázi, přesněji s těmito slitinami a s nich vyráběných součástkami do motorů zdokonalených plynových turbin pracujících v podmírkách vysokého tlaku a teploty.

10

Pokroky minutých let dosažené v teplotním a tlakové odolnosti kovů monokrystalických součástech jsou výsledkem pokračujícího vývoje monokrystalických vysoce legovaných slitin. Dále jsou výsledkem zdokonalení použitých postupů a použití strojních technologií. Mezi součástky z těchto slitin patří listy a lopatky stacionárních turbin, které se nacházejí v horkých úsecích motorů plynových turbin. Avšak trendy návrhů motorů plynových turbin byly v uplynulých desetiletích stále stejné. Tyto cíle v sobě zahrnují snahu po zvýšení pracovní teploty motoru, rotační rychlosti poměrného tahu, výhřevnosti paliva a po trvanlivosti a spolehlivosti součástek motorů.

15

20

**Dosavadní stav techniky**

25

Základní technologie slitin pro odlévání monokrystalických komponentů byla popsána v amerických patentech US 3 494 709; US 4 116 723; a US 4 209 348. Z vývoje vzešla první generace vysoce legovaných slitin na niklové bázi, které byly materiálově lepší než slitiny ve výše zmínovaných patentech. První generace niklových vysoce legovaných slitin však neobsahovala rhenium. Příklady takových slitin jsou známé pod obchodními značkami jako slitiny CMSX-2 a CMSX-3 vyráběné korporací Cannon-Muskegon. Znaky současného použití jsou popsány v americkém patentu US 4 582 548.

30

Další vývoj završila druhá generace vysoce legovaných slitin na niklové bázi se zlepšenou pevností při tečení a rychlosti tečení. Tyto slitiny druhé generace mají nízký obsah rhenia ve výše 3 hmotnostních %. Příklad takového slitiny druhé generace je popsán v americkém patentu US 4 643 782. Tento patent popisuje slitinu s obchodním označením CMSX-4, která má specifické složení na niklové bázi s obsahem rhenia v oblasti od 2,8 do 3,2 hmotnostních %. Tento současný vynález představuje další generaci vysoce legovaných slitin na niklové bázi, které mají celkový vyšší obsah žáruvzdorných složek /W + Re + Mo + Ta/ a zlepšené mechanické vlastnosti.

35

40

Vyráběné monokrystalické součástky mají nízko-modulovou /001/ krystalografickou směrovou paralelu k endritickému růstovému vzoru složky nebo k ose dislokace s listovém uspořádání.

45

Středově centrované kubické monokrystaly vysoce legovaných slitin rostoucí ve směru /001/ vykazují extrémně vysokou odolnost proti tepelné únavě ve srovnání s běžně odlévanými součástkami. Protože tyto monokrystalické součástky nemají ohraničení krystalů, je dosažitelný typ slitiny bez upevňovačů krystalických hranic jako jsou uhlík, bór, zirkonium. Protože tyto prvky působí jako snižující faktory teploty tání slitiny, jejich redukce poskytuje větší potenciál pro dosažení pevnosti při vysokých teplotách vzhledem k tomu, že lze dosáhnout kompletnějšího gamma primárního roztoru a mikrostrukturální homogenizace ve vztahu k přímo utuhlému sloupcovitému krystalu a ve vztahu ke konvenčně odlévaným materiálům. Jejich snížení umožňuje vyšší počáteční teplotu tání.

50

55

Tato zdokonalení postupu se samozřejmě neuplatní, pokud není přejat postup podle vzoru multifasetových slitin. Slitiny musí být projektovány tak, aby se vyloučila tendence ke tvoření tavicích defektů jako jsou skvrny, úštěpky, rušivé krystaly a rekrystalizace. Navíc musí slitiny vykazovat příslušné okno při tepelném zpracování /číselný rozdíl mezi homogenizací a původní

teplotou tání/, aby byla umožněna téměř úplná homogenizace slitiny. Současně by kompoziční vyrovnanost slitiny měla být navržena tak, aby vznikl příslušný druh slitiny se strojírenskými vlastnostmi nutnými pro práci motorů plynových turbin. Vybrané vlastnosti techniky obecně považované za důležité u motorů plynových turbin zahrnují: zvýšenou teplotní mez pevnosti při tečení, termomechanickou odolnost proti únavě materiálu, odolnost proti rázům a teplotní korozí a odolnost proti oxidaci.

Projektant slitiny se může pokusit zlepšit jednu nebo dvě z těchto vlastností úpravou kompoziční vyrovnanosti již známých vysoce legovaných slitin. Je však velmi obtížné zlepšit více než jednu nebo dvě z navrhovaných vlastností aniž by nebyly významně či dokonce vážně ovlivněny k horšímu vlastnosti ostatní. Z tohoto vynálezu vzešla unikátní vysoce legovaná slítnina má vynikající užitkové vlastnosti při výrobě monokrystalických součástek určených pro práci motorů plynových turbin v teplotních sekcích.

15

#### Podstata vynálezu

Tento vynález se týká vysoce letované slítniny na niklové bázi obsahující následující prvky ve hmotnostních %: 0,5 až 7,0 % rhenia; 1,8 až 4,0 % chromu; 1,5 až 9,0 % kobaltu; 7,0 až 10,0 % tantalu; 3,5 až 7,5 % wolftamu; 5,0 až 7,0 % hliníku; 0,1 až 1,2 % tatinu; až 0,5 % niobu; 0,25 až 2,0 % molybdenu; až 0,15 % hafnia a zbytek nikl a obvyklé doprovodné nečistoty. Slítnina má fázové stabilizační číslo  $N_{V3B}$  menší než 2,10.

Tato slítnina může dále pro zkvalitnění obsahovat ve hmotnostních %: až 0,04 % hliníku; až 0,01 % bóru; až 0,01 % lanthanu. Ačkoli původní nečistoty by měly být udržovány na nejmenší možné míře, slítnina může obsahovat až 0,04 hmotnostního % mangantu; až 0,005 % křemíku; až 0,01 % zirkonia; až 0,001 % síry a až 0,10 % vanadu. Ve všech případech je základním prvkem nikl. Dále může mít tato zkvalitněná slítnina fázové stabilizační číslo  $N_{V3B}$  menší než 1,85 a obsah chromu 1,8 až 3,0 % hmotn. obsah rhenia 5,5 až 6,5 % hmotn. a obsah kobaltu 2,0 až 5,0 % hmotn.

Tento vynález se týká vysoce legované slítniny se zvýšenou odolností proti tečení při vysokém tlaku a teplotě, zejména do teploty 1080 °C (1975 °F).

Tato slítnina je vhodná pro výrobu monokrystalických součástek. Taková součástka může být součástí motoru turbiny, zejména jako list nebo lopatka.

Složky této slítniny jsou kriticky vyrovnané, čímž vznikl jedinečný druh požadovaných vlastností. Tyto vlastnosti zahrnují: vynikající odlevatelnost monokrystalických součástek, zejména součástí listů a lopatek střední velikosti, vhodnou rozpustnost tavicích komponentů, vynikající odolnost proti rekrytalizaci monokrystalických součástek, velmi vysokou mez pevnosti při tečení až do 1080 °C (1975 °F), velice dobrou mez únavy při nízkých otáčkách, velmi dobrou mez únavy při vysokých otáčkách vysokou rázovou pevnost, vynikající odolnost proti samostatné teplotní korozí, proti samostatné oxidační korozí, vhodnou mikrostrukturální stabilitu jako je odolnost proti nezámrnným křehkým fázím nazývaným topologicky uzavřené paketové fáze.

Je tudíž cílem tohoto vynálezu uvést složení vysoce legované slítniny a z ní vyrobených monokrystalických součástek požadovaných vlastností, tj. součástek pro zdokonalené motory plynových turbin pracujících při vysokém tlaku a teplotě až do 1080 °C (1975 °F). Tyto a ostatní cíle a přednosti uvedeného vynálezu budou jasné odborníkům v tomto oboru po prostudování následujícího popisu zahrnutých zlepšení.

Krátký popis nákresů

5 Diagram 1 je graf výsledků testu teplotní koroze dvou původních slitin a jednoho dílu vynalezené slitiny exponovaných 117 hodin.

Diagram 2 představuje graf výsledků testu teplotní koroze jiného dílu vylepšené slitiny z tohoto vynálezu a původní slitiny exponovaných po dobu 144 hodin.

10 10 Popis zahrnutých vylepšení

Tato vynalezená vysoce legovaná slitina obsahuje následující složky uvedené ve hmotnostních %:

15	rhenium	5,0 až 7,0
	chrom	1,8 až 4,0
	kobalt	1,5 až 9,0
	tantal	7,0 až 10,0
20	wolfram	3,5 až 7,5
	hliník	5,0 až 7,0
	titan	0,1 až 1,2
	molybden	0,25 až 2,0
	niob	až 0,5
25	hafnium	až 0,15
	zbytek nikl a obvykle doprovodné nečistoty.	

Takto složená vysoce legovaná slitina má fázové stabilizační číslo  $N_{V3B}$  menší než 2,10. Dále má slitina přesně vyrovnané chemické složení, ze kterého vznikající ojedinělá sloučenina požadovaných vlastností. Tyto vlastnosti zahrnují vysokou mez pevnosti při tečení ve vztahu k původním vysoce legovaným monokrystalickým slitinám, odlévatelnost monokrystalických součástí, odolnost proti rekrytalizaci, vysokou mez únavy, rázovou odolnost, odolnost proti samotné teplotní korozi, oxidační odolnost a mikrostrukturální stabilitu včetně odolnosti proti TCP fázové formaci při vysokém tlaku a teplotě.

35 Na rozdíl od původních slitin na niklové bázi známých v této oblasti má tento vynález nízký obsah chromu a kobaltu a vysoký obsah rhenia. Chromu je 1,8 až 4,0 hmotnostních %. Prospěšný obsah chromu je 1,8 až 3,0 % hmotnostních. Tento obsah chromu je výrazně nižší než u běžných slitin na niklové bázi. Ve vynalezené slitině zajišťuje odolnost vůči teplotní korozi, ačkoli může hrát současně úlohu v oxidační schopnosti slitiny. Tantal a rhenium ovlivňují také vlastnosti týkající se teplotní koroze, hliník pak je přítomen v dostatečném množství k zajištění příslušné oxidační odolnosti, takže v této slitině je potřebný poměrně nízký obsah chromu. Kromě snížení teploty solitu gamma primární slitiny přispívá chrom také ke tvoření Cr, Re, W – bohaté TCP fáze a musí být tedy v těchto sloučeninách v rovnováze.

45 Obsah kobaltu je 1,5 až 9,0 hmotnostních %. Příznivý obsah kobaltu je 2,0 až 5,0 % hmotnostních. Tento obsah kobaltu je nižší než u původních typických monokrystalických vysoce legovaných sloučenin na niklové bázi. V nové slitině napomáhá kobalt k vytvoření příslušné rozmezí pro tepelné zpracování protože snižuje teplotní solidu gamma primární slitiny a přitom obecně nemá vliv na počáteční teplotu tání. Slitiny obsahující rhenium jsou běžně navrhována s mnohem vyšším obsahem kobaltu než v tomto novém návrhu za účelem získání zvýšené tuhé rozpustnosti a fázové stability.

55 Slitiny vzešlé z tohoto vynálezu neočekávaně ukazují, že je možný a žádoucí mnohem nižší obsah kobaltu, aby byla dosažena optimální fázová stabilita včetně kontroly tvoření TCP fází.

Obsah rhenia je 5,0 až 7,0 hmotnostních % a při zlepšení je jeho obsah 5,5 až 6,5 %. Obsah rhenia je v nové slitině výrazně vyšší než u původních monokrystalických slitin. Dále jsou slitiny z tohoto vynálezu obecně navrhovány se zvýšenou hladinou obsahu těžko tavitelných prvků, například W + Re + Mo + Ta.

5

**Obsah wolframu je 3,5 až 7,5 hmotnostních % a u zlepšené verze je jeho množství 3,5 až 6,5 %.** Wolfram se přidává, protože je to účinným podpůrným prvkem pevného roztoku a přispívá k podpoře gamma primární fáze. Navíc je účinný při zvyšování počáteční teploty tání. Množství wolframu přidávané do těchto slitin je v rovnováze s množstvím rhenia, jelikož oba prvky přispívají ke tvoření „skvrnových“ defektů během zalévání voskového modelu při monokrystalickém odlévacím procesu. Oba prvky také silně ovlivňují náchylnost k tvoření TCP fází.

10

Podobně jako wolfram také rhenium má vliv na zvyšování počáteční teploty slitiny. Rhenium je však silnější posilovač než wolfram, molybden a tantal v podmínkách zvýšené teploty při tečení a proto je rhenium přidáváno zcela vhodně. Rhenium má také v této slitině pozitivní vliv na odolnost proti teplotní korozi. Navíc rhenium prvně působí v základní hmotě a je účinné při zpomalování růstu gamma primárních částic při vysoké teplotě a tlaku. Kromě požadavku vyrovnanosti rhenia a wolframu z důvodu tavitelnosti musí být W + Re uspořádány na úrovni slučitelné s minimalizací TCP fází. Obecně TCP fáze, které se v těchto materiálech objevují, jsou bohaté na chrom, wolfram a rhenium, přičemž rhenium je zde přítomno v nejvyšší míře. Je tedy nezbytná kontrola poměru Re/W v této slitině k ovlivnění náchylnosti tvoření TCP fázových formací.

15

**Obsah molybdenu je 0,25 až 2,0 hmotnostních %.** Ve zlepšené formě je obsah molybdenu 0,25 až 1,5 %. Molybden je dobrý posilovač tuhého roztoku, ale není tak efektivní jako wolfram, rhenium a tantal. Protože však je hustota slitiny vždy věcí úvahy a atom molybdenu je lehčí než ostatní posilovače tuhého roztoku, je přídavek molybdenu dobrým prostředkem ke kontrole celkové hustoty mezi složkami vynalezené slitiny.

25

**Obsah tantalu je 7,0 až 10,0 hmotnostních % a při zlepšení je jeho obsah 8,0 až 10,0 %.** Tantal významně přispívá k sile slitiny prostřednictvím posilování tuhého roztoku a zvyšování gamma primární síly částic /tantal také působí na gamma primární fázi/. V této slitině lze tantal užít v poměrně vysoké koncentraci, protože přispívá k tvoření TCP fáze. Navíc je to velmi žádoucí složka této sloučeniny, protože působí při prevenci tvoření „skvrnových“ defektů během monokrystalického tavicího procesu.

35

Tantal je ve sloučenině prospěšný, protože má také tendenci zvyšovat teplotu solidu gamma primární fázi a je dobrý při oxidaci a vytváření odolnosti proti teplotní korozi a při zvyšování trvanlivosti hliníkového povlaku.

40

**Obsah hliníku je 5,0 až 7,0 hmotnostních %.** V této kompozici je pak obsah 5,3 až 6,5 %. Hliník a titan jsou primárními prvky zahrnujícími gamma primární fázi. Tyto prvky jsou do slitiny přidávány v množství a poměru potřebném k dosažení potřebné odlévatelnosti slitiny, možnosti zacházení s taveninou, fázové stability a mechanické síly. Hliník se také přidává v množství dostatečném k dosažení odolnosti proti oxidaci.

45

**Obsah titanu je 0,1 až 1,2 hmotnostních %.** Při zlepšení je jeho obsah 0,2 až 0,8 %. Titan je obecně prospěšný odolnosti proti teplotní korozi, ale může mít negativní vliv na odolnost proti oxidaci, odlévatelnost slitiny a chování slitiny při zacházení s horkým roztokem. Musí být tedy zachován ve sloučenině ve stanoveném poměru.

50

**Obsah niobu je až 0,5 hmotnostních %,** při zlepšení pak až 0,3 %. niob je gamma primárně působící prvek a je to účinný posilovač monokrystalických slitin z tohoto vynálezu. Obecně však niob působí újmu při oxidaci slitiny a má špatný vliv na teplotně korozní vlastnosti, takže je jeho množství minimalizováno. Navíc se niob přidává do této vynalezené slitiny za účelem getrování

55

uhlíku, který může být chemicky vstřebán do povrchů součástí během procesu práce s horkým roztokem, pokud není optimální vakuové prostředí. Jakýkoli úhlový vmeštek bude mít tendenci k tvorbení karbidu niobu namísto karbidu titanu nebo tantalu a tím i zachování větší části titanu nebo tantalu pro gamma primární fázi a pro posílení tuhého roztoku v této slitině.

5

Obsah hafnia je až 0,15 hmotnostních %, při zlepšení pak 0,02 až 0,05 %. Hafnium se do dané sloučeniny přidává v malém množství, aby působilo na pokovovací přilnavost. Obecně hafnium účinkuje v gamma primární fázi.

10

Rovnováha skladby slitiny z tohoto vynálezu zahrnuje také nikl a malé množství vedlejších nečistot. Obecně tyto vedlejší nečistoty vznikají v procesu průmyslové výroby a měly by být omezeny na nejmenší možnou míru tak, aby neovlivnily vylepšené vlastnosti slitiny. Například tyto nečistoty mohou obsahovat až 0,04 hmotnostních % hořčíku, 0,05 % křemíku, až 0,01 % zirkonia, až 0,001 % síry a až 0,10 % vanadia. Množství těchto nečistot, která přesahují stanovenou mez, by mohla mít nepříznivý vliv na výsledné vlastnosti slitiny.

15

Dále může slitina náhodně obsahovat až 0,04 hmotnostních % uhlíku, až 0,01 % bóru, až 0,01 % ytria, až 0,01 ceru a až 0,01 % lanthanu.

20

Vysoko legovaná slitina z tohoto vynálezu má nejen složení v dané výše uvedené škále, ale její fázové stabilizační číslo  $N_{V3B}$  je menší než 2,10. Při zlepšení je číslo  $N_{V3B}$  menší než 1,85 a ještě lépe menší než 1,75. Odborníci ocení, že  $N_{V3B}$  je definováno PWA N-35 metodou výpočtu TCP fáze řídicího faktoru elektronové vakance slitin na niklové bázi. Tento výpočet následuje, jak je níže uvedeno:

25

Rovnice 1

Převedení hmotnostních % na atomová %:

30

$$\text{Atomové \% prvku } i = P_i = \frac{W_i/A_i}{\sum_i (W_i/A_i)} \times 100$$

kde:  $W_i$  = hmotnostní % prvku  $i$   
 $A_i$  = atomová hmotnost prvku  $i$

35

Rovnice 2

Výpočet množství každého prvku přítomného v průběžné fázi základní hmoty:

Prvek Atomové množství zůstatkového  $R_{ii}$

Cr  $R_{Cr} = 0,97P_{Cr} - 0,375P_B - 1,75P_C$

Ni  $R_{Ni} = P_{Ni} + 0,525P_B - 3(P_{Al} + 0,03P_{Cr} + P_{Ti} - 0,5P_C + 0,5P_V + P_{Ta} + P_{Cb} + P_{Hf})$

Ti, Al, B,

C, Ta, Cb, Hf  $R_i = 0$

45

V  $R_V = 0,5P_V$

W  $* R_{(W)} = P_W - 0,167P_C \frac{P_W}{P_{Mo} + P_W}$

50

Mo  $R_{(Mo)} = P_{(Mo)} - 0,75P_B - 0,167PP_C \frac{P_{Mo}}{(P_{Mo} + P_W)}$

\* Poznámka: hmotnostní % Re jsou přičtena k hmotnostním % W u výše uvedeného výpočtu

## Rovnice 3

Výpočet  $N_{V3B}$  za použití atomových faktorů z rovnic 1 a 2:

$$N_i = \frac{R_i}{\sum R_i} \quad \text{pak } N_{V3B} = \sum_i N_i (N_V)_i$$

kde:  $i$  = každý jednotlivý prvek v pořadí

$N_i$  = atomový faktor každého prvku v základní hmotě

$(N_V)_i$  = číslo elektronové vakance každého příslušného prvku

10

Tento výpočet je detailně popsán a ukázán v technickém článku pod názvem „PHACOMP Revisited“ od H.J. Murphyho, C.T. Simse a A.M. Beltrana, publikovaném ve svazku 1 International Symposium on Structural Stability in Superalloys /1968/, o jehož závěrech je zde též zmínka. Jak mohou zhodnotit odborníci, fázové stabilizační číslo pro slitiny z tohoto vynálezu je rozhodující a musí být menší než stanovené maximum, aby slitina měla stabilní strukturu a požadované vlastnosti při vysoké teplotě a tlaku. Fázové stabilizační číslo lze stanovit empiricky, pokud se odborník v praxi touto věcí zabývá.

20

Motory navrhované pro vysoký výkon normálně pracují s vyšší teplotou součástek a problém tečení narůstá. Obecně tečení v nárustu 1% se v těchto případech považuje za nepřijatelné. Vlastnosti při tečení u známého druhu slitin jsou při omezených pracovních teplotách a tím i při maximální schopnosti výkonu. Vysoko legovaná slitina z tohoto vynálezu má zvýšenou odolnost proti tečení při vysokém tlaku a teplotě, zejména až do 1080 °C (1975 °F).

25

Monokrystalické součástky tvořené sloučeninami z tohoto vynálezu mohou být vyráběny kteroukoli monokrystalickou odlévací technikou známou v tomto oboru. Například lze užít procesy usměrněného tuhnutí monokrystalu, jako je postup zárodečných krystalů nebo proces zanášení. Monokrystalické odlitky vyrobené z vynalezené slitiny jsou vystaveny tepelnému stárnutí při vysokých teplotách, aby byly optimalizovány vlastnosti pevnosti při tečení těchto slitin. Monokrystalické odlitky z takto vynalezené slitiny mohou být vystaveny tepelnému stárnutí při teplotě 1065 °C (1950 °F) až 1177 °C (2125 °F) po dobu 1 až 20 hodin. Avšak odborníci vědí, že optimální vystavení tepelnému stárnutí po určenou dobu závisí na přesném složení vysoko legované slitiny. Tento vynález představuje složení vysoko legované slitiny jedinečné skladby a požadovaných vlastností. Tyto vlastnosti zahrnují: vynikající odlévatelnost monokrystalické součástky, zejména součástek listů a lopatek menších velikostí; vynikající odolnost proti rekristalizaci součástek; výbornou rozpustnost součástek při tavbě; zvláště vysokou mez pevnosti při tečení do 1080 °C (1975 °F); mimorádně dobrou mez únavy při nízkých i při vysokých otáčkách; vysokou rázovou pevnost; velmi dobrou odolnost vůči teplotní korozi; velmi dobrou odolnost vůči oxidaci; mikrostrukturální stabilitu stejně tak jako odolnost vůči tvorění nežádoucích TCF fází. Jak bylo výše zmíněno, má tato slitina přesné složení s velmi malými povolenými odchylkami u každého prvku, pokud má být zachována unikátní škála vlastností.

45

#### Příklad provedení vynálezu

Pro jasnější ilustraci tohoto vynálezu a pro srovnání s vysoko legovanými slitinami mimo požadované cíle tohoto vynálezu předkládáme níže uvedené příklady. Uvádíme následující příklady jako ilustraci tohoto vynálezu a jeho vztahů k ostatním slitinám a výrobkům a neměly by být chápány jako limitující.

50

V tomto vynálezu byl připraven k významu variací a škál ve skladbě slitin velký počet testovacích materiálů o vysoko legovaných slitinách. Některá níže zmíněná složení testovaných slitin nezapadají do požadované škály tohoto vynálezu, ale jsou zahrnuta pro srovnání, aby

umožnila jeho pochopení. Cílové chemické složení reprezentativní slitiny reprezentativní slitiny testovaných materiálů je znázorněno níže v tabulce 1.

Tabulka 1

Slitina	C	B	Cr	Co	Mo	V	Cb	Ti	Al	Ta	Re	Hf	Ni	Nb3B*	Viz "klíč" siře			
															1	2	3	4
CHSX-10A	-	3.0	8.5	0.70	7.2	0.30	0.65	6.0	7.6	5.0	0.05	BAL	2.08	12.46	6.65	14.55	20.76	
-10B	-	2.6	8.2	0.70	6.95	0.30	0.68	6.0	7.9	4.95	0.06	BAL	2.02	11.9	6.68	14.88	20.5	
-10C	-	2.5	7.7	0.70	6.6	0.30	0.65	5.9	8.2	4.8	0.05	BAL	1.90	11.4	6.55	15.05	20.3	
-10D	-	4.0	4.8	0.60	6.4	0.30	0.60	5.7	8.2	4.9	0.03	BAL	1.95	11.3	6.30	14.80	20.1	
-10E	-	2.2	7.2	0.70	6.3	0.25	0.72	5.85	8.3	4.8	0.042	BAL	1.84	11.1	6.57	15.12	20.1	
-10F	0.02	0.02	2.4	7.6	0.65	6.45	0.28	0.63	5.9	8.5	5.0	0.046	BAL	1.89	11.45	6.53	15.31	20.6
-10G	-	2.4	6.3	0.50	6.4	0.20	0.70	5.8	8.0	5.5	0.04	BAL	1.82	11.9	6.5	14.7	20.4	
-10G <sup>a</sup>	-	2.4	4.0	0.50	6.2	0.15	0.55	5.8	8.3	5.6	0.04	BAL	1.72	11.8	6.35	14.8	20.6	
10K-10Gb	-	2.3	3.3	0.40	5.5	0.10	0.30	5.7	8.4	6.3	0.03	BAL	1.60	11.8	6.0	14.5	20.6	
-10H	-	2.2	5.9	0.50	6.4	0.15	0.80	5.9	8.0	5.5	0.04	BAL	1.82	11.9	6.7	14.85	20.4	
-10I	-	2.5	4.7	0.50	6.4	0.15	0.70	5.8	7.9	6.0	0.04	BAL	1.81	12.4	6.5	14.65	20.9	
-10I <sup>a</sup>	-	2.5	3.3	0.40	6.1	0.10	0.60	5.8	7.9	6.0	0.04	BAL	1.69	12.1	6.4	14.4	20.4	
-10J	0.015	0.01	2.65	4.0	0.50	6.0	0.20	0.65	5.8	9.0	5.5	0.04	BAL	1.79	11.5	6.45	15.65	21.0
-10L	-	2.0	2.7	0.40	5.3	0.10	0.20	5.65	8.4	6.3	0.03	BAL	1.50	11.6	5.85	14.35	20.4	
CHSX-12A	-	3.0	4.5	0.35	5.5	-	1.0	5.65	9.0	5.5	0.04	BAL	1.84	11.0	6.65	15.65	20.35	
-12B	-	3.5	3.0	0.35	5.0	-	0.90	5.60	8.8	6.0	0.04	BAL	1.80	11.0	6.5	15.3	20.15	
-12C	-	2.8	3.5	0.40	5.3	-	0.75	5.60	8.8	5.8	0.04	BAL	1.70	11.1	6.35	15.15	20.3	
12D-12Ca	-	2.5	3.2	0.45	4.7	-	0.50	5.60	8.7	6.3	0.03	BAL	1.61	11.0	6.10	14.8	20.15	
-12E	-	2.0	3.0	0.45	4.7	-	0.40	5.60	8.7	6.3	0.03	BAL	1.50	11.0	6.0	14.7	20.15	
CHSX-10Ri	-	2.65	7.0	0.60	6.4	0.40	0.80	5.8	7.5	5.5	.06	BAL	1.91	11.9	6.6	14.5	20.0	
CHSX-12Ri	-	3.4	8.0	0.50	6.0	-	1.0	5.6	7.6	5.3	.06	BAL	1.92	11.3	6.6	14.6	19.4	

Klíč: 1 - W+Re

2 - Al+Ti<sub>1</sub>

3 - Al+Ti+Ta+Nb

4 - W+Re+Mo+Ta

\* Výpočet metodou PWA N-35

Rozvoj výzkumu třetí generace monokrystalických slitin zaměřený na kompoziční možnosti u vysoce legovaných slitin tohoto vynálezu začal definováním a zhodnocením řady experimentálních sloučenin. Prvotním předmětem rozvojového záměru byla zvýšená mez pevnosti při tečení a vybalancování jednotlivých prvků tak, aby vznikla kombinace s užitečnými strojařskými vlastnostmi poté, co byla definována základní představa o zvýšené pevnosti.

Původní materiály zkoumaly užitečnost vyšších hladin těžko tavitelného prvku tvořících gamma primární fázi před tím, než jsou přítomny v podobných původních sloučeninách. Jak je znázorněno v Tabulce 1, obsah chromu ve sloučenině byl snížen, aby se zlepšila její stabilita. Obsah kobaltu původně požadovaný pro zvýšení tuhé rozpustnosti může být významně snížen. Obsah těžko tavitelných prvků /W+Re+Mo+Ta/ byl různý a součet původních gamma primárních fází dělicích prvků /Al+Ti+Ta+Nb/ se lišil také. Obsah Re ve slitině byl původně zkoumán na běžných hladinách, ale zjistili jsme, že jeho obsah je nutno zvýšit.

Provedli jsme výpočty standardního  $N_{V3B}$  během projektovací etapy původní slitiny, abychom napomohli odhadnou t fázovou stabilitu dotyčné slitiny a odlišnosti tohoto čísla tak, jak se mění složení slitin. Některé slitiny byly vyrobeny běžnými výrobními postupy. Tyto slitiny byly taveny metodou vakuové indukce v peci V-1 firmy Cannon – Muskegon s výtěžkem průměrně 90,72 až 136 kg čistého produktu na slitinu /viz Tabulkou 2 níže/. Počty všech opakovaných kompozic, jak je uvedeno v tabulce 2, byly vytaveny při vakuovém zalévání voskového modelu do testovacích tyčí a listů. Postupy homogenizace byly vyvinuty v laboratoři ve 3" a 6" trubkové peci. Stárnoucí postupy gamma primárních fází byly uskutečněny také v laboratoři.

Tabulka 2

V-J VIM pec – chemické složení

Slitina	Hesť №.	C	B	Cr	Co	Mo	W	Cb	Ti	Al	Ta	Re	Mf	Mi
OKEX-10A	VF 778	0.001	-0.001	2.9	8.5	0.7	7.2	0.3	0.70	6.05	7.6	5.0	0.05	BASE
-10B	VF 831	0.002	-0.001	2.6	8.2	0.7	6.9	0.3	0.68	6.06	7.9	4.9	0.05	BASE
-10R1	VF 965	0.001	-0.001	2.65	7.0	0.6	6.4	0.4	0.80	5.72	7.6	5.5	0.06	BASE
-10R1	VF 966	0.001	-0.001	2.69	7.0	0.6	6.3	0.4	0.80	5.66	7.6	5.4	0.06	BASE
-10R1	VF 980	0.001	-0.001	2.56	7.0	0.6	6.3	0.4	0.79	5.78	7.6	5.4	0.06	BASE
-12R1	VF 963	0.001	-0.001	3.3	8.0	0.48	6.0	-0.05	1.01	5.69	7.6	5.3	0.07	BASE
-12R1	VF 964	0.001	-0.001	3.4	8.0	0.48	6.1	-0.05	1.00	5.60	7.6	5.3	0.06	BASE
-12R1	VF 979	0.001	-0.001	3.4	8.0	0.50	6.1	-0.05	1.00	5.56	7.6	5.3	0.06	BASE
-10Ga	VF 983	0.001	-0.001	2.4	3.95	0.41	6.1	0.14	0.56	5.83	8.4	5.9	0.03	BASE
-12C	VF 985	0.001	-0.001	2.7	3.5	0.45	5.3	-0.05	0.75	5.66	8.8	6.0	0.025	BASE
-10Cb (-10K)	VF 994	0.001	-0.001	2.2	3.3	0.40	5.5	0.09	0.26	5.74	8.2	6.4	0.025	BASE
-12C* (-12D)	VF 993	0.001	-0.001	2.4	3.2	0.46	4.8	-0.01	0.50	5.64	8.6	6.4	0.025	BASE

Všechny ostatní vzorky zmíněné výše v Tabulce 1 byly vyrobeny smísením tyčoviny ze základní slitiny s přídavkem nových prvků potřebných k dosažení požadované skladby. Míchání bylo provedeno během výroby testovacích tyčí a listů. Tyčovina ze základní slitiny a nové přidané prvky byly umístěny do tavicí pece v tavicím kelímku a lázeň byla homogenizována před nalitím do příslušné skořepinové formy. Domníváme se, že bylo v běžné praxi dosaženo dobré korelace mezi žádaným chemickým složením slitiny a složením testovaných tyčí či lopatek /viz níže Tabulkou 3/.

Tabulka 3

Chemické složení testovací tyčoviny

Allloy	C	B	Cr	Co	Mo	Ni	Cb	Ti	Al	Ta	Re	Hf	Ni	Hv3B*
CHSX-10A	-	-	2.9	8.5	0.68	7.4	0.29	0.69	6.0	7.5	5.1	0.07	BAL	2.09
-10B	-	-	2.7	8.1	0.69	6.95	0.29	0.69	6.0	7.8	4.8	0.06	BAL	2.01
-10C	-	-	2.6	7.7	0.69	6.4	0.30	0.62	5.7	8.3	4.7	0.07	BAL	1.86
-10D	-	-	4.0	5.0	0.62	6.0	0.31	0.59	5.44	8.1	4.7	0.04	BAL	1.83
-10E	-	-	2.2	7.2	0.70	6.4	0.26	0.63	5.89	8.2	4.8	0.05	BAL	1.84
-10F	0.014	0.027	2.4	7.7	0.65	6.4	0.28	0.63	5.96	7.9	5.0	0.04	BAL	1.86
-10G	-	-	2.5	6.5	0.53	5.5	0.20	0.68	5.6	8.2	4.6	0.05	BAL	1.68
-10Ga	-	-	2.4	4.0	0.41	6.2	0.14	0.55	5.79	8.3	6.0	0.025	BAL	1.73
-10Gb (10K)	-	-	2.3	3.5	0.42	5.9	0.10	0.43	5.67	8.5	6.0	0.024	BAL	1.65
-10H	-	-	2.3	5.6	0.51	6.2	0.17	0.76	5.58	7.8	5.4	0.05	BAL	1.69
-10I	-	-	2.6	4.8	0.52	6.6	0.14	0.67	5.65	7.4	5.4	0.04	BAL	1.70
-10Ia	-	-	2.7	3.5	0.47	5.2	0.10	0.60	5.80	8.0	5.8	0.04	BAL	1.67
-10J	0.017	0.01	2.6	4.0	0.48	6.0	0.19	0.62	5.74	8.8	5.7	0.04	BAL	1.76
-10L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-12A	-	-	3.0	4.6	0.39	5.3	-0.01	0.96	5.61	9.4	5.0	0.05	BAL	1.80
-12B	-	-	3.5	3.0	0.38	5.1	-0.01	0.84	5.52	8.8	6.1	0.05	BAL	1.79
-12C	-	-	2.7	3.5	0.45	5.4	-0.01	0.75	5.62	8.8	6.0	0.04	BAL	1.72
-12Ca (12D)	-	-	2.5	3.2	0.46	5.0	-0.01	0.61	5.56	8.7	6.0	0.03	BAL	1.60
-12E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-10Ri	-	-	2.65	7.0	0.60	6.4	0.40	0.80	5.67	7.6	5.5	0.065	BAL	1.87
-12Ri	-	-	3.4	8.0	0.48	6.1	-0.01	0.99	5.54	7.6	5.3	0.07	BAL	1.92

★ Metoda FWA N-35

U vzorku CMSX-10 D /viz Tabulku 1/ byly vysoce kvalitní přidávané prvky taveny ve vakuu a rafinovaný materiál byl odlit do 2" tyčí. Poté bylo výsledné množství tyčoviny použito k výrobě monokrystalických vzorků tyčí a lopatek pomocí zalití voskového modelu.

Bylo zřejmé, že během zpracování vzorků se mohla vyskytnout velká variabilita v celistvosti procesu zalévání voskových modelů, protože se ukázaly různé hladiny tvorění skvrn u testovacích tyčí, dále v rozmístění dendritických struktur a v dosažení vlastností. Reakce derivátu při tavení /popsaná v Tabulce 4 níže/ se lišila a byla dána jak složením slitiny, tak kvalitou vzorků.

Vyvinuté tepelné postupy pro opakování odlévání slitiny jsou popsány níže v Tabulce 4. U každého materiálu byla požadována gamma primární rozpustnost, nebyla však dosažena

všeobecně. Bylo uskutečněno první gamma primární stárnutí, aby byla dosažena požadovaná velikost gamma primárních částic a jejich rozložení. Při druhotném gamma primárním stárnutí došlo k usazení běžných gamma primárních sraženin v základní hmotě společně s velmi jemnými sraženinami umístěnými v kanálech základní hmoty mezi prvními gamma primárními částicemi těchto vzorků.

Tabulka 4

Slitina	Vrcholna <sup>1</sup> teplota °F	% rozloku *	První jnu <sup>1</sup> zráží hodiny	Druhotné jnu <sup>1</sup> zráží hodiny
CKSX-10A	2460	1349	97.0-98.0	1975°F/4
-10B	2465	1352	97.0-98.0	1975°F/4 Hrs
-10C	2470	1354	99.0-99.5	1975°F/19.5 Hrs
-10D	2450	1343	99.9-100	2100°F/8 Hrs
-10E	2465	1352	100	1975°F/10 Hrs
-10F	2444	1340	95	1975°F/10 Hrs
-10G	2475	1357	99.0-99.5	1975°F/16 Hrs
-10Ga	2485-90	1363-65	99.5-100	1975°F/12 Hrs
-10Gb(10K)	2485	1363	100	2075°F/5 Hrs
-10H	2475	1357	98.5-99.0	1975°F/6 Hrs
-10I	2475	1357	100	1975°F/16 Hrs
-10Ia	2480	1360	99.5-100	1975°F/18 Hrs
-10J	2480	1360	98.0-99.0	2075°F/5 Hrs
-10L				1975°F/5 Hrs
-12A	2475	1357	98.5-99.0	2075°F/6 Hrs
-12B	2480	1360	99.0-99.5	1975°F/12 Hrs
-12C	2485-90	1363-65	99.5-100	1975°F/13 Hrs
-12Ca(12D)	2485	1363	100	2075°F/5 Hrs
-12E	2460	1349	98.5-99.0	2075°F/6 Hrs
-10Ri	2455	1346	100	2075°F/6 Hrs
-12Ri				1600°F/24 + 1400°F/30
				1600°F/24 + 1400°F/30
				1600°F/24 + 1400°F/27.5
				1600°F/24 + 1400°F/39
				1600°F/20 + 1400°F/15
				1600°F/24 + 1400°F/30
				1600°F/24 + 1400°F/30
				1600°F/24 + 1400°F/27
				1600°F/101 + 1400°F/46
				1600°F/22 + 1405°F/24
				1600°F/24 + 1400°F/24
				1600°F/24 + 1400°F/30
				1600°F/24 + 1400°F/30

\* určeno vizuálním ohledem  
+vzduchem chlazené vzorky ze všech zrcacích procesů

Významným faktorem složení slitiny CMSX-10A byl posun k vyššímu obsahu Re. Současně byly vyrovnaný hladiny W, Cr, Ta a ostatních podpůrných prvků gamma primární fáze pro dodržení požadovaných vlastností. Vyšší hladina Re významně přispěla ke zlepšení pevnosti při tečení během celého testovacího režimu, jak je vidět z výsledků popsaných v Tabulce 5 níže pro vzorky CMSX-10A.

Tabulka 5

Testovací podmínky	Hodiny	%		Konečné údaje	Cas v h	K dosazení 1,0% 2,0%
	Doba záteže	Prodloužený RA	, %	o tečení h	% deform.	
1600°F/75.0 ksi 871°C	534.4	24.2	26.9	534.2	22.331	10.9 21.0
	328.4	22.0	27.8	328.3	21.055	6.3 8.7
	527.3	21.1	26.3	526.3	17.552	28.4 72.2
1700°F/50.0 ksi 927°C	305.0	31.1	34.5	304.2	28.614	62.1 108.9
	292.4	19.2	19.9	291.8	19.324	71.5 123.7
	87.6	2.6	5.8	85.7	1.474	65.9 *
1800°F/30.0 ksi 982°C	415.6	16.1	21.4	413.8	15.643	182.7 246.1
	848.0	37.1	33.0	846.3	34.326	460.4 524.3
	1016.2	33.2	30.5	1014.3	32.984	476.8 655.1
1800°F/36.0 ksi 982°C	586.5	38.1	38.0	585.6	33.050	395.0 425.0
	572.7	36.9	35.3	570.7	29.029	395.0 422.0
	546.5	26.4	34.2	545.7	25.843	373.0 406.0
	420.3	22.4	26.3	418.7	18.105	286.7 317.6
	426.0	14.8	17.0	425.1	10.244	326.5 353.2
	239.8	24.3	23.8	239.7	23.264	94.1 123.9
	255.7	19.9	27.4	253.6	18.510	115.2 152.7
	32.3	5.5	11.0	31.0	2.075	26.7 30.7
1900°F/25.0 ksi 1038°C	129.7	43.2	38.9	128.7	39.556	30.4 48.1
	168.7	34.7	36.4	166.1	30.816	58.2 78.4
	228.1	18.1	32.3	226.4	16.926	146.3 160.6
	277.7	29.5	31.1	276.4	27.323	9.9 29.9
	423.4	39.7	38.3	422.7	35.121	218.4 250.9
	383.8	35.9	36.1	382.7	34.861	192.9 226.7
	373.3	31.3	35.7	371.6	26.138	211.6 238.0
	138.0	22.3	33.0	136.3	19.052	33.9 77.0
2000°F/18.0 ksi 1093°C	134.9	40.7	36.5	134.7	38.328	54.7 71.9
	122.9	23.2	34.9	122.0	19.050	50.1 69.4
	115.6	34.2	36.6	114.4	30.861	40.8 56.8
	245.2	35.1	36.2	244.3	29.844	135.7 157.9
	221.9	36.3	35.4	221.8	33.737	113.0 140.0
	181.2	32.1	34.2	180.1	29.249	53.1 61.4
	126.4	47.9	49.0	124.1	30.086	45.8 69.2
	150.5	45.5	47.8	148.1	39.308	16.8 34.5
2050°F/15.0 ksi 1121°C	140.5	30.6	40.0	138.7	23.596	30.6 76.4
	120.8	29.5	39.7	120.0	29.479	16.3 55.6
	79.0	11.7	14.4	79.0	11.644	41.7 54.8
	112.2	24.3	31.3	112.1	21.401	55.9 69.5
	94.1	22.1	27.5	94.1	20.520	42.2 62.6
	112.5	39.4	33.1	112.2	29.126	28.0 58.8
2100°F/12.5 ksi 1149°C	96.6	25.9	35.9	95.5	14.542	52.3 62.5
	123.6	43.4	40.4	122.9	31.050	40.9 63.5
	50.8	21.7	29.6	49.9	9.330	35.1 37.6
	90.5	41.6	43.7	89.7	37.422	13.6 38.5
	420.5	23.9	35.1	419.9	23.196	213.8 286.0
	396.1	37.1	34.0	394.7	31.623	239.4 264.9
1800°F/36.0 ksi 982°C	384.9	31.1	34.0	382.9	25.554	220.5 247.9

% RA - procenta redukce plochy průřezu při prasknutí vzorku podrobeného tažné záťaze v závěsu zkoušky pevnosti při tečení.

Mikrostrukturální přehled porušení materiálu vzorků této slitiny ukázal, že se objevilo TCP fázové sražení během příslušných testů pevnosti při tečení, zejména u teplot při 1038 °C (1900 °F) a výše. Ukázalo se, že výpočet čísla fázové stability  $N_{VB}$  bude účinným nástrojem při 5 předpovídání stability slitiny a pevnosti při tečení ve vysokých teplotách.

Tam, kde číslo  $N_{VB}$  bylo u vzorků CMSX-10A 2,08; bylo u CMSX-10B navrženo na úroveň 2,02. Toho bylo dosaženo dalším snížením obsahu Cr a podobné snížením Co a W+Re hladiny. Wolfram byl v tomto vzorku snížen více než Re, protože Re je v tuhému roztoce účinnější. Navíc, 10 protože určitá ztráta podílu Wolframu vzhledem ke gamma primární fázi se dala předvídat, byla dostatečně navržena mírným zvýšením obsahu Ta v kompozici. Vznikl tak vzorek slitiny CMSX-10B, který vykazoval ještě větší pevnost při tečení při 982 °C (1800 °F).

Tabulka 6 uvedená níže ilustruje, že tři vzorky dosáhly průměrné životnosti 961 hodin s 1% 15 tečením při průměru 724 hodin. Bylo však zjištěno, že TCP fáze se objevila při vyšší teplotě.

Tabulka 6  
CMSX-10B pevnost při tečení

Testové podmínky	Doba zátěže h	% prodloužení	%	Konečné hodnoty tečení		Čas v h k dosažení	
				h	% deform.	1%	2%
1800°F/36.0 ksi 982°C	907.1	19.2	34.0	907.0	17.832	697.2	752.7
	989.3	18.9	33.5	988.5	17.657	768.1	817.8
	988.4	35.9	36.1	987.3	31.813	705.8	767.5
	507.0	44.1	45.4	505.7	41.548	317.9	352.6
	598.1	46.9	43.4	596.1	42.340	386.5	415.2
	408.3	62.6	52.1	407.2	54.479	187.3	256.5
	265.3	39.7	43.7	262.7	37.102	87.6	119.2
	385.3	45.5	46.2	383.5	39.031	177.4	213.4
	412.8	43.4	40.5	410.6	38.771	189.1	233.4
	389.3	51.5	44.2	386.8	36.920	220.5	249.2
	459.5	40.0	46.3	458.0	39.513	210.2	291.1
	258.0	38.1	40.6	257.9	36.743	32.1	90.2
	484.1	27.9	40.0	483.4	26.296	288.1	326.7
	376.9	16.4	20.4	376.8	16.088	96.0	226.6
	481.0	50.5	48.2	478.8	34.557	264.4	297.5
	461.5	35.1	40.6	460.1	30.786	181.1	265.3
	483.0	47.1	46.8	482.1	43.714	286.2	320.7
	500.1	33.4	37.0	499.7	30.486	11.9	280.1
1800°F/40 ksi 982°C	436.7	40.2	44.1	436.2	39.818	294.6	318.9
	390.8	50.1	42.8	390.3	41.817	250.9	276.2
	336.9	52.7	48.1	335.2	46.697	226.5	240.9
1900°F/25.0 ksi 1098°C	237.8	55.9	45.7	237.4	53.854	33.0	113.5
	295.7	57.4	49.1	295.6	46.592	123.7	170.9
2000°F/18.0 ksi 1093°C	192.7	31.5	26.6	191.6	27.733	56.3	88.6
	166.5	41.4	25.3	166.5	34.102	46.2	72.7
	173.3	36.6	27.0	171.4	31.481	24.0	66.1
2050°F/15.0 ksi 1121°C	219.6	40.1	40.4	218.6	37.871	13.2	56.8
	122.3	28.2	47.9	120.6	26.614	37.0	63.7
	118.4	33.2	60.0	116.9	29.986	36.7	56.5
	179.7	44.1	48.1	179.1	39.188	8.4	75.3
	74.9	44.2	48.6	74.6	34.800	6.8	14.5
	168.3	48.6	49.7	167.0	43.171	36.9	77.1
	104.8	17.0	27.2	102.8	1.626	66.1	-
	155.9	46.3	49.8	155.2	38.388	64.4	81.9
	90.6	15.1	21.4	87.1	1.046	75.5	-
	120.5	46.3	55.8	118.7	35.143	10.3	27.7
	150.7	39.8	49.7	150.1	33.903	21.4	60.9
	149.5	33.2	46.2	148.9	23.166	73.3	88.3
	142.9	42.0	47.5	142.5	41.524	54.9	70.5
	163.0	52.5	49.2	161.9	46.146	20.5	76.9
	151.1	66.4	45.6	150.7	59.115	52.7	75.5
	131.8	57.3	44.4	131.5	48.310	26.3	57.1
*	156.0	54.6	41.0	155.9	45.502	55.5	78.3
*	133.7	57.2	56.0	132.7	41.753	67.5	80.7
*	135.1	59.7	52.3	134.3	46.317	54.9	71.5
*	151.1	66.4	45.6	150.7	59.115	52.7	75.5
*	131.8	57.3	44.4	131.5	48.310	26.3	57.1
2100°F/15.0 ksi 1149°C	69.7	54.2	48.1	69.4	47.674	25.3	36.3

\* As - podmínky rozpouštění

U CMSX 10-A a 10B bylo dosaženo jen 97 až 98% gamma primárního rozpuštění /viz Tabulka 4/, což nepostačilo k optimalizaci mechanických vlastností a mikrostrukturální homogeneity. Dosažení vyšší rozpustnosti gamma primárních fází společně se zlepšením mikrostrukturální stability při teplotě nad 1038 °C (1900 °F) se tudíž stalo zcela prioritním.

Abychom potvrdili předpokládané složení TCP fází u těchto slitin, provedli jsme v rastrovacím elektronovém mikroskopu vlnově disperzní rentgenovou mikroanalýzu testovací tyče obsahující jehlice a srovnali ji s gamma slitinami a gamma primárními kompozicemi. Výsledky /uvedené v Tabulce 7/ potvrzují, že jehlice byly bohaté na Cr, W a Re.

#### Vysvětlivky k Tab. 7 a 16

CPS označuje intenzitu rentgenového záření v pulzech za sekundu.

Výraz „ALK“ označuje prvek hliník a skutečnost, že dopadající rentgenové fotony interagují s elektrony slupky k atomu hliníku.

Záhlaví K, Z, A, F za prvkem (ELEM) označuje pásy vlnové délky.

Převrácená sekce v Tabulce 7 označuje skutečnost, že vlnově disperzní rentgenová mikroanalýza v rastrovacím elektronovém mikroskopu se prováděla na roviném povrchu vytvořeném přičním přeríznutím vzorku slitiny.

#### Tabulka 7

##### CMSX-10B mikrochemické analýzy

- 30    – Odlitá testovací tyč (VF 831)
- Převrácená sekce. Umístění tyče na dně.
- Roztaveno na 1352 °C (2465 °F)
- Zrání: 1080 (1975 °F) /19,5 hod/ AC  
            870 (1600 °F) /20,0 hod/ AC  
            760 (1400 °F) /24,0 hod/ AC

<u>Gamma fáze</u>					<u>Gamma prim. fáze</u>					<u>Jehlicoví složka</u>				
ELEM	K	Z	A	F	ELEM	K	Z	A	F	ELEM	K	Z	A	F

Al	0.0101	1.090	0.324	1.000	ALX	0.0145	1.084	0.322	1.000	ALX	0.0116	1.107	0.347	1.000
Ti	0.0069	1.007	0.930	1.051	TIK	0.0084	1.002	0.934	1.052	TIK	0.0077	1.026	0.908	1.039
Cr	0.0428	1.008	0.963	1.108	CRK	0.0250	1.002	0.965	1.117	CRK	0.0390	1.028	0.949	1.083
Co	0.0970	0.994	0.984	1.018	COK	0.0761	0.988	0.987	1.022	COK	0.0755	1.016	0.977	1.025
Ni	0.6891	1.033	0.988	1.010	NIK	0.7270	1.026	0.991	1.005	NIK	0.6143	1.056	0.983	1.024
Ta	0.0485	0.794	1.020	1.000	TAL	0.0697	0.788	1.024	1.000	TAL	0.0389	0.814	1.018	1.000
W	0.0329	0.788	0.963	1.000	WL	0.0311	0.783	0.962	1.000	WL	0.0682	0.808	0.968	1.000
Re	0.0422	0.785	0.968	1.000	REL	0.0085	0.779	0.968	1.000	REL	0.1083	0.805	0.973	1.000

hmotn.%			hmotn.%			hmotn.%		
ELEM	CPS	ELEM	ELEM	CPS	ELEM	ELEM	CPS	ELEM
Al K	12.1800	2.87	Al K	17.9400	4.19	Al K	11.9900	3.02
Ti K	5.5200	0.71	Ti K	6.8400	0.86	Ti K	5.2500	0.79
Cr K	27.6400	3.98	Cr K	16.4500	2.31	Cr K	21.5800	3.69
Co K	40.6800	9.74	Co K	32.5400	7.64	Co K	27.1700	7.42
Ni K	253.1300	66.84	Ni K	272.3800	71.11	Ni K	193.7500	57.84
Ta L	6.5667	5.99	Ta L	9.6329	8.64	Ta L	4.5259	4.70
W L	4.0775	4.33	W L	3.9375	4.13	W L	7.2620	8.71
Re L	4.6000	5.56	RE L	0.9500	1.13	RE L	10.1300	13.82
TOTAL	100.00	TOTAL		100.00	TOTAL		100.00	

Čísla N<sub>V3B</sub> byla vypočtena pro CMSX-10C jako 1,90 a pro CMSX-10D 1,95. Re bylo ponecháno na 5 % zatímco W byl pro zlepšení stability u těchto vzorků snížen. Obsah Ta ve slitině byl zvýšen, protože se nepodílel na tvoření TCP a poměr Ta/W se účinně zlepšit a přispěl k odlévatelnosti slitiny. U vzorků -10C byl snížen obsah chromu a u vzorků - 10D byl naopak zvýšen na 4 %, aby byla možnost učít vhodnou hladinu Cr z hlediska teplotní koroze. Co byl snížen u obou vzorků, významně u vzorku -10D a hladina Al + Ti byla také snížena pro lepší dosažení celkového gamma primárního roztoku. Výsledky pevnosti při tečení u daných dvou vzorků jsou popsány v Tabulce 8 a 9. I když vzorky - 10D slitiny byly měřeny na plnou gamma primární rozpustnost /v kontrastu k 99 až 99,5 % u CMSX-10C/, větší obsah Cr ve slitině, který vedl k nižší hladině Al + Ti, ovlivnil vlastnosti méně než bylo docíleno u CMSX - 10C. Oba materiály však vykázaly vyšší stabilitu slitiny a lepší tepelné vlastnosti, takže pokusy vyrovnat nízkou a vysokou reakci při tečení u slitiny byly úspěšné.

Tabulka 8  
CMSX -10C pevnost při tečení

Testovací podmín.	Doba zátěže h	% prodloužení	% RA	Konečné hodnoty tečení h	%deform.	Čas k dosažení vh	
						1%	2%
1800°F/36.0 ksi 982°C	556.1	31.4	30.5	555.2	26.615	316.1	376.3
	636.6	43.9	37.5	636.4	38.460	416.6	455.4
	609.2	23.3	34.7	607.6	19.074	410.6	460.6
	635.7	44.9	45.6	635.3	34.991	407.3	443.4
	612.8	43.5	38.8	611.9	41.951	409.8	438.7
1850°F/36.0 ksi 1010°C	252.2	30.2	37.8	252.0	22.033	61.1	166.3
	298.1	41.3	39.0	297.6	37.953	170.3	194.8
	231.1	33.6	39.5	230.2	29.689	127.8	146.0
1922°F/20.3 ksi 1050°C	492.4	52.5	52.4	491.6	48.922	176.5	251.7
	529.8	38.6	45.5	528.9	33.353	269.6	306.2
	637.5	48.9	43.3	635.2	45.804	189.5	318.3
2000°F/18.0 ksi 1093°C	258.8	35.0	41.5	258.7	32.444	74.2	127.5
	293.1	49.2	44.1	292.1	42.079	145.6	170.9
	221.9	43.0	48.5	220.9	33.507	55.6	123.3
	266.1	35.1	44.0	264.6	33.759	113.6	143.6
2050°F/15.0 ksi 1121°C	196.6	39.7	40.3	194.1	27.755	26.0	134.8
	170.4	30.1	46.3	169.2	25.624	11.1	51.4
	193.2	38.1	42.9	191.9	32.288	46.5	76.5
	247.3	33.1	40.5	246.0	26.494	122.0	150.8

Tabulka 9  
CMSX -10D pevnost při tečení

Test. podmínky	Doba zátěže h	% prodl.	% RA	Konečné hodnoty tečení h	%deform.	Čas v h k dosažení	
						1%	2%
1800°F/36.0 ksi 982°C	428.0	26.7	29.3	426.3	24.166	189.2	248.3
1850°F/36.0 ksi 1010°C	141.0	23.1	26.8	140.1	20.660	57.8	79.7
	140.7	14.7	26.1	140.2	13.741	56.2	77.6
	166.0	17.5	28.9	165.0	15.640	76.5	100.1
1922°F/20.3 ksi 1050°C	519.9	23.8	24.9	518.9	22.608	202.0	345.6
	667.0	17.6	23.7	665.2	16.819	151.8	391.4
	680.3	14.9	28.2	678.9	14.476	340.2	500.3
2000°F/18.0 ksi 1093°C	370.3	18.8	21.3	369.9	15.560	20.9	106.9
	401.5	11.1	18.0	400.0	8.903	19.8	125.5
	366.6	17.5	25.8	366.6	8.049	223.9	306.1
2050°F/15.0 ksi 1121°C	465.3	12.9	20.5	465.2	12.639	61.0	305.9
	338.8	9.8	24.8	337.7	9.468	30.8	204.4

5 Přijatelnost nízkého obsahu Cr byla potvrzena při extrémně agresivních krátkodobých hořákových testech na teplotní korozii uskutečněných při  $900^{\circ}\text{C}$ , ( $1650^{\circ}\text{F}$ ) 1 % hmotn. síry a  $10/10^6$  částic mořské soli. Diagramy 1 a 2 znázorňují výsledky testů uskutečněných na 117 a 144 h. u vzorků CMSX-10C a CMSX-10D. V obou případech vykázaly podobnost s typy materiálů MAR M 247, čímž potvrdily, že nízký obsah Cr je ve slitině namíště.

10 Na základě výše zmíněných výsledků byly navrženy, vyrobeny a zhodnoceny další série slitin CMSX - 10E, -10F, -10G, -10H -10I a 12A. Slitiny vykazovaly hladinu Re v rozsahu 4,8 až 15 6,3 % hmotn., hladinu Cr v rozsahu 2,2 až 3,0 % hmotn., Co 4,7 až 7,6 % hmotn. a zbytek byl vyrovnan tak, aby se zachovala odlévatelnost a zlepšila se rozpustnost a fázová stabilita. Číslo N<sub>V3B</sub> se pohybovalo mezi 1,81 až 1,89,

15 Jedna ze sérií, slitina CMSX-10F, obsahovala 0,02 % hmotn. a 0,2 % hmotn. B. Zkoumaly jsme tyto složky pro zlepšení výtěžnosti tavení a navíc mohly mít větší podíl na řízení monokrystalické orientace odlévaných částic. Depresanty teploty tání C a B však omezily reakci vzorku na homogenizaci. Vlastnosti CMSX -10F při tečení jsou popsány v Tabulce 10.

Tabulka 10

CMSX-10F pevnost při tečení

Testové podm.	Zítěž h	% prodl.	%RA	Konečné hodnoty h	tečení % deform.	Čas v h k dosazení	
						1%	2%
$1800^{\circ}\text{F}/36.0 \text{ ksi}$ $980^{\circ}\text{C}$	616.0	18.1	22.4	615.8	16.898	439.9	477.6
	666.6	45.6	48.0	666.4	43.261	464.6	492.3
	603.1	25.3	24.3	602.5	24.281	398.4	444.0
$1850^{\circ}\text{F}/36.0 \text{ ksi}$ $1010^{\circ}\text{C}$	243.9	19.6	28.2	243.0	18.045	129.1	160.9
	285.9	26.8	32.1	285.5	25.701	187.8	206.0
	258.6	19.2	29.1	258.3	18.175	168.3	189.5
$1922^{\circ}\text{F}/20.3 \text{ ksi}$ $1050^{\circ}\text{C}$	499.5	40.0	41.0	498.5	37.756	208.2	272.6
	649.2	55.6	52.9	648.3	51.045	197.6	338.8
	361.0	15.8	21.9	357.7	2.599	273.2	335.7
$2000^{\circ}\text{F}/18.0 \text{ ksi}$ $1094^{\circ}\text{C}$	235.4	39.6	51.7	235.4	37.881	100.8	133.2
	276.1	43.7	52.8	274.4	36.762	115.1	155.9
	290.0	36.7	47.3	289.1	33.304	125.3	162.1
$2050^{\circ}\text{F}/15.0 \text{ ksi}$ $1121^{\circ}\text{C}$	255.4	28.7	36.6	255.0	27.426	67.4	131.0
	255.1	33.4	43.1	254.9	31.378	46.2	102.2
	254.5	25.4	33.3	254.4	23.737	50.9	118.7

20 Výsledky pevnosti při tečení u vzorků CMSX - 10E, G, H, I a CMSX - 12A jsou popsány v tabulkách 11, 12, 13, 14 a 15. Údaje vykazují obecné zlepšení meze pevnosti při tečení nad  $1038^{\circ}\text{C}$  ( $1900^{\circ}\text{F}$ ) a přitom velmi dobrou pevnost při nižších teplotách.

Tabulka 11

CMSX - 10E      pevnost při tečení

Testové podm.	Zátěž v h	%prodlo	% RA	Konečné hodnoty		Čas v h	
				tečení h	%deform.	%	%
1800°F/36.0 ksi 980°C	664.5	31.4	36.3	663.5	30.435	436.5	470.8
	604.4	35.1	36.7	603.3	33.371	253.7	355.9
	582.5	41.5	36.1	581.7	39.792	78.9	329.3
	553.5	35.9	37.0	552.5	33.172	326.4	357.1
1850°F/36.0 ksi 1010°C	257.9	25.3	32.0	257.0	22.734	149.4	170.3
	199.2	18.4	32.1	198.6	16.261	122.4	139.4
	260.5	33.6	33.4	259.7	31.315	159.9	174.0
1922°F/20.3 ksi 1050°C	810.6	38.6	33.0	808.4	33.523	210.2	378.2
	800.9	35.3	36.4	799.1	32.405	339.7	434.2
	859.9	39.0	35.4	859.6	37.036	364.6	465.2
2000°F/18.0 ksi 1094°C	362.8	27.7	29.3	362.4	24.887	98.4	177.3
	411.2	29.4	27.0	409.9	26.426	173.6	218.6
	369.7	15.3	28.2	368.8	12.941	170.3	221.9
	379.7	26.4	26.1	379.2	27.656	177.9	206.6
2050°F/15.0 ksi 1121°C	476.9	21.8	23.4	476.3	18.233	196.6	255.9
	418.4	27.5	24.7	417.5	25.854	180.0	227.3
	397.7	19.0	23.8	396.8	17.522	112.6	198.2

Tabulka 12  
CMSX -10G devnost při tečení

Testové podm.	Zátěž v h	%prodl	%RA	Konečné hodnoty		Čas v h žení	k dosa-	
				tečení h	%deform.		1%	2%
1700°F/55.0 ksi 927°C	671.8	19.6	28.6	670.5	14.775	447.2	508.3	
	693.6	26.0	24.2	691.7	21.750	441.2	493.4	
	724.9	23.3	29.7	723.2	19.913	464.8	520.4	
	582.5	18.6	20.1	581.1	15.200	77.0	356.7	
	681.2	20.9	24.1	679.2	19.115	56.4	314.8	
	538.4	21.6	17.5	538.3	17.857	242.1	308.7	
	523.0	17.7	21.8	522.4	14.157	235.3	308.0	
	569.7	17.5	19.8	568.5	15.035	287.0	354.9	
	775.2	29.6	29.3	773.8	28.826	315.0	539.9	
	719.7	29.5	28.5	717.8	27.266	321.2	486.4	
1800°F/36.0 ksi 980°C	741.6	28.0	25.9	740.3	24.870	284.5	464.2	
	682.8	45.6	34.7	681.1	39.289	409.1	452.4	
	764.0	23.2	33.7	764.0	22.884	543.6	586.6	
	790.4	41.4	35.6	789.4	38.172	511.6	565.3	
	799.1	27.0	32.3	797.4	25.737	529.8	579.1	
	354.4	19.3	30.2	351.9	16.000	246.7	271.4	
	344.5	28.5	31.9	344.3	26.174	220.8	241.9	
	315.4	23.7	30.7	315.1	23.571	183.4	205.6	
	753.4	31.7	34.8	753.2	27.914	352.3	462.1	
	728.0	31.5	33.5	727.1	28.362	281.1	422.1	
1950°F/36.0 ksi 1010°C	731.6	34.3	38.8	730.5	30.770	339.3	437.3	
	95.4	29.3	29.4	94.9	22.842	41.5	50.9	
	95.7	26.7	27.2	94.7	20.130	45.8	54.7	
	104.6	30.4	33.2	104.4	27.517	41.8	54.4	
	100.8	25.6	35.1	98.9	21.577	49.2	58.1	
	95.8	25.9	28.9	93.6	19.748	41.1	51.4	
	110.0	29.3	30.3	108.0	22.669	48.5	60.1	
	108.2					43.8		
	104.8					45.8		
	104.3					48.6		
2000°F/18.0 ksi 1094°C	464.4	23.1	21.3	463.6	18.190	257.7	293.5	
	411.9	18.3	23.0	410.4	16.347	103.5	227.6	
	370.9	27.0	38.7	369.8	25.326	7.6	47.3	
2012°F/14.5 ksi 1100°C	790.2	31.2	34.9	788.7	24.939	299.9	406.0	
	671.4	23.6	25.7	670.3	13.397	303.3	396.3	
	512.1	22.6	28.1	510.4	21.094	192.5	277.7	
	651.7	27.4	39.7	651.3	16.328	315.7	434.7	
	754.6	29.7	25.4	753.1	24.032	193.8	388.7	
	908.3	17.7	18.3	-	-	-	-	
	758.9	30.8	26.5	758.7	24.090	388.7	438.2	
	740.0	19.8	20.5	739.5	16.962	316.5	426.7	
	671.5	26.4	23.8	669.3	15.578	359.8	412.4	
	410.8	22.9	27.4	410.0	18.655	226.5	272.2	
2050°F/15.0 ksi 1121°C	283.5	18.0	31.2	283.5	15.303	156.4	191.2	
	320.0	16.8	17.4	318.3	12.979	156.4	191.2	
	389.7	22.0	22.1	389.7	18.488	29.9	189.1	
	381.4	27.0	24.1	381.1	26.758	69.5	197.9	
	254.4	12.7	30.4	252.9	8.984	108.4	185.5	
2100°F/12.0 ksi 1149°C	419.8	20.5	26.0	419.8	18.917	201.1	274.3	
	331.4	16.9	21.7	331.1	15.069	25.2	83.2	
	367.7	19.2	23.2	366.5	17.530	76.2	177.4	
	387.3	16.8	17.2	386.5	12.742	236.9	282.0	
	383.1	34.1	32.4	381.6	32.135	10.5	164.3	

Tabulka 13  
CMSX - 10H pevnost při tečení

Testové podmínky	zátěž h	% prodlouž.	%RA	Konečné hodnoty tečeut h	%deform.	Čas v hodinách k dosažení	
					1%	2%	
1800°F/36.0 ksi 980°C	563.4	23.2	27.2	563.2	22.669	318.5	366.2
	553.1	24.5	23.0	552.7	21.324	373.1	402.8
	526.9	20.7	27.3	526.4	19.715	358.2	390.7
	594.5	35.1	41.4	594.4	32.090	328.8	372.8
1850°F/36.0 ksi 1010°C	242.9	24.3	20.1	242.2	20.686	107.3	155.6
	221.9	17.0	21.0	221.0	14.888	115.9	150.4
	223.4	21.3	21.0	221.7	19.196	128.4	144.7
1922°F/20.3 ksi 1050°C	520.6	26.1	29.3	520.4	23.183	234.3	319.1
	470.4	26.3	21.2	469.2	19.333	176.1	253.2
	574.7	16.8	23.0	573.0	14.411	282.1	373.0
2000°F/18.0 ksi 1094°C	434.0	21.5	18.7	432.1	20.234	103.5	233.1
	437.3	27.1	33.8	437.3	26.306	182.6	240.8
	430.7	24.6	20.4	430.7	23.244	68.8	192.1
	430.1	21.1	19.3	428.9	19.050	73.7	213.8
2050°F/15.0 ksi 1121°C	366.1	16.3	12.0	365.5	11.326	239.8	273.3
	384.0	17.4	16.0	382.3	12.055	168.2	262.9
	420.2	12.2	13.3	418.6	10.017	127.3	273.2

Tabulka 14  
CMSX -10 I pevnost při tečení

Testové podmínky	zátěž h	% prodlouž.	%RA	Konečné hodnoty tečeut h	%deform.	Čas v hodinách k dosažení	
					1%	2%	
1800°F/36.0 ksi 980°C	565.1	35.2	32.0	564.8	29.774	297.0	368.9
	581.9	32.4	29.3	580.2	28.689	371.9	402.5
	514.1	24.1	30.2	514.1	21.207	318.3	358.2
1850°F/36.0 1010°C	260.5	25.0	24.8	259.3	23.255	156.7	175.3
	247.5	22.4	29.1	245.7	17.730	131.9	169.0
	246.1	23.7	29.0	246.1	20.277	137.6	156.7
1922°F/20.3 1050°C	916.3	24.9	30.3	914.8	22.465	472.9	549.3
	934.8	32.2	33.0	934.8	30.165	353.7	475.2
	863.6	27.8	28.5	862.9	27.057	295.6	442.5
1976°F/28.1 1080°C	116.1	19.5	20.1	116.1	19.155	57.4	70.1
	65.6	22.9	20.6	64.2	21.368	17.8	26.4
	91.6	23.2	25.3	90.4	15.544	37.6	49.7
2000°F/18.0 1094°C	430.1	22.7	25.7	429.2	18.449	58.9	193.0
	483.8	19.8	25.1	483.8	17.860	102.4	245.4
2050°F/15.0 1121°C	397.7	17.9	30.0	397.3	13.264	239.8	292.9
	487.7	21.4	21.9	487.1	18.854	248.2	318.4
	468.3	18.4	25.5	467.9	15.800	194.1	300.1
2100°F/12.0 1149°C	501.3	10.1	15.9	498.7	0.615	-	-
	401.3	16.8	26.3	399.7	15.429	6.6	25.5
	210.6	11.5	12.7	210.3	0.373	-	-

Tabulka 15  
CMSX - 12A      pevnost při tečení

Testové podmínky	Zátež h	% prodl.	% RA	Konečné hodnoty tečení h	%deform.	Čas v h	k dosažení
						1%	2%
1800°F/36.0 ksi 980°C	491.9	40.2	41.6	491.8	38.605	254.0	293.7
	420.4	23.5	31.9	420.3	19.299	234.9	277.9
	383.4	25.3	26.2	382.9	22.920	198.1	244.3
	456.2	24.1	26.1	454.5	22.582	89.9	265.5
	458.0	30.7	32.7	457.1	26.155	253.2	292.8
	386.8	30.1	30.4	386.3	27.031	172.7	216.9
	403.7	34.5	28.8	402.7	31.033	140.2	204.9
	398.7	21.6	23.5	398.4	20.277	181.1	236.1
1850°F/36.0 1010°C	208.5	32.1	40.5	208.3	31.248	100.8	119.6
	189.5	21.2	25.2	189.4	20.461	99.1	116.3
1922/20.3 1050°C	829.6	46.5	45.3	828.8	44.488	315.8	400.7
	797.0	33.5	32.5	796.9	32.856	315.3	400.5
2000/18.0 1094°C	500.3	31.7	29.6	499.2	24.922	218.4	268.5
	227.6	36.5	41.2	227.1	26.825	90.6	113.9
	430.4	18.5	23.3	430.4	18.180	181.0	234.1
2050°F/15.0 1121°C	424.8	17.0	27.5	423.3	15.832	263.5	301.2
	366.1	26.2	42.8	365.5	20.399	146.6	197.8
	400.8	18.2	25.4	400.7	16.910	184.6	251.3
2100°F/12.0 1149°C	255.4	25.8	45.8	253.6	22.920	64.1	125.8
	483.9	10.1	19.3	482.7	8.602	378.6	421.9
	325.1	7.1	16.6	324.7	4.315	268.8	302.5

5 Zkoumali jsme různé působení gamma primárního zrání s vývojovou aktivitou soustředěnou na dosažení optimální velikosti částic gamma primární fáze a rozložení prohřívání na delší dobu až na teplotu 1079 °C (1975 °F) (viz Tabulka 4), protože vyšší teplotní stárnutí urychlovalo tvorění TCP fází během stárnoucího cyklu. Prohřívací doba 10 až 21 hodin při teplotě 1079 °C (1975 °F) byla vhodná, protože se utvořily částice gamma primární fáze o rozměrech 0,5 µm. Ukázalo se však, že kratší doba stárnutí gamma primární fáze při vyšší teplotě může být praktičtější, protože byly zjištěny stabilnější mikrostruktury.

10 Mikrochemické analýzy jehlicových částic na SEM WDX byly provedena na dodaných vzorcích CMSX-10G. Vzorek testovaný při 1080 °C (1976 °F)/281 ksi obsahoval ve své mikrostruktuře jehlice. Výsledky analýzy jsou popsány v Tabulce 16 a opět naznačují, že jehlice utvořené v této jakostní třídě materiálu jsou zejména bohaté na Re, jsou však také obohaceny Cr a W.

Tabulka 16

CMSX-10G

5

1080 °C, 1976 °F/28.1 ksi 104,6 h.

ELEM	K	Z	A	F
CrK	0,0426	1,105	0,793	1,049
CoK	0,0584	1,094	0,888	1,086
NiK	0,1740	1,140	0,910	1,116
W L	0,2107	0,941	0,972	1,000
ReL	0,4767	0,941	0,979	1,000

Chemické složení jehlic

10

ELEM	CPS	hmotn. % ELEM
CrK	113,7000	4,63
CoK	112,1100	5,54
NiK	305,1425	15,02
W L	134,8988	23,03
ReL	276,4000	<u>51,76</u>
		100,00

U testovací tyče CMSX - 10G byl proveden standardní test na odolnost proti rekrytalizaci. Testovací metoda a výsledky jsou popsány v Tabulce 17. Výsledky ukazují, že vzorky CMSX - 10G mají podobnou hladinu odolnosti při odlévání, homogenizaci rekrytalizaci při procesu spojování jako slitina CMSX - 4.

Tabulka 17

20 Metoda: Kontrolovaná hladina namáhání v tlaku je hodnocena na celém povrchu testovací tyče v odlitém stavu. Pak je tyč homogenizována. Po homogenizaci je tyč rozdělena a opačná strana je zkoumána metalograficky. Je změřena hloubka rekrytalizace.

Hodnotové standarty:

25

Slitina	Hloubka rekrytalizace	Odolnost vůči rekrytalizaci předpokládaná u listových odlitků
CMSX - 4	0,004"	velmi dobrá
SX 792	celá tyč	velmi dobrá
CMSX - 10G	0,004"	velmi dobrá

30 Byly definovány a zhodnoceny kompozice CMSX-10Ga až -101a, -12B, -12C, -10J, -10Ri a -12Ri. U vzorků CMSX - 10J nevznikla žádná vlastnost pevnosti při tečení, ačkoli jsme vyrobili testovací tyče a homogenizovali je. U kompozice -10J se objevil vícemístek C a B, který má pozitivní vliv na monokrystalické utváření testovacího vzorku. Navíc nižší hladiny C a B než byly vyhodnoceny u vzorků CMSX-10F, zejména nižší hladina B, umožňovaly snadnější homogenizaci. Bylo dosaženo 98 až 99 % homogenizace na rozdíl od průměrných 95 % typických pro kompozici CMSX-10F.

35 Slitiny CMSX -10Ga a -101a byly projektovány s číslem N 1,0. Tyto vzorky obsahují 2,5 hmotnostních % Cr, 3,3 až 4,0 % hmotn. Co; 5,6 až 6,0 % hmotn. Re, vyšší poměr Ta/W, snížený Nb a snížený obsah Al + Ti. Toto snížení hladiny No + Al + Ti zlepšilo rozpustnost

materiálů (viz Tabulka 4) a navíc napomohlo k dosažení zvýšené stability slitiny. Oba vzorky vykázaly téměř plnou homogenizaci.

- Snížené číslo N<sub>V3B</sub> dále prokázalo účinnost při zlepšení pevnosti při tečení u teploty vyšší než 1038 °C (1900 °F) při zachování extrémně dobré pevnosti při tečení i za nižších teplot. Výsledky testů CMSX – 10Ga u vzorků vyrobených při zdokonalených kontrolách licího procesu prokázaly 700 a více hodin životnosti se 475 hodinami potřebnými k tečení do 1,0 % při 980 °C (1800 °F)/36,0 ksi. Při teplotní expozici vykazoval vzorek vyšší průměrnou životnost asi 500 hod. při 1121 °C (2050 °F)/15,0 ksi a průměrně 1% deformace při tečení, která se projevila po 250 hodinách, jak naznačují výsledky popsané v Tabulce 18.

Tabulka 18  
CMSX -10Ga pevnost při tečení

Testovací podmínky	zátěž h	% prodlouž.	% RA	Konečné údaje o tečení h		čas v hodinách k dosažení 1% deform.	čas v hodinách k dosažení 2% deform.
				%deform.	čas v hodinách k dosažení 1% deform.		
1800°F/36.0 ksi 982°C	500.7	19.9	25.2	499.7	19.541	316.5	360.1
	584.2	29.1	25.4	583.9	26.395	370.0	401.8
	505.1	22.6	29.8	503.7	18.212	307.4	347.3
	730.9	42.0	42.8	730.7	40.216	477.6	516.1
						460.6	
						428.5	
1850/36.0 1010°C	184.5	41.0	33.9	183.2	37.154	82.3	94.5
	291.5	27.3	29.9	290.2	19.323	191.6	207.8
	279.5	33.9	32.5	278.1	29.054	155.3	180.5
	323.9	30.9	36.6	322.9	29.218	194.1	217.1
	326.5+	8.9	12.6	-	-	-	-
	295.2+	33.3	33.5	-	-	-	-
						174.1	
						162.3	
1976/28.1 1080°C	300.1+	22.8	22.4	-	-	-	-
	88.6	34.9	33.9	88.6	25.502	39.7	48.9
	100.1	28.2	29.2	98.8	19.706	53.9	61.3
	107.9	28.8	31.4	107.0	23.657	51.1	62.1
	87.1	27.0	33.8	87.1	24.177	39.2	48.5
	82.8	23.3	27.7	81.0	17.301	20.6	38.0
	88.2	31.2	35.2	86.4	24.463	33.6	44.4
	83.7	34.0	34.3	83.4	29.718	36.3	45.1
	114.1	24.3	26.3	113.0	20.544	62.1	73.2
	122.3	18.3	21.3	120.7	15.740	76.5	86.0
	117.7	23.2	25.6	117.5	22.284	78.0	85.3
	Testy přerušeny		40.2	1.036	39.9	-	-
			43.4	1.187	42.3	-	-
	99.3+	60.1	38.8	-	-	-	-
1976/18.85 1080°C	127.9	41.5	34.5	127.5	37.493	51.2	62.6
	96.8	22.9	27.9	96.5	20.124	45.9	54.4
	118.9	31.3	27.1	118.0	24.603	49.5	61.3
	111.1	25.0	22.8	110.2	21.521	46.4	58.0
	96.6+	24.1	22.9	-	-	-	-
	120.5+	25.8	29.4	-	-	-	-
	113.0+	27.6	20.5	-	-	-	-
	Testy přerušeny		261.5	1.015	260.3	-	-
			207.2	1.017	204.6	-	-
	592.1	25.8	22.4	590.4	23.596	210.1	305.9
2050/15.0 1121°C	570.7	27.2	26.9	570.7	26.289	293.3	332.6
	535.5	19.3	23.9	535.2	17.513	308.2	344.2
						240.5	
						307.6	
	536.8	28.5	27.5	535.6	20.662	232.3	321.3
	497.0	23.7	23.9	496.2	17.600	260.3	317.9
2012/14.5 1100°C	514.8	23.4	24.4	513.1	12.500	230.4	340.4
	454.1	16.6	35.2	453.7	15.476	263.2	317.1
	420.3+	33.7	33.2	-	-	-	-
	Testy přerušeny		-	-	239.1	-	-
			-	-	189.6	-	-
2100/12.0 1149°C	-	-	-	-	-	280.3	-
	560.1+	-	22.9	-	-	-	-
	536.6+	7.3	8.1	-	-	-	-
	491.0+	-	16.7	-	-	424.6	-
1700/50.0 927°C	+ -						

+ zpracováno ze vzorku listu

- 5 Jednoprocentní pevnost při tečení je významná vlastnost. Omezení deformace při tečení na 1,0 až 2,0 % je velmi důležité při projektování součástí plynových turbin, protože užitnost komponentu je obecně měřena odolností proti tečení do průměrné úrovně 1 až 2 %, nikoli mezní silou při narušení materiálu. Mnohé původní slitiny mohou vykazovat velmi atraktivní tuto sílu při narušení při teplotní hladině nad 1038 °C, (1900 °F), mají však nedostatek užitečné síly, tj. mezi tečení do 2,0 %, které poskytuje tento vynález současně s daleko vyšší pevností v testech při teplotách pod 1038 °C (1900 °F).
- 10 Vzorky CMSX -1a měly také značně zvýšenou pevnost při tečení při vysokých teplotních extrémech, ale nevyvinula se síla tak vysoká jako u CMSX -10Ga při testech v nižších teplotách, což naznačují výsledky v Tabulce 19.

Tabulka 19

CMSX -10Ia      pevnost při tečení

Testovací podmínky	zatěž h	% prodlouž.	% RA	Konečné hodnoty tečení h	% deform.	Čas v hodinách k dosažení 1% 2%	
1800 °F/36.0 ksi 982 °C	532.0	34.8	32.7	530.7	33.000	259.1	312.5
	474.6	23.8	29.2	473.1	22.886	201.0	269.2
	374.3	20.0	21.0	372.8	19.238	171.1	214.7
1850/36.0 1010 °C	256.0	28.7	28.5	256.0	27.867	135.4	157.1
	251.4	34.4	30.3	250.7	33.055	121.6	144.6
	217.8	30.5	22.4	217.2	27.000	94.2	117.9
1976/28.1 1080 °C	85.7	27.5	28.9	83.8	21.754	36.9	46.2
	81.9	33.6	31.8	81.0	24.384	32.1	42.1
	68.9	26.1	25.8	67.6	20.960	23.1	32.4
2012/14.5 1100 °C	930.2	10.0	14.4	928.4	9.649	104.6	455.7
	844.4	17.7	23.2	842.8	16.132	339.7	502.3
	864.2	15.3	11.9	862.8	14.558	179.9	453.4
2050/15.0 1121 °C	510.2	17.8	19.7	508.4	15.703	187.2	312.7
	528.6	17.9	24.2	527.0	14.873	293.7	364.3
	438.8	14.3	11.3	436.4	13.556	56.0	136.9
2100/12.0 1149 °C	616.4	19.0	19.1	616.3	14.112	60.0	422.5
	467.7	19.1	26.1	466.0	11.373	273.6	374.8

15

Podobně i slitina CMSX -12B s číslem N<sub>V3B</sub> 1,80 a dodatkovým vyrovnaným chemickým složením, jak je uvedeno v Tabulce 1, prokázala značnou pevnost při tečení v testovacích podmínkách nad 1038 °C, (1900 °F) ale neprojevila se tak dobře jako CMSX -10Ga v testech při nižších teplotách, což dokládají výsledky popsané v Tabulce 20

20

Tabulka 20

CMSX - 12B      pevnost při tečení

Testovací podmínky	zatež h	% pracíková	%	Konečné hodnoty tečení		Čas v hodinách k dosažení	
				h	% deform.	1 %	2 %
1976°F/28.1 ksi	91.7	15.3	17.2	91.2	14.070	43.9	56.2
1080°C	72.6	19.4	23.2	72.6	17.396	27.4	36.8
	14.1	5.0	1.3	12.7	2.300	8.6	11.9
	98.1	16.9	17.6	96.4	13.670	17.8	38.9
	108.2	25.2	24.1	108.0	22.794	43.8	58.7
	106.9	24.7	24.2	106.3	21.024	46.1	60.1
	104.8	24.0	26.8	104.3	20.094	45.8	58.7
	104.3	26.8	21.4	103.2	22.347	48.6	60.8
1800/36.0	515.0	24.7	24.2	513.3	19.468	320.1	358.0
982°C	536.4	23.2	21.1	530.8	22.184	318.3	359.5
	304.7	13.2	19.9	302.9	12.582	166.0	200.8
1850/36.0	262.6	18.4	23.1	262.4	17.660	12.5	142.2
1010°C	1031.3	17.2	18.5	1029.5	15.113	428.0	703.7
2012/14.5	1078.7	15.6	20.0	1076.7	15.217	704.2	819.2
	839.4	14.9	22.8	839.2	9.282	607.6	677.7
	836.9	23.2	21.0	834.8	18.024	591.1	658.5
	722.0	16.4	21.1	721.9	15.913	170.8	333.6
	711.3	14.5	18.8	710.8	12.490	381.9	531.5
	711.9	18.3	20.0	711.4	16.201	447.7	530.7
2050/15.0	507.5	10.0	10.1	507.2	9.394	70.4	360.4
1121°C	434.0	17.5	16.8	434.0	13.847	241.7	309.0
2100/12.0	487.5	25.3	20.3	486.6	20.986	18.2	224.7
1149°C	444.9	7.8	11.0	442.2	3.884	347.3	413.6

5 Složení slitiny má největší vliv na maximální pevnost při tečení. Některé zjištěné odchylky mezi odvozenými slitinami a zejména nesourodé výsledky testů jedné slitiny však mohou být způsobeny změnami podmínek v odlévacím procesu. Změn v teplotním gradientu odlévacího postupu ovlivňuje rozmístění dendritických větví a konečně reakci na homogenizaci a prvotní gamma primární stárnutí. Je třeba vědět, že mnohé ze zde uváděných výsledků pevnosti při tečení mohly vzniknout třeba ne zcela optimálních podmínek a bylo by možno je zlepšit. Zlepšená kontrola odlévacího procesu podpoří vznik mikrostruktur přizpůsobivějších homogenizaci a bude možno zkoumat určení vhodného gamma primárního stárnutí, aby vznikla optimální velikost gamma primárních částic, z čehož může vyplynout další zlepšení mechanických vlastností.

10 15 Kompozice CMSX – 12C byla navržena tak, aby výpočet čísla  $N_{V3B}$  byl 1,70. Pro účel této slitiny byl obsah Cr navržen 2,8 hmotnostního % a Co 3,5 % hmotn. Poměr Ta/W byl ponechán, zatímco obsah Re byl omezen na 5,8 %. Obsah Al + Ti byl snížen ve srovnání se vzorky CMSX – 12A a CMSX – 12B, aby se zlepšila reakce slitiny při tavbě.

20 Podobně jako vzorek CMSX – 10Ga, vykázal i vzorek CMSX – 12 lepší pevnost při tečení v podmírkách od 980 °C (1800 °F) do 1149 °C, (2100 °F) což ukazuje Tabulka 21.

Tabulka 21

Testovací podmínky	zatěž h	CMSX -12C			pevnost při tečení				
		% prodloužení	% RA	Konečné hodnoty tečení	čas v hodinách k dosažení 1% deform.	čas v hodinách 1%	1%		
1800°F/36.0 ksi	465.2	31.8	21.0	464.5	30.543	173.0	262.4		
982°C	518.0	26.1	31.2	517.9	24.947	288.1	334.3		
	480.9	28.3	33.6	480.0	27.715	239.7	297.5		
	713.3	30.0	28.0	713.2	28.899	455.0	503.7		
1850/36.0	237.7	28.2	26.8	237.7	27.054	114.4	145.3		
1010°C	221.2	22.9	27.3	220.7	22.491	111.3	135.2		
	231.7	23.3	24.7	231.0	22.614	121.0	144.7		
	338.9	26.2	27.0	337.3	23.256	216.0	236.3		
	300.1+	-	-	-	-	-	-		
	295.2+	33.3	33.5	-	-	-	-		
1976/28.1	73.2	20.8	29.1	72.2	17.768	29.3	38.9		
1080°C	79.0	28.1	31.8	77.4	21.533	31.4	41.4		
	83.8	21.6	26.5	82.3	17.860	34.2	43.8		
	67.6	31.2	29.8	67.5	24.177	25.5	34.6		
	113.0+	-	-	-	-	-	-		
	79.4	-	-	-	-	30.8	-		
	76.2	-	-	-	-	32.8	-		
	68.8	-	-	-	-	29.3	-		
	118.1	26.0	28.0	116.2	23.822	49.3	62.0		
	-	-	-	-	-	29.0	-		
	Testy přerušeny	-	-	-	-	29.4	-		
	-	-	-	-	-	32.9	-		
1976/18.85 ksi	-	-	-	-	-	65.4	-		
1080°C	-	-	-	-	-	218.0	-		
	Testy přerušeny	-	-	-	-	271.9	-		
	-	-	-	-	-	168.9	-		
	-	-	-	-	-	116.4	-		
	-	-	-	-	-	240.5	-		
2012/14.5	1001.8	23.6	20.0	1000.7	23.348	249.6	542.8		
1100°C	865.5	20.7	26.1	864.8	18.807	418.2	569.3		
	-	-	-	-	-	61.9	-		
	-	-	-	-	-	267.1	-		
2050/15.0	509.4	13.7	22.3	508.0	12.860	158.1	315.1		
1121°C	546.4	15.6	23.6	546.4	14.044	323.0	404.0		
	-	-	-	-	-	180.8	-		
	-	-	-	-	-	44.2	-		
	-	-	-	-	-	240.7	-		
	-	-	-	-	-	190.9	-		
2100/12.0	404.3	11.2	21.6	404.3	8.438	290.1	326.4		
1149°C	321.7	9.5	15.0	320.4	7.671	156.6	254.1		
	545.1	8.2	22.1	542.2	5.351	236.0	452.9		
	457.4	8.6	23.4	455.8	6.612	309.3	380.9		
2100°F/12.0	371.4+	14.2	17.1	-	-	-	-		
1149°C	-	-	-	-	-	-	-		
1750°F/50.0	446.9+	16.8	20.4	-	-	-	-		
954°C	-	-	-	-	-	-	-		
1976°F/18.85	476.6+	19.2	27.1	-	-	-	-		
1080°C	459.9+	30.6	30.2	-	-	-	-		
1976°F/28.1 ksi	120.5+	24.1	22.9	-	-	-	-		
1080°C	99.6+	25.8	29.4	-	-	-	-		
2050°F/15.0 ksi	469.8	-	30.8	-	-	-	-		
1121°C	485.4	-	22.7	-	-	-	-		
2012°F/14.5 ksi	-	-	-	-	-	638.1	-		
1100°C	-	-	-	-	-	521.8	-		
	-	-	-	-	-	267.1	-		
	-	-	-	-	-	61.9	-		
+ zpracováno ze vzorků listu	-	-	-	-	-	395.7	-		

Při zlepšené kontrole odlévacího procesu vykázal tento vzorek následující 1% pevnost při podél-ném tečení, což je uvedeno v Tabulce 22

5

Tabulka 22

Testovací podmínky	Čas k 1% deformaci v hodinách
1800 °F/36,0 ksi 982 °C	455
2100 °F/12,0 ksi 1149 °C	309,3

Obě slitiny mají podobně zvýšenou mez pevnosti oproti slitině CMSX – 4 v podmínkách od 1080 °C (1976 °F). Následná zlepšení v teplotních vlastnostech kovu jsou opsána v Tabulce 23

Tabulka 23

Teploty	Průměrná přednost v pevnosti ve vztahu k CMSX – 4
982 °C (1800 °F)	4,4 °C (40 °F)
1010 °C (1850 °F)	7,2 (45 °F)
1080 °C (1976 °F)	6,1 °C (43 °F)

Založeno na 1% pevnosti při tečení, následující průměrná zlepšení jsou:

982 °C (1800 °F)	+ 7,8 °C (+46 °F)
1010 °C (1850 °F)	+15,5 °C (+60 °F)
1080 °C (1976 °F)	+12,8 °C (+55 °F)

15

Srovnání není korigováno měrnou hmotností.

Při testovací teplotě na 1080 °C (1976 °F) naznačují výsledky, že vzorky CMSX – 10Ga a CMSX – 12C vykazují poněkud nižší pevnost při CMSX-4. Nižší hladina zlepšení pevnosti u těchto slitin je pravděpodobně výsledem tvoření TCP fáze. Abychom vyřešili tento problém, bylo u slitin CMSX –10Gb, CMSX – 10L, CMSX – 12Ca a CMSX – 12E navrženo číslo N<sub>V3B</sub> 1,50 /viz Tabulka 1/, aby byla zajištěna vyšší fázová stabilita a mnohem vyšší mez pevnosti při zvýšených teplotách při zachování zlepšení pevnosti při tečení za podmínek 980 °C až 1080 °C (1800 °F až 1976 °F).

25

Kompozice CMSX –10Ri a CMSX – 12Ri byly navrženy s čísly N<sub>V3B</sub> 1,91 a 1,92. Tyto vzorky byly podrobny nejširšímu testování vlastností. Byly projektovány s hladinami 2,65 hmotnostních % respektive 3,65 % Cr a ostatními vlastnostmi podobnými dříve zmíněných návrhů slitin. Vlastnosti vytvořené u těchto dvou materiálů potvrzují celkovou koncepci vynálezu s ostatním opakováním materiálu pro vznik podobných fyzikálních vlastností a poměrně lepších mechanických vlastností.

Vlastnosti pevnosti při tečení vzorků slitin CMSX –10Ri a CMSX – 12Ri jsou popsány v Tabulkách 24 a 25.

35

Tabulka 24  
CMSX - 10(Ri) pevnost při tečení

Testové podmínky	záteč h	% prodloužen.	% RA	Konečné učelje o tečení h	%deform.	čas v hodinách k dosažení 1% 2%
1675°F/75.0 ksi 913°C	227.3	21.2	33.8	225.4	14.359	52.8
	231.6	19.3	31.0	231.3	16.671	51.0
	223.4	17.0	22.3	223.3	15.360	68.5
1750/50.0 955°C	425.9	18.3	33.7	425.6	16.047	303.4
	428.0	18.4	29.7	427.3	16.229	309.2
	460.8	17.1	25.7	459.0	15.308	314.7
1800/36.0 989°C	698.5	39.9	34.3	696.8	36.980	492.8
	676.3	28.3	33.3	674.5	27.221	479.0
	692.9	38.5	31.3	692.2	36.494	469.3
1850/36.0 1010°C	291.2	34.1	33.1	291.1	31.774	194.1
	260.0	29.3	32.1	258.8	25.321	170.2
	272.3	34.5	31.8	271.1	30.940	169.3
1850/27.56 1040°C	614.0	52.0	42.0	613.5	50.482	365.8
	576.3	49.7	39.0	575.9	49.183	345.1
	481.1	40.4	35.4	480.7	38.294	309.3
1976/28.1 1080°C	76.2	23.5	31.7	75.9	22.130	38.6
	80.5	19.0	26.3	79.8	14.665	44.3
	99.7	26.2	28.1	98.9	23.480	40.4
Testy přerušeny						41.4
Testy přerušeny						37.0
Testy přerušeny						40.5
1976/18.85 1080°C	265.6	29.5	35.7	264.7	29.010	158.7
	278.8	51.4	38.8	278.1	46.026	82.0
						139.7
Testy přerušeny						128.8
Testy přerušeny						100.1
2012/14.5 1100°C	490.8	40.2	33.5	490.5	37.678	286.5
	447.0	37.0	41.5	445.0	32.814	291.4
						113.5
Testy přerušeny						205.7
Testy přerušeny						202.2
2050/15.0 1121°C	251.9	33.6	35.9	250.0	25.559	100.0
	318.9	27.1	30.0	318.2	23.149	177.5
						181.0
Testy přerušeny						95.5
Testy přerušeny						34.5
2100/12.0 1149°C	400.3	17.9	27.2	400.1	17.877	102.8
	362.1	15.3	22.9	361.8	14.986	125.7
	389.5	19.9	24.0	388.2	19.510	41.1
Testy přerušeny						180.7

Tabulka 25

CMSX - 12(Ri) pevnost při tečení

Testové podmínky	Zátež h	% prodloužení	% RA	Konečné údaje		Čas v hodinách	
				o tečení h	% deform	k dosažení 1%	2%
1675°F/75.0 ksi 913°C	209.8	22.3	23.1	209.3	19.958	2.6	46.3
	191.4	14.3	17.4	189.7	12.483	1.6	42.5
	189.6	22.0	22.8	188.3	19.080	1.5	22.3
1750/50.0 955°C	448.1	26.7	26.6	447.9	26.054	302.3	335.5
	403.1	19.0	26.9	401.9	18.566	210.0	290.2
	435.0	19.4	26.9	434.4	18.503	89.1	284.1
1800/36.0 982°C	604.5	34.7	29.9	604.3	34.170	349.4	407.1
	583.6	37.0	32.0	581.3	30.443	391.3	420.6
	627.0	25.3	29.7	627.0	24.417	412.4	455.8
1850/36.0 1010°C	302.9	33.1	31.3	301.7	29.034	198.9	215.1
	314.4	32.0	27.1	312.7	27.479	201.4	220.2
1976/28.1 1080°C	90.0	19.7	29.2	88.5	16.627	33.9	48.8
	91.5	30.3	31.9	90.6	29.001	37.3	47.9
	68.6	35.3	32.2	68.4	28.869	17.3	27.6
Testy přerušeny						43.7	-
						41.4	-
						38.7	-
2012/14.5 1100°C	324.1	31.4	30.8	323.9	24.403	160.1	207.7
	481.4	30.9	31.9	481.1	29.581	129.9	299.6
	551.7	29.9	31.1	549.2	25.622	304.4	375.5
Testy přerušeny						256.1	-
						182.8	-
						101.5	-
2050/15.0 1121°C	243.4	36.1	35.0	243.3	20.614	143.1	174.2
	374.8	12.1	20.3	374.7	11.743	166.6	280.4
	463.6	15.4	25.9	463.3	13.594	245.7	363.3
2100/12.0 1149°C	488.0	20.3	25.9	487.1	19.550	25.7	118.9

Metoda a výsledky výzkumu mikrostrukturálního oddělení W a Re podniknutého na plně a částečně rozpuštěných vzorcích CMSX - 12Ri jsou popsány dále v Tabulce 26. Výzkum naznačil, že je zapotřebí minimalizovat množství reziduálních eutektik obsažených v mikrostrukturách, a to u plně rozpuštěných vzorků. Homogenizační postupy vyvinuté pro tento vynález jsou úspěšné v minimalizaci oddělování částic, což je důležité k získání optimálních mechanických vlastností a mikrostrukturální stability.

Tabulka 26

Slitina:	CMSX-12Ri										
5 Testovací vzorek:	Plná tyč o rozměrech 3/8"										
Stav vzorku:	Plně rozpuštěný										
10	Rozpuštěný se 2% reziduálních eutektik										
Metoda roztoku:	Mikroskopické analýzy + náhodné seskupení 350 bodů napříč řezem s pravým úhlem ke směru růstu 15 + 7 lineárních řezů, 51° od sebe, 50 bodových analýz v linii; standardní odchylky u měření W a Re jsou mírou homogenity.										
Výsledky:	<table border="0"> <tr> <td><u>CMSX-12Ri</u></td> <td>Standardní odchylky</td> </tr> <tr> <td></td> <td><u>W</u>      <u>Re</u></td> </tr> <tr> <td>plně rozpuštěné</td> <td>0,27      0,50</td> </tr> <tr> <td>2% reziduálních</td> <td>0,36      0,90</td> </tr> <tr> <td>eutektik</td> <td></td> </tr> </table>	<u>CMSX-12Ri</u>	Standardní odchylky		<u>W</u> <u>Re</u>	plně rozpuštěné	0,27      0,50	2% reziduálních	0,36      0,90	eutektik	
<u>CMSX-12Ri</u>	Standardní odchylky										
	<u>W</u> <u>Re</u>										
plně rozpuštěné	0,27      0,50										
2% reziduálních	0,36      0,90										
eutektik											
25	<u>Srovnání</u> Typická CMSX-4      0,57      0,60										

Tabulka 27 znázorňuje výsledky hořákového testu teplotní koroze u vzorku CMSX-12Ri. Měření byla uskutečněna na tyči v místech nejvyšší zátěže, tj. v místě s 900 °C (1652 °F) a ukázala, že slitina DS MAR M 002 měla přibližně 20 krát vyšší ztrátu než vzorek CMSX-10Ri. Obě slitiny CMSX-10Ri i CMSX-12Ri prokázaly podobnou odolnost vůči narušení jako CMSX-4, založenou na vizuální kontrole po 60, 90 a 120–ti hodinách.

Tabulka 27

Teplotní koroze
Metoda:
+ horák
950 °C (1742 °F)
40 2 ppm soli, standardní palivo
+ měření v bodu maximální zátěže, to bylo 900 °C (1652 °F)
+ měření byla uskutečněna v minimálním průměru užitečného kovu
Výsledky:
+ 90 hodinový test

Slitina	Původní rozměr	užitečný rozměr po testu	ztráta kovu na stranu
DS Mar M 002	6,88 mm	5,14 mm	0,87 mm /0,034"/
CMSX – 12Ri	6,86 mm	6,78 mm	0,04 mm /0,0016"/

45 Tabulka 28 popisuje výsledky cyklických oxidačních testů uskutečněných při 1100 °C s rychlosí plynů March 1. Vzorek CMSX –12Ri byl podobně odolný vůči oxidaci při 1118 °C, ale nebyl tak dobrý jako CMSX – 4 při expozici v 1030 °C.

## Tabulka 28

## Cyklický oxidační test

5

15 minutové cykly do 1100 °C (2012 °F)  
mezi cykly ochlazeno na okolní teplotu  
rychlosť plynu March 1  
celkem 89 hodin, z toho 77 hodin při 1100 °C (2012 °F)

10

Výsledek při 110 °C (2012 °F) CMSX - 12Ri  
průměrně 0,1 mm ztráty/strana při každých 300 cyklech  
CMSX - 4  
průměrně 0,1 mm ztráty/strana při každých 380 cyklech  
15                   při 1030 °C (1886 °F) CMSX - 12Ri  
průměrně 0,105 mm ztráty/strana při 335 cyklech  
CMSX - 4  
průměrně 0,03 mm ztráty/strana po 355 cyklech

20

Údaje o tahu při zvýšené teplotě u CMSX - 12Ri jsou popsány v Tabulce 29. Výsledky rázových testů jsou popsány v Tabulce 30. Minimální rázová pevnost při zvýšené teplotě u CMSX - 12Ri je podobná jako u CMSX - 4 a její maximum při 950 °C (1742 °F) je lepší.

25

Tabulka 29

Tahové údaje      CMSX - 12Ri

Test.teplota Laue		0,1% podíl ksi	10,2% ksi	jednotek		prodl.%	RA%
				ksi	ksi		
1382	2.3°	150.0	160.8	188.7	13	13	14
1382	2.3°	153.6	165.1	190.0	13	13	15
1562	6.2°	136.5	130.8	152.3	27	27	24
1562	6.2°	135.0	128.9	160.1	25	25	23
1742	5.6°	92.7	89.2	125.3	24	24	30
1742	5.6°	99.9	106.2	129.2	24	24	32
1922	3.8°	69.5	74.3	104.1	19	19	36
1922	3.8°	72.6	77.6	106.0	19	19	36

Tabulka 30

Rázové údaje

CMSX -12Ri  
0,35" hladké válcové vzorky

	Test Temperature °F			
	Tepložna °C	1382	1562	1742
	750	850	950	1050
CMSX-12 Ri (1 only) (pouze 1)	26 J	20 J	60 J	32 J
CMSX-4 (Ave. of 4) (průměr: 4)	26 J	21 J	42 J	45 J

Další srovnání rázových vlastností

- 5 \* CMSX – 2 – minimální rázová pevnost 16,5 Joulu.  
 \* SRR 99 – minimální rázová pevnost 20 Joulu.

10 Výsledky únavy materiálu při nízkém cyklu u CMSX – 12Ri uskutečněné při 750 °C a 950 °C při R=0 jsou popsány v Tabulce 31. Údaje naznačují, že výkon CMSX – 12Ri je podobný jako CMSX – 4 při 750 °C, zatímco při 950 °C má slitina průměrně 2,5 krát delší životnost než CMSX-4.

Tabulka 31

15 Únava při nízkém cyklu

Slitina CMSX – 12Ri  
R=0 /nula až maximum zátěže/

750 °C (1382 °F) vrcholná zátěž ksi /MPa/	cykly	950 °C (1742 °F) vrcholná zátěž ksi /MPa/	cykly
142 /980/	8686	110 /760/	4427
130 /900/	11950	99 /680/	15510
125 /860/	20810	87 /600/	37430
119 /820/	>100000	75 /520/	92580

- 25 \* výkon je podobný jako u CMSX –4 při 750 °C  
 \* porovnáno s CMSX-4 při 950 °C a při 2000 cyklech
- CMSX – 12Ri vykazuje 2,5 krát vyšší životnost a o 15 % vyšší pevnost.

Výsledky testu únavy při postupné spouštění nízkého cyklu prokazující, že CMSX –12Ri je 2,5 krát lepší než CMSX – 4 až do 3000 cyklů, ale při 5000 cyklech a více má podobné vlastnosti jako CMSX – 4. Výsledky těchto testů provedených při 750 °C, K<sub>t</sub> = 2,0 a R = 0 jsou popsány v tabulce 32

## Tabulka 32

Únava materiálu při postupném nízkém cyklu

5

CMSX – 12Ri

750 °C, (1382 °F), K<sub>t</sub> = 2,0, R = 0

Vrchná zátěž ksi /MPa/	Cykly
113,13 /780/	4879
107,33 /740/	9784
95,72 /660/	28470
84,12 /580/	49810
81,22 /560/	>115000
78,32 /540/	>115000
75,42 /520/	>115000

10

Výsledky jsou 2,5 krát lepší než u CMSX – 4 až do 3000 cyklů. Výsledky jsou podobné jako u CMSX – 4 při 5000 cyklech a výše.

15

Výsledky testu únavy při vysokých cyklech u CMSX – 10Ri jsou popsány v tabulce 33. Při 950 °C, 100 Hz a R = 0 vykazovala slitina 2,5 krát vyšší životnost než CMSX – 4.

## Tabulka 33

20

Únava materiálu při vysokém cyklu

CMSX – 10Ri

950 °C, (1742 °F) 100Hz, R = 0

25

Vrchná zátěž ksi /MPa/	Cykly /N <sub>f</sub> /
81,22 /560/	15,2 x 10 <sup>6</sup>
92,82 /640/	3,59 x 10 <sup>6</sup>
104,43 /720/	0,6 x 10 <sup>6</sup>

Životnost je 2,5 krát lepší než u CMSX – 4.

30

Testované údaje u CMSX – 10Ri a CMSX – 12Ri naznačují, že odolnosti vůči teplotní korozi a vůči oxidaci lze dosáhnout při extrémně nízkém obsahu chromu ve slitině. Navíc se projevuje u vynalezených slitin velmi dobrá pevnost při termomechanické tahové námaze a rázová pevnost.

Výsledky měření hustoty vzorků obsahuje Tabulka 34

35

## Tabulka 34

Údaje o hustotě monokrystalické slitiny

Slitina	Hustota g/cm <sup>3</sup>
CMSX – 10A	8,94
CMSX – 10B	8,94
CMSX – 10C	8,97
CMSX – 10D	8,97
CMSX – 10E	8,97
CMSX – 10F	8,92
CMSX – 10G	8,89
CMSX – 10Ga	8,89
CMSX – 10H	8,94
CMSX – 10I	8,89
CMSX – 10Ia	8,89
CMSX – 10J	9,03
CMSX – 10Gb /10K/	9,08
CMSX – 12A	8,92
CMSX – 12B	8,97
CMSX – 12C	9,00
CMSX – 12Ca /12D/	9,00
CMSX – 10Ri	9,00
CMSX – 12Ri	8,92

Vynalezené slitiny jsou přizpůsobivé ke zpracování metodou HIP. Vzorky zpracované metodou HIP, popsané v Tabulce 35, mají téměř zcela uzavřené póry a absenci počátečního tání.

5

#### Tabulka 35

#### Podmínky HIP

10

- Teplotní vzorky v HIP nádobě do 1346 °C (2455 °F) ponechané při minimálním tlaku argonu /průměrně 1500 psi/ po 4 hodiny. 1346 °C/1500 psi
- Při pracovní teplotě 1346 °C, (2455 °F) po dobu 1 hod. zvýšený tlak aronu na 20 ksi.  
Vzorky prohřívané po dobu 4 h. při 1346 °C, (2455 °F)/20 ksi.

15

Popsali jsme vynález s ohledem na jeho určité složky a je jasné, že odborníci se běžně setkávají s četnými jinými formami a modifikacemi. Připojené patentové nároky jsou obecně sestaveny, takže zahrnují všechny tyto běžné formy a modifikace, které jsou skutečnou podstatou tohoto vynálezu.

#### Průmyslová využitelnost

20

Vysoko legovaná slitina z tohoto vynálezu je vhodná k použití při výrobě monokrystalických součástek jako jsou komponenty pro motory turbin. Přednostně je tato slitina užitečná k výrobě monokrystalických odlitků pro použití při vysokém tlaku a teplotě a je charakteristická zvýšenou odolností při tečení v těchto podmínkách, zejména při teplotě až do 1080 °C (1976 °F). Jelikož tuto vysoko legovanou slitinu lze použít k jakémukoli účelu vyžadujícímu odlévání slitiny s vysokou pevností tvořící monokrystaly, je její konkrétní použití zejména při odlévání monokrystalických listů a lopatek motorů plynových turbin. Tato slitina má neobvyklou odolnost proti rekristalizaci během homogenizace, jež je považována za důležitou vlastnost nezbytnou při uplatnění pokrokové technologie při mnohosoučástkovém odlévání spojených monokrystalických vzduchových listů. Navíc má tato slitina tavící vlastnosti nezbytné pro běžné odlévání menších turbinových vzdušných listů se složitými chladicími kanály.

30

35

5 Zatímco první použití této slitiny je pro turbiny leteckých motorů, jsou také aplikovány na stacionární motory, kde jsou požadovány zvláště vysoké výkonné charakteristiky. To platí zejména pro motory turbin, od kterých jsou vyžadovány vysoké výkony s velmi omezenou světlostí a mají tudíž materiálově omezený rozsah povoleného tečení.

10

## PATENTOVÉ NÁROKY

15 1. Vysoce legovaná slitina na bázi niklu, **vyznačující se tím**, že obsahuje, v % hmotnostních, následující složky

rhenium	5,0	až	7,0
chrom	1,8	až	4,0
kobalt	1,5	až	9,0
tantal	7,0	až	10,0
20 wolfram	3,5	až	7,5
hliník	5,0	až	7,0
titan	0,1	až	1,2
molybden	0,25	až	2,0
niob		až	0,5
25 hafnium		až	0,15

zbytek nikl a obvyklé doprovodné nečistoty, přičemž vykazuje fázové stabilizační číslo  $N_{V3B}$  menší než 2,10.

30 2. Vysoce legovaná slitina na bázi niklu podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje, v % hmotnostních, následující složky:

uhlík	až	0,04
bór	až	0,01
35 yttrium	až	0,01
cer	až	0,01
lanthan	až	0,01

40 3. Vysoce legovaná slitina na bázi niklu podle nároku 2, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje, v % hmotnostních, následující složky:

mangan	až	0,04
křemík	až	0,05
zirkonium	až	0,01
45 síra	až	0,001
vanad	až	0,10

45 4. Vysoce legovaná slitina na bázi niklu podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že vykazuje fázové stabilizační číslo  $N_{V3B}$  menší než 1,85.

50 5. Vysoce legovaná slitina na bázi niklu podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že vykazuje obsah chromu 1,8 až 3,0 % hmotnostních.

55 6. Vysoce legovaná slitina na bázi niklu podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že vykazuje obsah rhenia 5,5 až 6,5 % hmotnostních.

7. Vysoce legovaná slitina na bázi niklu podle nároku 1, vyznačující se tím, že vykazuje obsah kobaltu 2,0 až 5,0 % hmotnostních.

5 8. Vysoce legovaná slitina na bázi niklu podle nároku 1, vyznačující se tím, že obsahuje, v % hmotnostních, následující složky:

	rhenium	5,5	až	6,5
	chrom	1,8	až	3,0
10	kobalt	2,0	až	5,0
	tantal	8,0	až	10,0
	wolfram	3,5	až	6,5
	hliník	5,3	až	6,5
	titan	0,2	až	0,8
15	molybden	0,25	až	1,5
	niob		až	0,3
	hafnium	0,02	až	0,05

20 zbytek nikl a obvyklé doprovodné nečistoty, přičemž vykazuje fázové stabilizační číslo N<sub>V3B</sub> menší než 1,75.

9. Vysoce legovaná slitina na bázi niklu podle nároku 8, vyznačující se tím, že dále obsahuje, v % hmotnostních, následující složky:

25	uhlík	až	0,04
	bór	až	0,01
	ytrium	až	0,01
	cer	až	0,01
	lanthan	až	0,01

30 10. Vysoce legovaná slitina na bázi niklu podle nároku 9, vyznačující se tím, že dále obsahuje, v % hmotnostních, následující složky:

35	mangan	až	0,04
	křemík	až	0,05
	zirkonium	až	0,01
	síra	až	0,001
	vanad	až	0,10

40 11. Použití vysoko legované slitiny na bázi niklu podle kteréhokoliv z předchozích nároků 1 až 10 pro přípravu monokrystalických součástí.

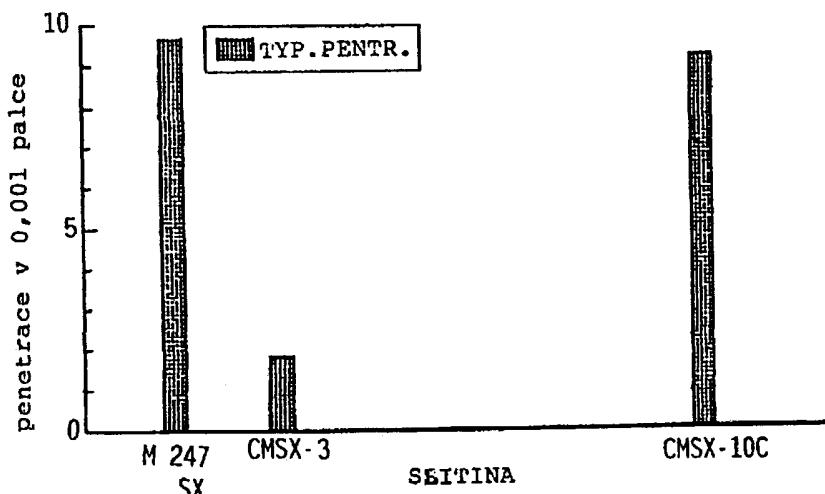
45 12. Použití vysoko legované slitiny na bázi niklu podle kteréhokoliv z předchozích nároků 1 až 10 pro přípravu monokrystalických součástí turbínových motorů, zejména listů a věnců lopatek plynových turbín.

50 13. Způsob výroby součásti, vyznačující se tím, že se součást odlije jako monokrystal z vysoko legované slitiny na bázi niklu podle kteréhokoliv z předchozích nároků 1 až 10 a odlitek stárne při teplotě 1065 °C (1950 °F) až 1163 °C (2125 °F) po dobu 1 až 20 hodin.

HC # 35

VÝSLEDKY TESTU TEPLOTNÍ KOROZE

899°C, 1% SÍRY, 10 PPM MOŘSKÉ SOLI, 117 HODIN



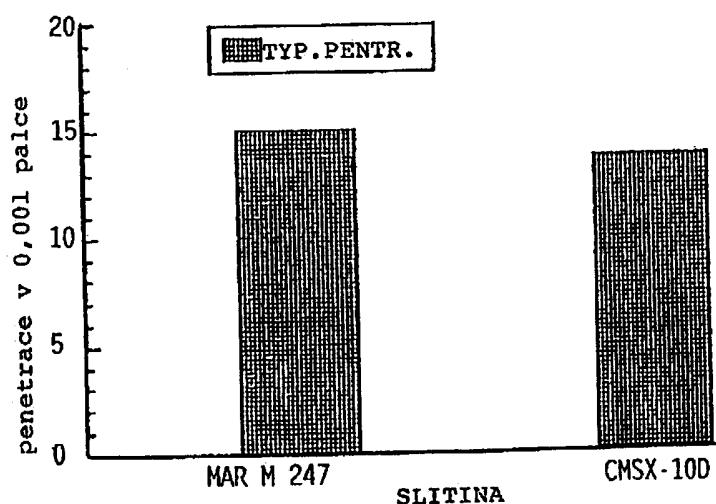
TYP. PENTR. = průměrná hloubka zasažení korozí na  
jehlách ve skupině

**OBR. 1**

HC # 35

VÝSLEDKY TESTU TEPLOTNÍ KOROZE

899°C, 1% SÍRY, 10 PPM MOŘSKÉ SOLI, 144 HODIN



TYP. PENTR.= průměrná hloubka zasažení korozí na  
jehlách ve skupině

**OBR. 2**

---

Konec dokumentu

---