



ÚŘAD PRO VYNÁLEZY  
A OBJEVY

(22) Přihlášeno 18 10 79  
(21) PV 7075-79  
(32) (31) (33) Právo přednosti od 25 10 78  
(954386) Spojené státy americké

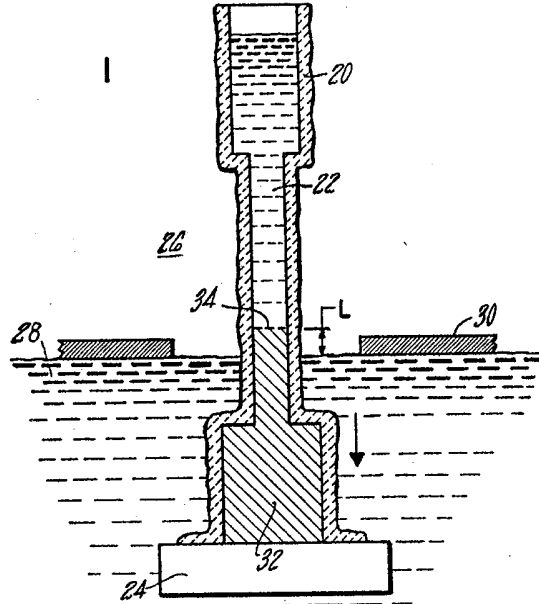
(51) Int. Cl.<sup>4</sup>  
B 22 D 27/04

(40) Zveřejněno 15 02 84  
(45) Vydáno 15 09 88

(72) Autor vynálezu GIAMEI ANTHONY FRANCIS, MIDDLETOWN, CONNECTICUT (Sp. st. a.)  
(73) Majitel patentu UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION, HARTFORD, CONNECTICUT (Sp. st. a.)

(54) Způsob přemísťování usměrněně tuhajícího kovového odlitku

Odlitek s odlišnými poměry obvodu k průřezové ploše se přemísťuje z horké zóny do chladné zóny k vyvolání pohybu rozhraní tuhnutí kovu, ležícího mezi izotermou likvidu a izotermou solidu, odlišnými rychlostmi. Přejít z jedné rychlosti přemísťování na druhou rychlost se provádí spojitě v průběhu průchodu rozhraní tuhnutí oblastí změny poměru obvodu odlitku k jeho průřezové ploše a změna rychlosti má stejný smysl jako tento poměr.



2

Výnález se obecně týká odlévání a usměrněného tuhnutí odlitků, při kterém se záměrně mění rychlost přemísťování tuhnoucího odlitku z horké zóny, kde má kov teplotu nad teplotou likvidu, do chladné zóny s teplotou pod teplotou solidu.

Usměrněné tuhnutí je postup pro výrobu kovových výrobků se seřazenou strukturou a tedy s výhodnými mechanickými vlastnostmi. Způsoby a zařízení k výrobě odlitků ztuhlých usměrněným tuhnutím jsou z literatury dobře známy. Z obchodního hlediska se jeví nejvýhodnější způsob, při kterém se kokila po dolití kovu svisle přemísťuje z horké zóny pece do studené zóny rychlostí, při níž se rozhraní tuhnutí pohybuje uvnitř odlitku stejnoměrně směrem nahoru podél jeho hlavní osy napětí.

Dřívější zdokonalení způsobu se týkala regulace teplot horké zóny pece, prostorového uspořádání dna kokily, izolace přepážkami mezi horkou zónou a studenou zónou a zvyšování tepelných ztrát v chladé zóně. V praxi se dosud postupovalo tak, že se odlitky přemísťovaly z horké zóny stejnoměrnou rychlostí nebo se při stejnoměrné rychlosti zařazovaly střídavě stacionární periody, jak je popsáno v pat. spise Sp. st. a. č. 3 700 023.

Optimální rychlost přemísťování je funkcí uspořádání celého zařízení, uspořádání a složené kokily, charakteristických vlastností slitiny při tuhnutí, mikrostruktury, kterou má mít odlitek a ekonomických úvah. Jedním z nejdůležitějších vztahů je vztah mezi teplotním gradientem  $G$  a rychlostí tuhnutí  $R$ . U většiny eutektických vysoce legovaných slitin, kde se používá usměrněného tuhnutí, obecně platí, že poměr  $G/R$  musí převyšovat určitou hodnotu charakteristickou pro každou slitinu a označovanou  $(G/R)^X$ . Nejčastěji se tato hodnota rovná poměru  $\Delta T/D$ , kde  $\Delta T$  značí rozmezí tavení slitiny a  $D$  je difúzní koeficient rozpuštěných atomů v kapalném kovu.

Z toho vyplývá, že k dosažení maximální přípustné rychlosti tuhnutí a tedy ke zvýšení výroby a snížení reakcí mezi kokilou a kovem je žádoucí zvětšit teplotní gradient  $G$  v roztaveném kovu. Jeden z výhodných způsobů, směřujících k tomuto cíli, je popsán v pat. spisech Sp. st. a. č. 3 763 926 a č. 3 915 761, podle kterých se kokila při přechodu do chladné zóny ponořuje do roztaveného kovu; tento technologický postup se nazývá chlazení tekutým kovem.

Zkušenost ukazuje, že k vytvoření výhodné mikrostruktury kovu je žádoucí udržovat rozhraní tuhnutí v podstatě rovinné, to znamená kolmé ke směru tuhnutí. Důvod tohoto opatření vyplývá z následující úvahy: Když při pevném teplotním gradientu  $G$  je rychlost tuhnutí  $R$  příliš vysoká nebo příliš nízká, je rozhraní tuhnutí konvexně zakřivené nahoru nebo dolů. Tento stav ukazuje, že mikroskopický růst uvnitř slitiny není srovnán s hlavní osou, podle které odlitek tuhne. Následkem toho má odlitek v závislosti na skutečné odchylce od jednosměrného růstu odlišný krystalografický nebo zrnitý růst a tedy horší kvalitu. Když mimo to odlitek tuhne příliš rychle, mohou vznikat před rozhraním tuhnutí krystalizační zárodky, což poruší žádanou stejnosměrnou směrovou nebo krystalografickou povahu tuhnutí. Když je naopak rychlost tuhnutí příliš malá, je pravděpodobné, že dendrity se znovu roztaví a že dojde ke vzájemnému působení mezi tuhoucím kovem a kokilou, které zhoršuje kvalitu slitiny, a mimo to doba zpracování je příliš dlouhá a tedy neekonomická.

Vzájemné vztahy mezi uvedenými parametry při tuhnutí podrobně popsali Giamei, Erickson v článku "Computer Applications in Directional Solidification Processing", publikovaném v Proceedings of the Third International AIME Symposium on Superalloys, Seven Springs, Pennsylvania, 19. září 1976, str. 405-424; B. Kear, Ed., Claitor, Baton Rouge, La., 1977.

Zkušenosti ukazují, že optimální tuhnutí nastává za takových podmínek, když je rychlost přemísťování z horké do chladné zóny maximální a přitom nedochází k tvorbě krystalizačních zárodků. Tyto podmínky dávají rovněž optimální hospodářské výsledky. Proto směřují všechna zlepšení techniky usměrněného tuhnutí k tomu, aby se v odlitku vytvořily tyto podmínky.

Když má kokila konstantní průřez a je umístěna v zařízení, které vytváří v konkrétní slitině konkrétní teplotní gradient, lze maximální rychlost přemísťování určit a realizovat. Většina vyráběných produktů však má proměnlivý průřez; dobrým příkladem je profil lopatek plynové turbíny, které mají silnou patu, tenký a obvykle zkosený list a často těžší bandáž na konci středního profilu.

U takových výrobků se dosud postupovalo tak, že se zvolila pevná rychlost přemísťování, která zajišťovala uspokojivé ztuhnutí jak silné, tak tenké části při průchodu rozhraním tuhnutí. Takový postup samozřejmě vyžaduje určitý kompromis, pokud jde o optimální volbu uvedených parametrů, a jeho výsledkem je kompromisní struktura v jednotlivých úsecích odlitku s odlišnými rozměry. Poněvadž maximální rychlost je určována těžším úsekem odlitku, ze kterého se obtížněji odvádí teplo a v němž je velice těžké vytvořit strmý teplotní gradient, je rychlost výroby samozřejmě omezená.

Usměrněného ztuhnutí lze použít k výrobě odlitků libovolného složení pro jakékoli použití, avšak v poslední době se především používá k výrobě tří stále běžnějších, nicméně velice moderních kategorií materiálů pro plynové turbíny; materiálů se sloupkovou strukturou, monokrystalických materiálů nebo srovnaných eutektických materiálů. Četné komerční vysoce legované slitiny byly transformovány na sloupkovou strukturu a do monokrystalického tvaru, jiné specializované slitiny byly přímo vyvinuty pro uvedené konstrukce. Eutektické slitiny, vhodné k uvedenému účelu, jsou typickými slitinami s velkým počtem prvků a s velice úzkým teplotním rozdílem mezi liquidem a solidem; tento rozdíl bývá 3 až 11 °C.

U těchto slitin je velice často obtížné dosáhnout tuhnutí usměrněným způsobem, poněvadž parametr  $\Delta T/D$  a v důsledku toho i poměr  $(G/R)^x$  je vysoký, řádově  $125 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-2}$ , a i při vysokém teplotním gradientu  $G$  je maximální rychlost  $R$  tuhnutí poměrně nízká, většinou nižší než  $3 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$  a bez pečlivé regulace se snadno překročí.

Při teplotním gradientu daném zařízením, lze vliv rychlosti  $R$  na mikrostrukturu zmíněných typů slitin shrnout takto: Při nízkých hodnotách  $R$  v slitinách na bázi niklu vzniká planární mikrostruktura. Když se  $R$  zvyšuje, vzniká celulární a poté dendritická struktura. S těmito změnami mohou souviset zlepšené vlastnosti odlitků, pokud jde o pevnost v tahu a mez tečení. V eutektických slitinách je průběh podobný s tím rozdílem, že při velmi nízké rychlosti růstu může vzniknout lamelární nebo "lichoběžníková" struktura. Když se rychlost zvyšuje, struktura se zjemňuje a stává se celulární a potom dendritickou.

Je dávno známe, že je nezbytné pečlivě regulovat tepelné podmínky a rychlost usměrněného tuhnutí. Například v pat. spise Sp. st. a. 3 124 452 je popsán způsob jednosměrného tvoření eutektických slitin se vzájemně oddělenými lamelami, při kterém se reguluje rychlost tuhnutí a teplotní gradient a současně se sleduje poměr mezi nimi tak, aby ležel v širokém rozmezí od 0,2 do  $1\ 000 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{hod}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Nezbytnost vysokého teplotního gradientu a co nejvyšší rychlosti tuhnutí, kterou při tom lze dosáhnout se uvádí v pat. spise Sp. st. a., 3 677 835, kde se popisuje potlačení houbovitě zóny před rozhraním tuhnutí, aby se zabránilo dendritickému růstu a aby vznikly celulární a rovinné struktury v niklových slitinách, zejména v jakostních slitinách s vysokým gama.

V uvedeném spise se popisují nízké rychlosti tuhnutí řádově  $0,5 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ . V dalším pat. spise Sp. st. a. č. 3 897 815 se popisuje využití tepla horké zóny při různých rychlostech růstu, aby bylo možno regulovat roztavený stav odlitku a směrovost tuhnutí při odváděné kokily z horké zóny. V tomto spise je rovněž zmínka o vzájemné vazbě mezi přemísťováním kokily s odlitkem a mezi zahříváním podle obecného vztahu  $G/R$ .

Někdy se postupuje tak, že po vlití kovu do kokily se podmínky nemění nebo se mění pouze pomalu, aby se kov mohl stabilizovat uvnitř kokily a aby se dosáhlo dobrého počátečního růstu zrn nebo krystalů, počínaje od dna kokily nebo od zárodečného monokrystalu. Třebaže je znám vzájemný vztah parametrů závislých na zařízení a parametrů závislých na materiálu

a jejich vliv na odlitek, neprováděla se dosud výroba odlitků složitého tvaru jinak, než na základě kompromisní jedné rychlosti přemísťování nebo případně s jedinou změnou rychlosti růstu. Lze to přičítat směru a stavu vývoje techniky usměrněného tuhnutí.

Tyto pochody vznikly v laboratoři a byly vypracovány pro vzorky s jednoduchým a konstantním průřezem, kde je konstantní rychlost naprosto vhodná. Poznatky pak byly převedeny jako celek do výroby, která byla teprve v začátcích, a do předběžné výroby složitých tvarů. V současné době však působí ekonomické stimuly k tomu, aby se technologické postupy optimalizovaly. Mimoto byla lépe poznána důležitost mikrostruktury kovů, poněvadž konstruktéři postupně častěji používají nových materiálů na mezích pružnosti, takže je nezbytné přesněji regulovat tuhnutí. Dalším faktorem je použití různých slitin, které jsou mnohem citlivější než dosavadní slitiny, pokud jde o závislost vlastností na mikrostruktuře a závislost mikrostruktury na rychlosti tuhnutí.

Výroba turbinových lopatek z eutektických slitin, které mají různé tvary, například rovný profil s rovnosou patou, je popsána v pat. spise Sp. st. a. č. 3 790 303. Při popsané výrobě byly měněny podmínky při tuhnutí odlitku, avšak pouze do míry nezbytné k dosažení různé struktury uvnitř odlitku; problémy spojené se vzájemnou závislostí podmínek při tuhnutí a změn průřezu odlitku se však zřejmě vůbec nevyskytovaly.

Třebaže tedy byla v omezeném rozsahu seznána nůstnost změny růstu a rychlosti odlitku od jednoho průřezu odlitku ke druhému, neexistuje v dosavadním stavu techniky systematický způsob volby rychlostí od jednoho průřezu odlitku ke druhému, ani náznak řízeného přechodu z jedné rychlosti do druhé.

Cílem vynálezu je zlepšit usměrněné tuhnutí použitím různých rychlostí přemísťování odlitku s různými průřezem odlitků a regulace rychlosti tohoto přemísťování a vyrobít výrobky z kovu s usměrněným tuhnutím tak, aby měly stejnoměrnou mikrostrukturu i při proměnlivém poměru obvodu k průřezu, dále přechodové úseky se žádanými vlastnostmi nebo mikrostrukturu v jednotlivých úsecích odlitku tak, aby odpovídaly požadavkům kladeným na mechanické vlastnosti příslušné části odlitku.

Předmětem vynálezu je způsob přemísťování usměrněně tuhajícího kovového odlitku, který má po délce odlišné poměry obvodu k průřezové ploše, z horké zóny o teplotě nad teplotou likvidu do chladné zóny o teplotě pod teplotou solidu kovu k vyvolání pohybu jmenovitého rozhraní tuhnutí, ležícího mezi izotermou likvidu a izotermou solidu, nejméně dvěma vzájemně odlišnými rychlostmi. Podstata vynálezu spočívá v tom, že přechod z jedné rychlosti přemísťování odlitku na další rychlost, při změně poměru obvodu odlitku k jeho průřezové ploše, se provádí spojitě v průběhu průchodu rozhraní tuhnutí oblastí této změny, přičemž rychlost pohybu rozhraní tuhnutí se mění ve stejném smyslu jako poměr obvodu odlitku k jeho průřezové ploše.

Způsobem podle vynálezu lze vyrobít odlitky s různým průřezem, které mají v celém objemu požadovanou mikrostrukturu a jsou prosté vad, jež jsou jinak výsledkem kompromisní stejnoměrné rychlosti přemísťování, a mají lepší strukturu a vlastnosti než odlitky vyrobené s přechody mezi různými rychlostmi přemísťování bez regulace podle předem stanoveného vztahu.

Vynález zvyšuje použitelnost těchto výrobků, protože snižuje rozptyl jejich vlastností, který je nezbytným úkazem při hromadné výrobě. Při odlévání slitin citlivých na jednotlivé parametry, umožňuje vynález rychlou a hospodárnou výrobu odlitků, které jsou prosté vad, jako je náhodná tvorba krystalizačních zárodků, mikrosegregace, pórovitost a nepříznivé karbidy.

Vynález rovněž umožňuje tuhnutí eutektických odlitků složitého tvaru se srovnanou mikrostrukturou, které mají nejméně 90 % lamel nebo vláken ve své struktuře a regulovanou vzájemnou vzdálenost lamel. Dále lze podle vynálezu vyrobít odlitky se sloupkovou strukturou, které

mají požadovanou vzdálenost mezi dendrity a srovnaná zrna jak ve větších, tak v menších průřezech, a monokrystalické odlitky s požadovaným odstupem dendritů a minimálními defekty krystalografické orientace. Ve všech těchto odlitcích lze vytvořit požadované mikrosložení a dosáhnout lepších vlastností.

Vynález bude vysvětlen v souvislosti s příloženými výkresy, kde značí obr. 1 svislý řez částečně usměrněně ztuhlým odlitkem, který je částečně přemístěn z horké zóny a ponořen do chladicí zóny s tekutým kovem, obr. 2 typický odlitek s naznačenými rychlostmi přemístění a růstu, obr. 3 odlitek s měnicími se rozměry jednotlivých jeho částí a odpovídající křivku přemístování, obr. 4 křivku rychlostmi přemístování z obr. 3, v závislosti na čase, obr. 5 graf znázorňující alternativní křivky rychlosti přemístování a obr. 6 lopatku turbíny a příslušnou křivku rychlosti přemístování.

Výhodné provedení vynálezu bude popsáno v souvislosti s výrobou odlitku z vysoce legované slitiny, například turbínové lopatky, s použitím způsobu přemístování odlitku a chlazení tekutým kovem. Předpokládá se, že horká zóna a chladná zóna s kapalným kovem mají pevné teploty, což znamená, že teplotní gradient v odlitku je konstantní.

Je ovšem samozřejmé, že vynález je rovněž použitelný pro jiné typy zařízení k přemístování odlitku, včetně těch typů, které mají horké zóny s proměnlivou teplotou, radiální chlazení a jinou konfiguraci kokily. Vynález je samozřejmě použitelný pro všechny kovy a tvary, které lze zpracovávat tuhnutím.

Zařízení k tuhnutí odlitku způsobem podle vynálezu je znázorněno na obr. 1. Kokila 20, naplněná roztaveným kovem 22, je připevněna ke kokilovému dnu 24. Kokila 20, která byla zpočátku úplně v horké zóně 26, se postupně přemísťuje do chladné zóny 18 pohybem kokilového dna 24. Přepážka 30, které se často používá, snižuje přenos tepla mezi horkou zónou 26 a chladnou zónou 28. Roztavený kov 22 se mění na ztuhlý odlitek 32 odnímáním tepla, které je odváděno kokilovým dnem 24 a chladnou zónou 28 kokilu 20. Hranice mezi ztuhlou částí 32 a roztaveným kovem 22 je rozhraním tuhnutí 34. Při normálním přemístování leží rozhraní tuhnutí 34 v blízkosti přepážky 30, to znamená v blízkosti přechodu mezi horkou zónou 26 a chladnou zónou 28.

Na obr. 1 je znázorněno toto rozhraní vzdáleností L nad hladinou roztaveného kovu. Když je rychlost přemístování příliš vysoká, pohybuje se rozhraní tuhnutí 34 směrem ke chladné zóně 28 a může dostat vypouklý tvar směrem nahoru. Když je naopak rychlost přemístování příliš malá, leží rozhraní tuhnutí 34 blíže k horké zóně 26 nad přepážkou 30, což znamená, že vzdálenost L se zvětšuje, a mimoto může mít rozhraní tuhnutí 34 vydutý tvar směrem dolů.

V prvním případě je přenos tepla v chladné zóně 28 nedostatečný k odvedení měrného a skupenského tepla z roztaveného kovu rychlostí souměřitelnou s rychlostí přemístování; ve druhém případě chlazení v chladné zóně 28 a přes střední část ztuhlého odlitku stačí k tomu, aby se rozhraní tuhnutí 34 pohybovalo po délce odlitku rychleji než je rychlost přemístování, a to tak dlouho, až dosáhne bodu ustálené rovnováhy. Je samozřejmé, že změna teploty a přenosu tepla do horké zóny 26 nebo změna rychlosti přemístování by měla na vzdálenost L podobný účinek při ostatních parametrech konstantních.

V následujícím popise znamená jmenovité rozhraní tuhnutí průměrnou polohu izotermy solidus-likvidus v tuhoucím odlitku. Ve většině komerčních slitin je mezi solidem a likvidem značný teplotní rozdíl. V důsledku toho neexistuje ostře definované rozhraní mezi tuhou a pevnou fází, nýbrž vzniká tak zvaná houbovitá zóna, jejíž axiální délka se mění podle slitiny, teplotního gradientu, rychlosti přemístování atd. Třebaže zařízení z obr. 1 je popisováno v souvislosti s přemístováním odlitku, je samozřejmé, že v obecném případě je nezbytný pouze posuvný pohyb kokily vůči horké a chladicí zóně.

V rámci vynálezu lze tedy přemísťovat translačním pohybem horkou a chladnou zónu vzhledem k pevné kokile a k pevnému kokilovému dnu. V následujícím textu bude ukázáno, že existuje žádoucí vzájemný vztah mezi rychlostí přemísťování  $\underline{W}$  a rychlostí tuhnutí  $\underline{R}$ . Rychlost tuhnutí  $\underline{R}$ , alternativně nazývaná rychlost růstu, je ta rychlost, jakou se pohybuje rozhraní tuhnutí roztaveným kovem.

Na obr. 2 je znázorněn válcový odlitek, který má po délce odlišné průřezy. Na takovém typickém odlitku lze dobře provádět analýzu rychlosti přemísťování a její vliv na rychlost růstu neboli tuhnutí. Podle obr. 2a má roztavená část 36 kovu skupenské teplo tuhnutí úměrné svému objemu. Během přemísťování závisí přenos tepla z této části 36 na velikosti válcové povrchové plochy 42. Poměr mezi teplem vázaným v této části 36 a teplem přeneseným z této části 36 lze tedy charakterizovat jako poměr povrchové plochy k objemu.

Když se délka části 36 postupně zmenšuje tím, že se k sobě přibližují obě omezující roviny 38, 40 tak blízko, až je jednotková délka části 36 nepatrná, lze jednotkovou axiální délku zanedbat a poměr povrchu k objemu vyjádřit jako poměr obvodu  $\underline{P}$  k průřezu  $\underline{A}$  neboli  $\underline{P/A}$ . Předchozí popis se týká velice jednoduchého odlitku, lze však jej aplikovat i na odlitky složitějšího průřezu.

V právě popsaném případě značí  $\underline{P}$  obvod odlitku. Třebaže  $\underline{P}$  souvisí s vnějšími rozměry odlitku, v případě sekce obklopené kokilou se musí brát v úvahu také rozměr kokily. Po vrácení se k obr. 1, musí se  $\underline{P}$  uvažovat jako míra jednotkové plochy, která ovlivňuje přenos tepla ze ztuhlého odlitku 32 přes kokilu 20 do chladné zóny 28. V důsledku toho se musí  $\underline{P}$  upravit při změně kteréhokoli faktoru vyvolávajícího změny v přenosu tepla, jako jsou změny tloušťky kokily, změny složení, hrubosti povrchu a ostatních parametrů v ose odlitku. Běžně není potřeba tyto úpravy provádět, poněvadž uvedené faktory nejsou proměnlivé.  $\underline{A}$  je mírou tepla vázaného v odlitku a v kokile v daném bodě a musí se tedy upravit při změně složení a měrného tepla v příslušném průřezu, což by byl například případ, kdy by v odlitku bylo pevné keramické jádro.

Pro praktické použití a většinu aplikací je použití obvodu  $\underline{P}$  a průřezu  $\underline{A}$  kovového odlitku postačující, přičemž je třeba brát v úvahu jádro, pokud je v průřezu odlitku. U odlitku podle obr. 2a, postupuje-li se zdola nahoru ve směru tuhnutí, je patrné, že poměr  $\underline{P/A}$  se nejprve zvětšuje v úseku 46 a pak zmenšuje v úseku 48 na hodnotu ležící mezi hodnotou úseku 44 a 46.

Obr. 2b znázorňuje relativní optimální rychlosti přemísťování  $\underline{W}$ , které lze přiřadit délkovým úsekům odlitku z obr. 2a. Je zřejmé, že rychlosti se mění u jednoduchého válcovitého odlitku s poměrem  $\underline{P/A}$  úseku neboli s převratnou hodnotou, průměru, poněvadž  $\underline{P/A} = 2\pi r/\pi r^2 = 2/r = 4/d$ . Optimální rychlost přemísťování by byla taková dosažitelná maximální rychlost, při které by zůstalo zachováno rovinné rozhraní tuhnutí; vlastnosti odlitku by odpovídaly požadavkům a odlitek by neměl vady. Pro příklad znázorněný na obr. 2b se předpokládá, že v celém odlitku se vyžaduje optimální struktura.

Rychlost přemísťování  $\underline{W}_x$  se musí tedy zvolit tak, aby vznikla požadovaná mikrostruktura v prvním úseku 44, podstatně vyšší rychlost  $\underline{W}_z$  se pak použije pro střední úsek, který má mnohem větší poměr  $\underline{P/A}$ , a pro horní úsek 48 se použije rychlosti  $\underline{W}_y$  mezi uvedenými hodnotami.

Popsaná změna rychlosti založená na poměru  $\underline{P/A}$  se vztahuje na případ, kdy se žádá maximální rychlost tuhnutí a přemísťování, což je při výrobě typické. V méně četných případech se však může stát, že v různých částech odlitků má být mikrostruktura materiálů odlišná, aby se tak optimalizovaly vzájemně se vylučující vlastnosti. V tomto případě by se rychlost v části dále modifikovala určitým činitelem, například procentem maximální rychlosti tuhnutí s rovinným rozhraním tuhnutí, aby se dosáhlo v odlitku požadovaných vlastností.

Za takových okolností bude rychlost v druhé části ve srovnání s rychlostí v první části vyplývat ze dvou faktorů: první z nich je změna poměru  $P/A$  ve druhé části oproti první části, přičemž změna rychlosti má stejný smysl, a druhý z nich je změna mikrostruktury oproti mikrostrukturu, která by vznikla při první rychlosti závislé na prvním faktoru, přičemž změna rychlosti má libovolný smysl a velikost.

Jak bylo uvedeno, je obvyklé nechávat ztuhnout odlitky s různým průřezem neboli s různým poměrem  $P/A$  jednotnou rychlostí nebo při jediné skokové změně. Pro odlitek znázorněný na obr. 2a by se jako jednotná rychlost zvolila rychlost  $\underline{W}_x$ , poněvadž jakákoli jiná rychlost by byla pro dolní úsek 44 příliš velká a měla by za následek náhodný vznik zárodečných krystalů. Tato volba má dva důsledky: prvním důsledkem je to, že ve druhé části 46 a ve třetí horní části 48 jsou nižší než optimální podmínky, takže například rozhraní tuhnutí je vydaté směrem dolů a doba výroby odlitku je delší než je nezbytné. Druhým důsledkem, který je vysvětlen na obr. 2c, je rychlost tuhnutí  $\underline{R}$ , která by byla důsledkem konstantní rychlosti přemísťování  $\underline{W}_x$ .

Pro první dolní část 44 se rychlost růstu nebo tuhnutí  $R$  rovná rychlosti přemísťování  $\underline{W}_x$  a je optimální. Tato rychlost se udržuje i ve druhé a třetí části. Jak však ukazuje obr. 2c, v přechodu mezi první částí 44 a druhou částí 46 dochází k odchylce. Povaha odchylky je závislá na konkrétních podmínkách slitiny a zařízení; plná čára ukazuje zdánlivě neobvyklou, avšak typickou křivku vznikající tehdy, když se pohyb rozhraní tuhnutí podstatně zpomaluje.

Lze to vysvětlit tím, že přívod tepla do střední části 46 z horké zóny, vzhledem k tepelným ztrátám této střední části 46, závisí na poměru  $P/A$ . Lze pochopit teoreticky a ověřit experimentálně, že protože poměr  $P/A$  střední části 46 je větší než u dolní části 44, vzdálenost  $\underline{L}$ , podle obr. 1 mezi rozhraním tuhnutí a hranicí horké a chladné zóny, se zmenšuje, když je rychlost  $\underline{W}$  konstantní. Rozhraní tuhnutí se tedy na okamžik zpomalí nebo zastaví, když prochází změnou průřezu. Podobným způsobem dochází k opačnému jevu, když rozhraní tuhnutí přechází ze střední části 46 do horní části 48.

Uvedené úkazy lze pozorovat při chlazení kapalným kovem, což je pochod charakterizovaný velmi vysokým teplotním gradientem. V jiném zařízení, kde chladicí účinnost chladné zóny je nižší, může dojít na přechodu mezi částmi odlitku k jinému průběhu rozhraní tuhnutí, jak znázorňuje na obr. 2c přerušovaná čára. Nezávisle na přesném vztahu rychlosti růstu a doby obecně platí, že když se mění průřez částí odlitku, dochází k přerušování rychlosti růstu, pokud se neprovede vhodná kompenzace. Odborníci si této skutečnosti dosud nebyli vědomi. Při přerušování rychlosti růstu se změní mikrostruktura a vlastnosti odlitku, přičemž stupeň této změny závisí na citlivosti slitiny a na podmínkách při použití odlitku.

Z předchozí diskuse je zřejmé, že je výhodné měnit rychlosti v závislosti na poměru  $P/A$  částí odlitku, avšak že změna rychlosti musí být provedena tak, aby nedošlo k zastavení nebo naopak k urychlení pohybu rozhraní tuhnutí.

Obr. 3 znázorňuje odlitek poněkud složitějšího tvaru a vedle něj graf ukazující různé rychlosti přemísťování, které se mění podle smyslu změny poměru  $P/A$  v každé části odlitku. Poměr změny rychlosti  $\underline{W}$  s poměrem  $P/A$  závisí na konkrétních parametrech zařízení a materiálu a na typu požadované mikrostruktury odlitku a lze jej určit na základě zkušenosti pro jakoukoli soustavu. Obr. 3 dále ukazuje různé dráhy, po kterých lze rychlost měnit, když rozhraní tuhnutí prochází jednotlivými proměnlivými částmi odlitku.

Změna rychlosti přemísťování je lineární po délce odlitku při první změně jeho průřezu, jak ukazuje na grafu segment 50. Následující dvě změny rychlosti, znázorněné segmenty 52 a 54, mají parabolický průběh, a poslední změna naznačená segmentem 56 je skoková. Průběhy změny rychlosti na obr. 3 vysvětlují změny a nepředstavují nezbytně optimální průběhy pro daný tvar odlitku, poněvadž optimální průběhy závisí na konkrétní slitině, na použitém zařízení a na mikrostrukturu odlitku.

Nicméně je zřejmé, že na základě vysvětlení k obr. 2 existují jemnější, nicméně však značné změny rychlosti růstu při složitějších změnách poměru P/A. Rovněž je zřejmé, že přesný čas začátku a průběh změny rychlosti je proměnlivý a závislý na okamžitém cyklu. Poněvadž však přechodový cyklus je přiřazen proměnlivému poměru P/A v přechodné části odlitku, platí axiomatically, že přechodový cyklus se provádí během doby, kdy rozhraní tuhnutí leží v blízkosti tohoto průřezu.

Ten, kdo se prvně setkává s tímto problémem, by mohl považovat za vyhovující přímou úměrnost mezi rychlostí přemísťování odlitku a poměrem P/A v přechodové části odlitku. Zkušenost však ukazuje, že takové jednoduché řešení je nevyhovující, zčásti pro tytéž faktory, které ovlivňují vztah mezi rychlostí přemísťování v jedné konstantní části odlitku ve srovnání s jiným konstantním průřezem odlitku. Za této složité situace a při nejružnějších přechodových částech odlitku bylo experimentálně zjištěno, že jsou vhodné určité matematicky definovatelné změny rychlosti vyjímání.

K vysvětlení některých těchto změn slouží obr. 4, který ukazuje graf rychlosti přemísťování odlitku podle obr. 3, avšak jako funkci času. Části 50', 52', 54', 56' křivky na obr. 4, které ukazují změnu rychlosti, lze vypočítat integrací segmentů z obr. 3. Když je rychlost  $\underline{W}$  lineárně úměrná délce odlitku, jako je tomu u segmentu 50, tato rychlost  $\underline{W}$  je exponenciální funkcí času v části 50' křivky z obr. 4. Analogicky když  $\underline{W}$  je jednoduchá parabolická funkce vzdálenosti, jako je tomu u segmentu 52, je rychlost  $\underline{W}$  lineární funkcí času na části 52' křivky z obr. 4.

Poněvadž regulaci rychlosti přemísťování odlitku lze nejlépe vyjádřit jako funkci času, bude v následujícím použito tohoto označení. Pro odborníka je však zřejmé, že samotné místo přemísťování je funkcí času, a že tedy z úvah činěných na základě času se lze snadno vrátit k analýze rychlosti přemísťování jako funkce vzdálenosti.

Obr. 5 ukazuje ve tvaru křivek různé průběhy nebo cykly, podle kterých lze rychlost přemísťování měnit vzestupně neboli kladně (obr. 5a) a sestupně neboli záporně (obr. 5b). Obr. 5a ukazuje několik průběhů, po kterých lze rychlost přemísťování zvětšovat z první rychlosti  $\underline{W}_1$  na druhou rychlost  $\underline{W}_2$  během doby ležící mezi  $\underline{t}_1$  a  $\underline{t}_2$ . Tyto křivky představují několik obecných kategorií, na které je lze rozdělit. Křivky s označením IA a IIA jsou virtuální skokové funkce, to znamená, že v době  $\underline{t}$  se rychlost okamžitě mění z hodnoty  $\underline{W}_1$  na hodnotu  $\underline{W}_2$ . Je zřejmé, že skokovou změnu lze provést v jakémkoli okamžiku mezi dobou  $\underline{t}_1$  a  $\underline{t}_2$ , a na obr. 5 jsou znázorněny pouze dva možné případy. Matematické vyjádření křivek IA a IIA je velice obtížné, předpokládá se však, že označení skoková funkce je vysvětluje dostatečně.

Křivky IB a IIB lze obecně popsat jako konvexní funkce. Křivka IB je typ změny rychlosti, kde po poměrně rychlé počáteční změně následuje pomalejší postupná změna. Křivka IIB označuje naopak poměrně pomalou změnu na začátku, za kterou následuje rychlá změna. Jednotlivé křivky IB a IIB lze popsat matematickými vztahy

$$W = Ae^{nt} \text{ a } t = Be^{nW} \text{ a}$$

$$W = C - At^{-n}, \text{ atd.,}$$

kde A, B, C, n jsou konstanty. Křivka III je lineární změna rychlosti, při které se rychlost vyjímání mění přímo s časem, což znamená, že urychlení je konstantní. Tento typ změny lze vyjádřit matematicky vztahem

$$W = At$$

kde A je konstanta.

Existují jiné křivky, které nejsou znázorněny a které mohou vyjádřit přechodné cykly. K těmto křivkám patří například křivky tvaru písmene S, které by vznikly postupnou kombinací křivek IIB a křivek IB, a křivky ve tvaru obráceného písmene S, které by sestávaly z křivek IB, za kterými by následovaly křivky IIB. Analogicky lze navrhnout i jiné kombinace křivek z obr. 5.

Obecně je žádoucí provádět mezi první a druhou rychlostí podle hladkých křivek znázorněných na obr. 5. Regulační soustava a prvky, které vytvářejí minimální změny přemístovacího pohybu, mohou být diskrétní nebo číslicové, takže skutečný průběh změny rychlosti může být tvořen soustavou skoků, sledem lineárních změn, kmitavým průběhem nebo podobně. Takovéto nepravidelné nebo nedokonalé přechodové cykly a složité kombinace, které buď sledují průměrné dráhy nebo aproximují hladké křivky popsané v souvislosti s obr. 5, patří rovněž do rámce vynálezu.

Obr. 5b je podobný obr. 5a s tím rozdílem, že znázorňuje zmenšování rychlosti. Srovnáním lze zjistit, že křivky označené čárkovaně odpovídají křivkám z horní části obr. 5 a že mají analogické charakteristiky.

Křivky na obr. 5 patří do třídy křivek, které jsou vhodné k provádění změn rychlosti. při přemístění, když rozhraní tuhnutí kovu prochází změnou průřezu odlitku v intervalu  $t$ , ležícím mezi  $t_1$  a  $t_2$ .

Společné a charakteristické znaky křivek podle obr. 5 lze přesněji určit na základě jejich první derivace. V následující analýze se samozřejmě předpokládá, že v okamžicích  $t_1$  a  $t_2$  dochází ke změně derivace mezi určitou hodnotou a nulovou hodnotou, která charakterizuje konstantní rychlosti  $\underline{W}_1$  a  $\underline{W}_2$ . Následující tabulka 1 udává znaménko derivace pro každou třídu křivek a je z ní zřejmé, že hlavním rozdílem je to, že první derivace pro zvětšující se rychlost je kladná, zatímco při zmenšující se rychlosti je záporná. Další zkoumání první derivace ukazuje však rozdíly v jejím průběhu v čase.

Tyto rozdíly jsou shrnuty v tabulce 2, z níž je zřejmé, že křivky III mají konstantní první derivaci, zatímco křivky ostatních tříd mají derivace proměnlivé hodnoty. Derivaci skokové funkce křivky IA a IIA lze jen obtížně stručně popsat. Předpokládá se, že skoková změna probíhá v době  $dt$ , která je velice krátká oproti době  $t$ .

V tabulce 3 je uveden trend změny absolutní hodnoty derivace. Je patrné, že užití absolutní hodnoty odstraňuje rozdíl mezi případem vzrůstající a klesající rychlosti.

Z tabulek lze odvodit některá další pozorování. Křivky IB a IB' mají rychlou počáteční změnu, po níž následuje pomalejší změna a tedy klesající absolutní hodnota změny rychlosti, přecházející hladce v rychlost  $\underline{W}_2$ . Naopak křivky IIB a IIB' vycházejí hladce z rychlosti  $\underline{W}_1$  a mají vzrůstající absolutní hodnotu směrem k rychlosti  $\underline{W}_2$ . Neznázorněné esovitě křivky by měly vzrůstající a potom klesající, nebo naopak klesající a pak vzrůstající rychlost změny.

T a b u l k a 1

Hodnoty první derivace křivek rychlosti přemístování v době  $t$

Vzrůstající rychlost		Klesající rychlost	
Třída	Hodnota	Třída	Hodnota
IA	$\alpha$	IA'	$\phi$
IB	kladná	IB'	záporná
IIA	$\Omega$	IIA'	$\lambda$
IIB	kladná	IIB'	záporná
III	kladná	III	záporná

Vysvětlení

$\alpha$  - nekonečně kladná pro  $dt$ , pak nulová, přičemž  $dt$  je velice malé vůči  $t$ ,

$\Omega$  - nulová, pak nekonečně kladná pro  $dt$

$\phi$  - stejně jako  $\alpha$ , avšak s opačným znaménkem

$\lambda$  - stejně jako  $\Omega$ , avšak s opačným znaménkem

## T a b u l k a 2

Trend hodnoty první derivace rychlosti přemísťování s časem  $t$ 

Vzrůstající rychlost		Klesající rychlost	
Třída	Hodnota	Třída	Hodnota
IA	$\Psi$	IA'	$\Psi$
IB	méně kladná	IB'	méně záporná
IIA	$\sigma$	IIA'	$\sigma'$
IIB	kladnější	IIB'	zápornější
III	konstantní	III'	konstantní

## Vysvětlivky

- $\Psi$  - kladná, záporná, pak konstantní
- $\sigma$  - konstantní, pak kladná, záporná
- $\Psi'$  - stejně jako  $\Psi$ , ale s opačnými znaménky
- $\sigma'$  - stejně jako  $\sigma$ , ale s opačnými znaménky

## T a b u l k a 3

Trend změny absolutní hodnoty první derivace křivek rychlosti přemísťování v čase  $t$ , s výjimkou doby  $\Delta t$ 

Vzrůstající rychlost		Klesající rychlost	
Třída	Hodnota	Třída	Hodnota
IA	nula	IA'	nula
IB	méně kladná	IB'	méně kladná
IIA	nula	IIA'	nula
IIB	kladnější	IIB'	kladnější
III	nula	III'	nula

K podrobnějšímu objasnění vynálezu slouží následující příklady.

## P ř í k l a d 1

S použitím rychlého usměrněného tuhnutí s radiačním chlazením byla vyrobena monokrystalická lopatka pro první stupeň plynové turbíny leteckého motoru.

Jmenovité hodnoty poměru  $P/A$  podél části odlitku, udané v  $\text{cm}^{-1}$ , byly 10 pro patu lopatky, 46 pro list lopatky a 0,8 pro bandáž. Slitina byla podobného typu, jaký je popsán v pat. spise Sp. st. a. 4 116 723. Rychlost přemísťování v  $\text{cm.h}^{-1}$  byla 7,6 pro monokrystalický závěs a navazující šikmý přechodový úsek, 15 pro patu lopatky a 25 pro list lopatky a bandáž. Tvar lopatky je znázorněn na obr. 6 společně s cyklem přemísťování, který je označen  $\underline{a}$ . Výsledná lopatka měla zdravou strukturu, avšak krystalografické vady v oblasti bandáže, způsobené náhodným vylučováním zárodečných krystalů, k němuž došlo příliš vysokou rychlostí přemísťování odlitku při krystalizaci bandáže. Krystalická struktura v přechodu mezi patou a listem lopatky byla rovněž mírně nedokonalá. Celková doba tuhnutí byla 92 minut.

## P ř í k l a d 2

Byla zpracovávána stejná lopatka a stejná slitina jako v příkladě 1. Rychlost vyjímání v  $\text{cm.h}^{-1}$  byla 7,6 pro závěs lopatky a přechod a zvyšovala se lineárně s časem na 33 litru lopatky, načež byla snížena na 15 při krystalizaci bandáže. Cyklus označený  $\underline{b}$  na obr. 6 je samozřejmě parabolického průběhu v závislosti na vzdálenosti. Lopatka měla lepší krystalickou strukturu v přechodu mezi patou a listem a neměla nukleační vady v bandáži. Doba tuhnutí byla 89 min.

## P ř í k l a d 3

Vysoce jakostní gama-gama plus delta eutektická slitina s hmotnostním složením Ni-2,5 Ni-2,5Al-20Nb-6Cr byla použita k výrobě turbínové lopatky bez bandáže s lamelární strukturou. Lopatka sloužila jako turbínová lopatka prvního stupně pro turbínu leteckého motoru.

Odlitek lopatky měl celkovou výšku asi 3,8 cm, délku listu 2,5 cm a pata lopatky měla šířku asi 2,5 cm. Přejechod na základně listu lopatky, kde se připojuje k patce, měl poloměr asi 2,5 mm. K základně paty lopatky byl připevněn závěsný blok, který měl délku 1,5 cm a konstantní průřez. Jmenovitý poměr  $P/A$  v  $\text{cm}^{-1}$  v této počáteční části a v patě byl 45, zatímco v části listu v blízkosti paty byl a v blízkosti špice lopatky byl asi 200. Chlazení bylo provedeno tekutým kovem. Horká zóna měla teplotu 1 590 až 1 620 °C a chladnou zónu tvořil tekutý cín s teplotou 260 °C.

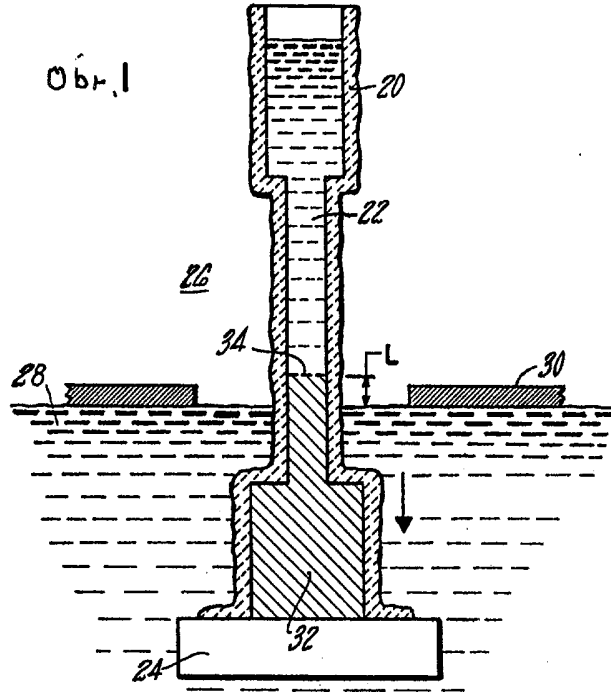
Trvalá forma byla z oxidu hlinitého a oxidu křemičitého. Kokilové dno tvořil molybdenový blok a bylo použito plovoucí přepážky. Experimentální měření na odlitcích, které měly podobný poměr  $P/A$  jako pata lopatky ukázala, že tepelné gradienty  $G$  byly nejméně 1 000 až 1 300 °C.cm. Bylo vypočteno, že rychlost růstu  $6,4 \text{ mm.h}^{-1}$  je vhodná pro vytvoření dobré mikrostruktury v patě lopatky; tato rychlost byla vypočtena na základě předchozích zkušeností s touto slitinou a odlitek byl vyroben touto rychlostí přemísťování. Zkoušky mikrostruktury ukázaly, že struktura odlitku je plně lamelární, avšak že vzdálenost jednotlivých lamel v listu lopatky je příliš velká a ukazuje tedy zhoršené vlastnosti tečení. Z toho bylo odvozeno, že rychlost tuhnutí listu lopatky byla nevhodná.

## P ř í k l a d 4

Pracovalo se za stejných podmínek jako v příkladě 5, pouze s tím rozdílem, že rychlost vyjímání byla  $16,5 \text{ mm.h}^{-1}$ . Mikrostruktura v patě lopatky byla celulární spíše než lamelární a ukazovala tedy zhoršené pevnostní vlastnosti na mezi tečení ve smyku. Z toho bylo usuzováno na to, že rychlost tuhnutí patky lopatky byla příliš velká a že byl překročen kritický poměr  $G/R$ . Mikrostruktura v listu lopatky byla jemně lamelární s nepatrnými vzdálenostmi lamel a ukazovala tedy na dobré pevnostní vlastnosti. Z toho byl učiněn závěr, že rychlost tuhnutí listu lopatky je vhodná pro žádané vlastnosti.

## P Ř E D M Ě T V Y N Ā L E Z U

Způsob přemísťování usměrněně tuhnoucího kovového odlitku, který má po délce odlišné poměry obvodu k průřezové ploše, z horké zóny o teplotě nad teplotou likvidu do chladné zóny o teplotě pod teplotou solidu kovu, k vyvolání pohybu jmenovitého rozhraní tuhnutí, ležícího mezi izotermou likvidu a izoternou solidu, nejméně dvěma vzájemně odlišnými rychlostmi, vyznačený tím, že přechod z jedné rychlosti přemísťování odlitku na další rychlost, při změně poměru obvodu odlitku k jeho průřezové ploše, se provádí spojitě v průběhu průchodu rozhraní tuhnutí oblastí této změny, přičemž rychlost pohybu rozhraní tuhnutí se mění ve stejném smyslu jako poměr obvodu odlitku k jeho průřezové ploše.



Обр. 2

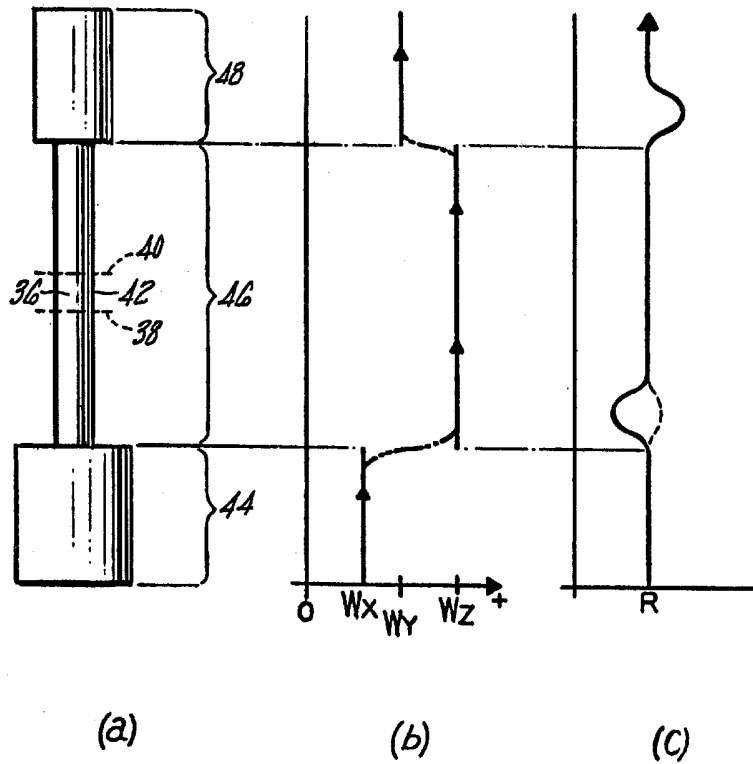
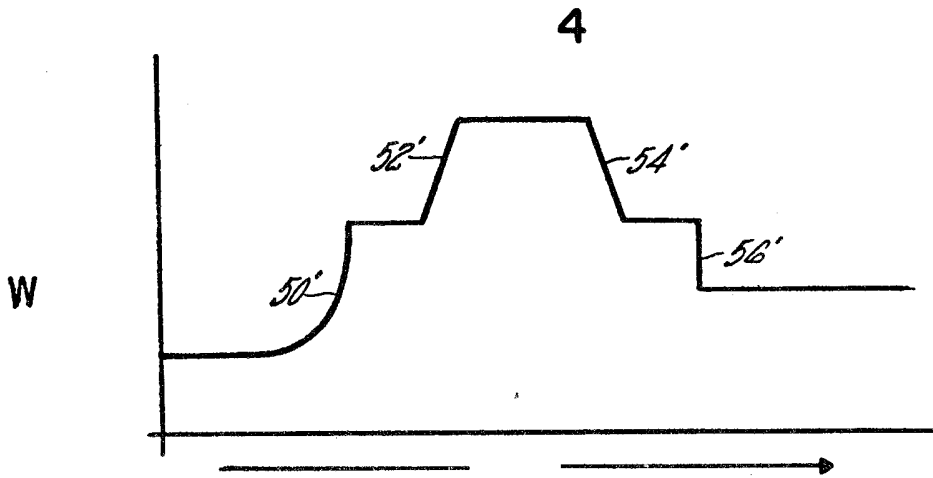
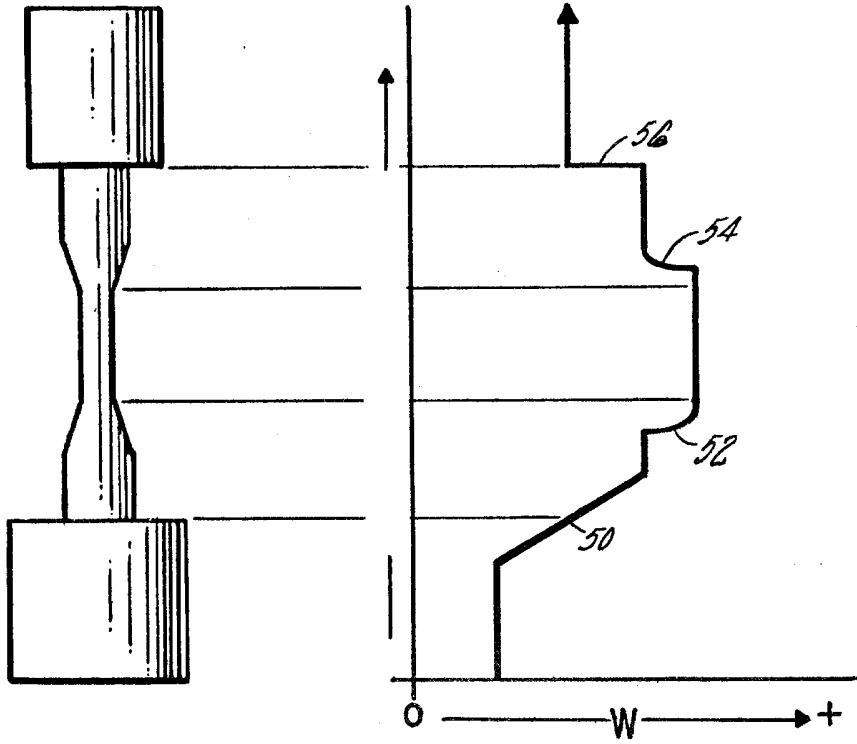
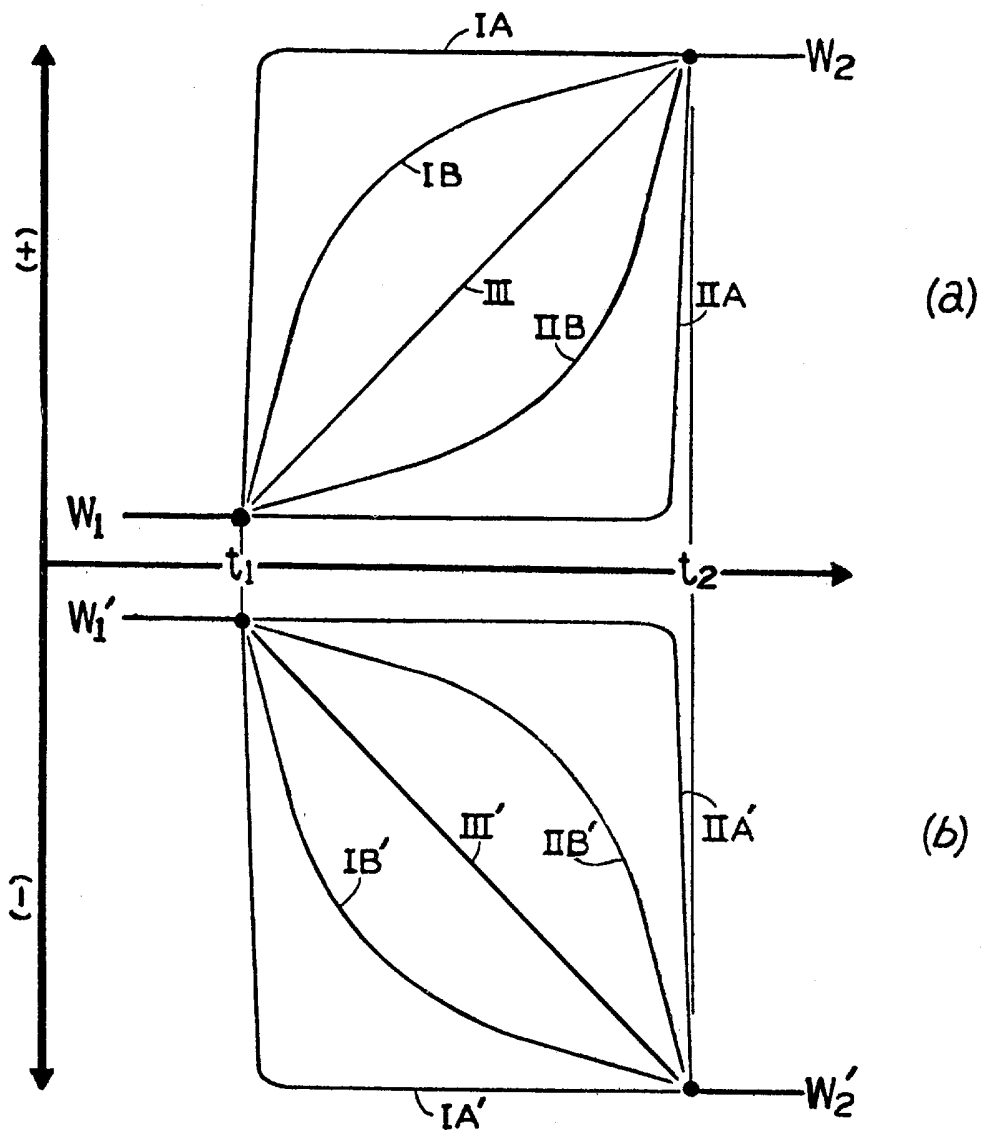


Fig. 3



Cl. 5



253553

Обр 6

