

Strukturo kaj kvalitoj de alojoj surbaze de sistemoj de nemiksiĝantaj komponantoj

A.D. Ŝljapin

Enhavo

1. Klasifikado pri diagramoj de ekvilibro. Specifecoj de strukturformado
2. Sistemoj de nemiksiĝantaj komponantoj kiel perspektiva bazo por materialoj de speciala destino
 - 2.1. Antifrikciaj eluzimunaj materialoj
 - 2.2. Altdampaj materialoj
 - 2.3. Magnetaj materialoj
 - 2.4. Elektroteknikaj materialoj
 - 2.5. Kelkaj aliaj eblaj aplikterenoj por sistemoj de nemiksiĝantaj komponantoj
3. Formado de strukturo en alojoj surbaze de sistemoj E1
4. Formado de strukturo en alojoj surbaze de sistemoj tipe E2-a
5. Formado de strukturo en sistemoj de tipo E3
6. Analizo de konataj manieroj de produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj
 - 6.1. Metodoj de pulvora metalurgio
 - 6.2. Metodoj, bazitaj sur subigo de segregacio laŭ specifa maso
 - 6.3. Metodo de granuligo de supervarmigita fandaĵo kun posta brulkunigo de granuloj
 - 6.4. Metodo de akcelita malvarmigo de supervarmigita fandaĵo kun plua inkandesko en temperatura intervalo de solida-likvafaza ekvilibro
 - 6.5. Kristaliĝo sub premo
 - 6.6. Metodoj de produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj per bremsado de segregacio per aldonaĵoj
 - 6.7. Metodoj de produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj per mekanika miksado de fandaĵo
 - 6.8. Metodo de produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj helpe de ultrasono
 - 6.9. Produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj en mikrogravita stato
 - 6.10. Produktado de alojoj el nemiksiĝantaj komponantoj en kvazaŭsenpezeco, kreita fare de krucigaj elektraj kaj magnetaj kampoj
 - 6.11. Produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj per metodo de direkta kristaliĝo
 - 6.12. Plasma surpulvorigo de alojoj el nemiksiĝantaj komponantoj
 - 6.13. Kombinitaj metodoj de produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj
 - 6.14. Pritakso de aplikado de metodoj de produktado de alojoj el nemiksiĝantaj komponantoj

1. Klasifikado pri diagramoj de ekvilibro. Specifecoj de strukturformado

Specifecoj de materialteknologio kaj, aparte, ebleco de celhavanta kontrolo pri materiala mikrostrukturo, kaj sekve ankaŭ kvalitoj, multe estas difinitaj per tipo de diagramo de stato de baza sistemo de komponantoj. Samtempe necesas distingi influon al strukturo de mekanismo de kristaliĝo unuflanke, kaj postsekvaj fazaj transformiĝoj en solida stato aliflanke. Tiel, konsiderante probablajn deflankiĝojn de la ekvilibro, eblas prognozi strukturon de alojoj surbaze de sistemoj kun plena solveco en solida stato, kaj ankaŭ alojoj, kristaliĝantaj laŭ peritekta kaj eŭtekta mekanismoj. Eblas diri certe, ke en la plej multe uzataj nuntempe gisitaj materialoj la strukturo formiĝas dum kristaliĝo laŭ unu el supre menciitaj tipoj de diagramoj. Kristaliĝo en intervalo inter linioj de likveco-solideco, kaj des pli — laŭ eŭtekta kaj peritekta mekanismo, kiel regulo, ne estas akompananta per formiĝo de makroheterogenaĵoj en kemia konsisto laŭ volumeno de rezulta produkto, sed probabla segregacio en mikrovolumenoj plej ofte estas forigata per inkandesko, aŭ per inkandesko kun anticipa plastika deformado.

Produktado de alojo libera de kemiaj heterogenaĵoj sur makronivelo, estas unu el ĉefaj taskoj de metalurgia stadio de ĝia fabrikado (se ne temas pri specialaj materialoj, en kiuj kontrolata makrosegregacio estas dezirata).

En la sistemoj, kie postsekvaj transformiĝoj en solida stato aŭ principe ne estas realigeblaj, aŭ estas tro komplikaj, tiu ĉi stadio estas fina, kaj laborkapablo de materialo estas determinata ĉefe fare de makrohomeneco de ĝisita strukturo.

Ekzisto de kelkaj alotropaj modifoj almenaŭ de unu el bazaj komponantoj, aŭ forta temperatura influo al reciproka solveco de komponantoj de sistemo determinas, kiel estas konate, eblecon de plua perfektigo de materiala mikrostrukturo, aŭ alivorte faras alojon perceptema por termika prilaboro. Klasikaj ekzemploj de hardado de karbonŝtaloj kaj maljunigo de aluminiuj alojoj plenkonvinke demonstros eblecojn de perfektigo de aloja mikrostrukturo perceptema al termika prilaboro.

De suprediritaj konsideroj necesas akcepti, ke la plej "oportunaj" flanke de praktika metalografio estas sistemoj de komponantoj, alojoj de kiuj, unue, kristaliĝas kun la malplej multaj makrosegregacioj en kemia konsisto, kaj, due, laŭ tipo de statdiagramo povas percepti tiun aŭ la alian termikan prilaboron, ebligantan perfektigi mikrostrukturen kaj plibonigi kvalitojn de la materialo.

Tamen kiel montras praktiko, el nuntempe konataj sistemoj de komponantoj ekzistas sufiĉe multaj ne apartenantaj al "oportunaj" en menciita senco de tiu ĉi vorto. Do sekve, ekster praktika uzo restas sufiĉe granda kvanto da sistemoj, alojoj de kiuj povus helpi solvi tutan vicon da komplikaj problemoj de moderna tekniko. Nature eblas supozi, ke, iĝanta precipe aktuala lastatempe, problemoj de esploro kaj kreo de novaj materialoj kun plibonigita komplekso de fizika-mekanikaj kvalitoj povus sufiĉe faciligi dank' al uzo de granda kvanto de tiuj "neoportunaj" sistemoj.

Al tiuj sistemoj unuavice apartenas sistemoj de komponantoj, havantaj tendencon al distavoliĝo en likva stato.

Rigardu ni pli detale tiun ĉi klason da sistemoj, pritraktu ni ĝiajn distingajn specifecojn vidpunkte de strukturformado, kaj ankaŭ perspektivojn de produktado kaj apliko de materialoj sur ĝia bazo.

Por aligo de tiu aŭ la alia sistemo al certa klaso uzu ni konatan klasifikon de F. Sauenvald, kiu malgraŭ sia limigiteco entute ebligas sufiĉe trafe "ordigi" la plej multon da sistemoj de komponantoj. Laŭ Sauenvald necesas apartigi kvar klasojn de sistemoj:

- V. sistemoj, en kiuj inter la komponantoj realiĝas firmaj intermetalaj ligoj, tiaj, ke eĉ en likva stato montriĝas distingoj en koncentritecaj interligoj de termodinamikaj kaj fizika-kemiaj proprecoj;
- L. sistemoj, havantaj nenion specifan, krom maksimumoj en kurboj "propreco-koncentriteco";
- E. sistemoj, havantaj tendencojn al distavoliĝo jam en likva stato kaj praktike malhavas reciprokan solvecon en la solida;
- Z. sistemoj de meza tipo, kiuj inkluzivas ĉiujn sistemojn, ne apartenantajn al iu el tri antaŭaj klasoj.

Fiziko-kemian motivadon de la fenomeno de distavoliĝo en E-sistemoj oni studis sufiĉe plene dum kelkaj jardekoj. La analizoj, faritaj en studoj de pluraj aŭtoroj, konverĝas precipe al serĉoj de korelacioj inter konduto de fandaĵoj kaj proporcieco de atomaj radiusoj de komponantoj. Eksplikoj de la fenomeno de malintermiksiĝo oni serĉis ankaŭ per komparado de koncentritecaj interligoj de fiziko-kemiaj proprecoj de alojoj en solida kaj likva stato kaj formo de diagramo de ekvilibro. Dum tio kiel esplorobjektoj estis tute diversaj sistemoj; ekzemple Ga-Bi; Ca-Mg, Cu-Pb, Bi-Zn, Ga-Cd, Ga-Hg, Ga-Ti, Ga-Pb, In-Ta.

Tamen, malgraŭ multnombraj provoj sistemigi kaj fiziko-kemie analizi la problemon pri malintermiksiĝo, nuntempe la kaŭzo de malintermiksiĝo en metalaj fandaĵoj estas ankoraŭ malproksima de plena klariĝo. En plej multo da verkoj analizo pri fenomeno de distavoliĝo fakte konverĝas al fortoj de reciproka influo inter kunfandantaj komponantoj kaj oni koncernigas la distavoliĝon al pliigo de energio de samnomaj ligoj laŭ tipo A-A kaj B-B super diversnomaj ligoj laŭ tipo A-B. Limigiteco de tiu ĉi konsidero estas en tio, ke ĝi ignoras influon de entropia faktoro, kvankam estas bone konate, ke ŝanĝo de libera energio dum intermiksiĝo estas ligita ne nur kun ŝanĝo de entalpio de la sistemo, sed ankaŭ kun altiĝo de ĝia entropio. Tial formiĝo de unufaza likva solvaĵo povas okazi kaj dum altiĝo de entalpio de sistemo, se la altiĝo estas kompensata per pliigo de entropia influo. Efektive, el konata ekvacio

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

estas videble, ke kaze de altiĝo de temperaturo parto de entropia adiciato kreskas, kio devas konduki al pliigo de reciproka solveco.

El la supre skribita mallonga analizo pri kaŭzoj de malintermiksiĝo estas videble, ke kriterioj por preciza difino pri konduto de du, aŭ des pli tri hazarde prenitaj komponantoj por kunfandiĝo dume mankas. Tial elekto de klasifiko

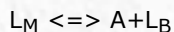
de Sauervald por celoj de tiu ĉi studo estas tute pravigita.

Eĉ neprofunda analizo de duoblaj sistemoj de komponantoj laŭ tiu ĉi klasifikado montras, ke tri klasoj el kvar, nome L, V kaj Z sistemoj apartenas al "oportunaj", sed klaso E — al "maloportunaj" de vidpunkto de teknologia produktado kaj termoprilaborado de alojoj.

En fig. 1 skize estas montritaj diagramoj de stato de sistemoj, kiuj apartenas al klaso E kaj estas donitaj kelkaj ĉefaj ekzemploj de konformaj duoblaj kombinoj de komponantoj. Necesas rimarki, ke la vicon de ekzemploj ne trafis la plej multo el diverseblaj realaj sistemoj, kaj, konkrete, pluraj sistemoj de komponantoj kun distavoligo en likva stato, manko de reciproka solvado en solida stato, sed formantaj inter la komponantoj stekiometriaj kombinoj, iam eĉ pli ol du. Al similaj sistemoj apartenas, ekzemple, As-Ga, As-Sn, Li-Ga Cd-Tl, Cd-K Mn-S, Mn-Bi kaj multaj aliaj.

Por faciligo de plua priskribo enkonduku ni subklasojn de E-sistemoj: E1, E2, E3, E4 kaj E5. La unuaj du subklasoj E1 kaj E2 apartenas al sistemoj, en kiuj nur komenciĝas tendencoj al distavoliĝo en likva stato kaj kiu povas aperi nur dum okazigo de certaj kondiĉoj. Dum sufiĉe granda diferenco de specifaj masoj de komponantoj dum procezo de kristatiĝo de alojoj en la sistemoj povas esti sufiĉe granda segregacio laŭ denseco. Tendenco al makrosegregacio en similaj sistemoj povas abrupte pliiĝi eĉ dum malgrandaj aldonaĵoj (sur nivelo de almiksaĵoj) de tria komponanto, ekzemple de karbono al alojoj de fero kun kupro.

En sistemoj de tria tipo — E3 — distavoliĝo en likva stato jam estas klare formiĝanta, tamen ĝi efektiviĝas en limigita temperatur-koncentriteca kampo, ekster kiu povas ekzisti unufaza likvaĵo, relative homogena laŭ kemia konsisto. En sistemoj de tia tipo precipe reliefe elmontriĝas monotekta reakcio, kiun por unua fojo enkondukis Hertler:



EKZEMPLOJ
DE DUOBLAJ SISTEMOJ
DE NEMIKSIGANTAJ KOMPONANTOJ

Ag	Ba, Cr, C, Fe, Jr, Mn, Nb, Ni, Rh, Ru, Ta, U, V, W
Al	Bi, Cd, In, K, Na, Pb, Rb, Tl
Be	Bi, Ga, In, Sn, U
Bi	Co, Cr, Fe, Ga, Mn, Mo, Nb, Os, Ru, Si, U, V, W, Zr, AlBe
Co	Hg, Na, Pb, U, Bi
Cr	Cu, Hg, La, Li, Sn, Pb, Bi
Fe	Ba, Hg, Ca, K, Li, Mg, Na, Pb, Rh, Sn, Sr, U, Bi, Ag
Cu	Mo, Pb, Re, Ta, U, V, W, Cr
Ga	Hg, K, Pb, U, Y
La	Mn, Nb, Pu, Ti, U, V, Zr
Li	Mn, Mo, Na, Nb, Pu, Rb
Mg	Mo, Na, Nb, Pu, U, V, W, Fe
Mn	Pb, Sr, Tl, W, La, Li, Ag
Mo	Pb, Sc, Bi, Cr, Li, Mg
Nb	Pb, Sc, V, Bi, Li, La, Mg, Ag
Ni	Pb, Tl, Ag
Pb	Si, Ru, Y, Al, Co, Fe, Cu, Ga, Mn, Mo, Nb, Ni, Zn
Sc	V, Mo, Nb
V	Bi, Cu, La, Mg
W	Bi, Cu, Mg, Mn

Fig. 1. Skema desegnaĵo de diagramoj de ekvilibro de sistemoj, havantaj tendencon al distavoliĝo en likva stato. Ekzemploj de duoblaj sistemoj de nemiksigaĵantaj komponantoj.

Produkto de monotekta reakcio, kiu estas certsence analogo de la eŭtekta, dank' al ĝia specifeco povas esti nomita monotekto analoge kiel eŭtekto, kaj ni uzu tiun ĉi terminon plu. Necesas substreki, ke en sistemoj de simila tipo ne aperas apartaj malfacilaĵoj dum produktado de fandblokoj, relative homogenaj laŭ konsisto, okaze nur por aloj kun monotekta konsisto. Tio klariĝas per tio, ke izoterma kristaliĝo de monotekta alojo komenciĝas tuj kun monotekta reakcio, dum kiu gvidanta estas solida fazo, aperanta egale laŭ tuta volumeno, sed solidiĝantaj pli poste gutoj de facile fandebla fazo kvazaŭ "implikiĝas" inter dendritoj de malfacile fandebla fazo. En antaŭ- kaj postmonotektaj aloj segregacio laŭ denseco, kiel regulo, estas sufiĉe granda. Kaŭzojn de la segregacio eblas facile determini laŭ la ekzemplo de sistemo kupro-plumbo, koncernta al la konsiderata tipo. Tiel, en antaŭmonotektaj aloj en sufiĉe granda intervalo de temperaturoj kristaliĝas fakte pura kupro, kiu estante sufiĉe pli malpeza ol ĉirkaŭa fandaĵo, supreniŭas, dum tiu ĉi moviga forto de la segregacio kreskas laŭ malplialtiĝo de la temperaturo. En postmonotektaj kupro-plumbaj aloj dum malvarmiĝo de fandaĵo ĝis kriza temperaturo, dependanta de kvanto de la plumbo, videblas ĝia distavoliĝo je du likvaĵoj L1 kaj L2, kiuj sufiĉe malsamas laŭ denseco. Pli malpeza likvaĵo L2 sinkas al fundo de fandujo. Dum malaltiĝo de la temperaturo moviga forto de segregacio altiĝas, kaj se malvarmiĝon oni okazigas sufiĉe malrapide, en funda parto de la fandbloko kolektiĝos preskaŭ pura plumbo. En supra parto de la fandbloko likvaĵo L1, atinginte konsiston L_M , iĝos monotekto.

En sistemoj, similaj je Cu-Pb, t.e. kun fermita kupolo de distavoliĝo en likva stato, eblas tiel ricevi makrohomogenan likvan solvaĵon en tuta intervalo de koncentritecoj. Plialtigante rapidecon de malvarmiĝo de fandaĵo aŭ aldonante al ĝi specialajn surface aktivajn aldonaĵojn, eblas je sufiĉa grado malaltigi malfavoran fenomenon de segregacio laŭ denseco. Formiĝo de strukturo en aloj surbaze de sistemoj E3 estas pli detale traktota malsupre laŭ ekzemplo de sistemo Cu-Pb. Teknologie estas sufiĉe pli malfacile ricevi aloj, laŭ ĝenerale agnoskita senco de la termino, en E-sistemoj de tipoj E4 kaj E5.

En sistemoj de tipo E4 la kupolo de distavoliĝo estas malfermita. Tio signifas, ke en signifa temperatura-koncentriteca kampo ĉe atmosfera tensio metaloj A kaj B estas nur limigite reciproke solveblaj en likva stato, kaj ilia varmiĝo ĝis vaporiziĝo plialtigas solvecon nesufiĉegrade. Monotekta punkto en similaj sistemoj, ordinare situas sufiĉe pli proksime al malfacile fandebla komponanto, sekve de tio monotekto precipe konsistas el malfacile fandebla elemento. Ĝuste per monotekta konsisto de facile fandebla komponanto estas limigita ĝia supra limo en aloj bazitaj sur sistemoj de tipo E4, produktataj per tradicia gisa maniero kun akcelita malvarmigo.

En sistemoj de tipo E5 kampo de distavoliĝo en likva stato okupas tiel malgrandan parton de temperatura-koncentriteca kampo, ke oni ordinare neglektas bildigon de ekzistkampo de homogenaj likvaj solvaĵoj. Monotekta konsisto en tiuj sistemoj distingiĝas de 100% da malfacile fandebla komponanto je centonoj kaj milonoj, kaj punkto de monotekta transformo estas nur je kelkaj gradoj sube de ĝia fandtemperaturo. Maleblo ricevi en tiuj sistemoj homogenan likvan solvaĵon surbaze de malfacile fandebla komponanto difinas ĉefan teknologian malfacilaĵon de produktado de aloj sur ilia bazo: du elementoj fandiĝas fakte aŭtonome, ne intermiksiĝas unu kun la alia en iuj-ajn proporcioj kaj en iu-ajn temperaturo, kaj dum malvarmiĝo aŭtonome solidiĝas ĉiu en sia subtavolo.

Menciitaj supre malfacilaĵoj de produktado de materialoj surbaze de sistemoj NK antaŭdifinis relative malgrandan ilian pristudon. Apartaj laboroj, dediĉitaj al strukturo kaj kvalitoj de kelkaj aloj de simila klaso koncernas ĉefe sistemojn E1, E2, E3 kaj malpli ofte sistemojn E4. Senporajn aloj surbaze de sistemoj E4, E5, enhavantajn pli ol 3-4 pez.% de facile fandebla komponanto, ĝis antaŭnelonge oni ne produktis entute, sed kelkajn konatajn komponitajn materialojn sur ilia bazo oni produktas nuntempe nur per metodoj de pulvormetalurgio.

Sube estos analizo de ĉefaj laboroj, koncernantaj formadon de strukturo en sistemoj de studata tipo.

2. Sistemoj de nemiksiĝantaj komponantoj kiel perspektiva bazo por materialoj de speciala destino

Analizo de konataj binaraj metalaj sistemoj montras, ke nur al sistemoj de tipoj E3, E4 kaj E5 eblas aligi pli ol 200 el 1325 pristuditaj. Kun partopreno de nemetaloj similaj al duoblaj sistemoj kolektiĝas jam ĉirkaŭ 500.

Motivita, laŭ nia opinio, aligi al la klaso sistemojn de tipoj E1 kaj E2 eĉ pli multe vastigas klason de sistemoj NK. Termino "nemiksiĝantaj komponantoj" (NK) estas uzata, sekve, por substreki faktan maleston de reciproka solvado de komponantoj en solida stato, ĉar limigita reciproka solvado en likva stato sen influo de aldonaj faktoroj estas karakteriza nur por sistemoj E3 - E5.

Laŭ si mem sufiĉe granda nombro de sistemoj de tipoj E1 - E5, fakte ne uzataj teknike pro malfacilaĵoj de produktado de alojoj sur ilia bazo, jam difinas perspektivon kaj aktualecon de ilia pristudo.

Krom tio, eĉ la plej supraĵa studo de fiziko-kemiaj proprecoj de elementoj komponantaj ilin montras, ke dum plenumo de certaj postuloj al strukturo de alojoj sur ilia bazo eblas produkti la plej diversajn netradiciajn materialojn, supozeble kun nivelo de kelkaj proprecoj, kiujn antaŭe realigi ne estis ebla.

Vidu ni denove por pli detala analizo skemon sur **fig. 1**, kie estas prezentitaj kelkaj ekzemploj de sistemoj NK.

Ĉefaj premisoj de eblecoj de realigo de alta nivelo de fiziko-kemiaj kvalitoj de alojoj el NK konverĝas al la sekva. Kondiĉe de egala dislokiĝo de komponantoj laŭ volumeno kun certa disperseco de strukturaj elementoj, kio estas unu el celoj de tiu ĉi laboro, rezultiĝas senpore komponita materialo, kuniganta en si fakte komencajn kvalitojn de kunfandataj komponantoj, ĉar ilia reciproka solveco en solida stato preskaŭ mankas. Variantoj de eblaj kombinoj de indikitaj kvalitoj estas sufiĉe multaj, pri kio eblas konvinkiĝi per la sama skemo 1. Do kongrue estas grandaj ankaŭ eblecoj de produktado de la plej diversaj komponaĵoj kun certaj kvalitoj, tio estos montrita sube per kelkaj ekzemploj.

Struktura specifeco de komponitaj materialoj el NK, estas en tio, ke komponantaj ilin fazoj fakte ne influas unu al la alia, allasas aldonajn eblecojn de elekta influo al la fazoj por celdirektita ŝanĝo de kvalitoj de komponaĵo entute.

Dank' al specifeco de procezo de kristaliĝo en sistemoj NK kelkokaze eblas kreo de ege anizotropaj direktitaj fibraj strukturoj, kio allasas aldonajn avantaĝojn laŭ kelkaj kvalitoj. Konsiderante menciitaj premisoj priparolu ni nun kelkajn eblecojn de uzado de alojoj el NK.

Probablaj kampoj de apliko por alojoj el nemiksiĝantaj komponantoj.

2.1. Antifrikciaj eluzimunaj materialoj

Inter malmultaj variantoj de binaraj NK rimarkeblas tiaj, kiel Fe-Pb, Fe-Bi, Fe-Sn, Fe-S, Al-Pb, Al-Cd, Al-Bi, Al-Sn, Al-In, kaj ankaŭ Cu-Pb, Cu-Bi, Cu-S. Facile fandeblaj plastikaj elementoj kune kun firma bazo, krome diferenciĝanta per alta varmkondukeco, faras bazon por efektiva realigo de principo Ŝarpi por antifrikciaj alojoj, laborantaj en reĝimo de glitfroto. Ne malpli grava estas ankaŭ tio, ke firma malfacile fandebla bazo en tiuj ĉi alojoj per racia alojado kaj konforma varm prilaboro povas esti sufiĉe plifirmigita, sed necesaj celoj de facile fandeblaj elementoj dum tio povas esti konservitaj sur elira nivelo. Konataj sukcesaj ekzemploj de aplikado de kelkaj alojoj surbaze de sistemoj Al-Pb, Al-Sn, Cu-Pb, Fe-Cu-Pb konfirmas similan prognozon, sed malfacilaĵoj, kiuj akompanas produktadon de similaj materialoj, kaj amaso da ankoraŭ ne realigitaj eblecoj, ligitaj kun tiuj malfacilaĵoj, kondiĉigas aktualecon de detala studado pri reguloj de strukturformado en ili.

2.2. Altdampaj materialoj

Sistemoj menciitaj supre, kaj ankaŭ tiuj, kiel Ag-Fe, Ag-Mn, Ag-Nb, Be-Bi, Be-In, Be-Sn, Co-Bi, Nb-Bi, Si-Bi, Mo-Cu, V-Cu, Nb-Cu, Fe-Cu, W-Cu, Mo-Mg, W-Mg kaj multaj aliaj, laŭ evoluitaj imagoj pri mekanismoj de disipiĝo de energio, povas esti perspektiva bazo por produkto de altdampaj materialoj, kunigantaj tiun ĉi kvaliton kun la aliaj, aparte kun menciitaj supre antifrikciaj ecoj.

2.3. Magnetaj materialoj

Aplikado de alojoj surbaze de la fero kaj la kobalto kun certa kvanto de la plumbo kaj bismo povas, dum plenumo de konataj postuloj, sufiĉe altigi eluzimunan de la materialo kun senŝanĝa grado de magnetiĝo de saturiĝo kaj sen rimarkebla malaltiĝo de ĝia magneta penetreco. Ĉefa postulo dum simila alojado estas uzo de certaj dimensioj de enmiksaĵoj de facile fandeblaj elementoj — ili ne devas esti samgrandaj kun karakteriza dikeco de Bloch-vando de magneto-mola materialo. Plialtiĝo de eluzimuno de magneto-molaj materialoj povas esti sukcese uzata en diversspecaj sonregistraj kaj sonreproduktaj instalaĵoj kaj ankaŭ en sistemoj de vidioregistro. Estas ebla, ke la plej perspektiva en tiu ĉi okazo estos varianto de surfaca alojado de magneto-molaj alojoj per antifrikciaj elementoj, kiel plumbo, bismo kaj stano.

Specifecoj de interinfluo en sistemoj de NK povas esti uzitaj ankaŭ dum produktado de izotropaj kaj anizotropaj magneto-malmolaj materialoj kun alta grado de magneta energio. La plej interesaj eblecoj en menciita senco

aperas sur kampo de produktado de heterofazaj materialoj surbaze de la fero, nikelo, kobalto kaj iliaj alojoj, interalie ESD-magnetoj.

Foresto de reciproka solveco en solida stato, ebleco de kontrolebla ŝanĝo de disperseco kaj formo de dua neferomagnetaj fazoj povus krei bonegajn premisojn por atingi de alta nivelo de magnetaj energioj en similtipaj materialoj.

Nomu ni kelkajn eblajn sistemojn, surbaze de kiuj dum sekvo de menciitaj postuloj povus esti atingitaj altaj gradoj de koercitiva forto kaj resta indukcio kune kun altaj antifrikciaj kvalitoj: Fe-Cu, Fe-Pb, Fe-Sn, Fe-Bi, Fe-Ag, Co-Pb, Co-Se, Co-Bi, Ni-Pb, Ni-Ag, Fe-Co-Pb, Fe-Co-Bi, Fe-Ni-Pb.

2.4. Elektroteknikaj materialoj

Estas konataj pli ol 60 binaraj sistemoj de NK, enhavantaj unu el tiuj kvar elementoj, kiel Ag, Cu, Al kaj Fe, bazaj por kreo de kurentokondukaj kaj varmokondukaj materialoj.

Fakta foresto de reciproka solveco en solida stato ekskluzivas eblecon de forta malaltiĝo de elektro- kaj varmokondukeco de menciitaj elementoj dum kunfandiĝo kun iu ajn el NK, sed ioma ilia malaltiĝo estos preskaŭ rekte proporcia al kvanto de la dua komponanto. Samtempe menciita malaltiĝo de elektro- kaj varmokondukeco povas esti sufiĉgrade kompensita multoble per altiĝo de firmeco de kurentokondukilo. Tiel, dispersaj eroj de kromo, fero, nikelo kaj ceteraj similaj elementoj povas signife plifirmigi kondukilon el arĝento, sen rimarkebla malaltiĝo de ĝia elektro- kaj varmokondukeco. Analogan fenomenon okazigas Be kaj Ge al la aluminio, Fe, Mo, Nb, Re, Ti, Ta kaj Cr al la kupro, kaj ankaŭ Ba, Ca kaj Mg al la fero.

El la sama vico de NK en la arĝenton, kupron, aluminon kaj feron kune kun heterofazaj elementoj-firmigiloj, povas esti enkondukitaj facile fandeblaj elementoj, malaltigantaj eluzon kaj frotkoeficienton de glito, kio precipe gravas por detaloj de kurentoakceptiloj. Per konforma alojado de tiuj facile fandeblaj elementoj eblas atingi specialajn kontaktajn kvalitojn de materialoj.

Dum pritrakto de premisoj por realigo de specialaj fiziko-teknikaj kvalitoj de alojoj el NK estis indikite, ke unu el ili estas ebleco de fiksado en kelkaj sistemoj staton de supersaturita, solida solvaĵo, ekzisto de kiu ne sekvas el diagramo de ekvilibro. Tiu ebleco, aparte, jam estis montrita por sistemoj Cu-Pb, Cu-Bi, Al-In, Al-Sn kaj estas studota plu.

Simila supersaturado nature estas akompanata de ŝanĝo de periodo de krado de elementoj, aparte de kupro kaj aluminio, kio povas konduki al signifaj rezultoj, ekzemple surkampe de superkondukeco.

Novaj rezultoj en metalografio de superkondukecaj materialoj eblas atendi, analizante probablon de strukturaj transformoj en tiuj sistemoj de NK, kiel Cu-Pb.

Finante la parton, dediĉitan al eblecoj de uzado de sistemoj de nemiksiĝantaj komponantoj por produktado de materialoj kun apartaj elektra kvalitoj, necesas rimarki, ke inter similaj sistemoj estas renkontataj la pluraj, enhavantaj tiaj elementoj kiel Te, Se, Sb, Cd kaj aliaj.

Tiel, studataj sistemoj povas ankaŭ prezenti perspektivan bazon por kreo de plibonigitaj duonkondukaj materialoj.

2.5. Kelkaj aliaj eblaj aplikterenoj por sistemoj de nemiksiĝantaj komponantoj

Inter aliaj gravaj eblecoj de aplikado de materialoj el NK eblas nomi jenajn:

- kontraŭradiada defendo de konstruivaj materialoj pere de egala dislokiĝo laŭ la volumeno aŭ laŭ surfaco de enmiksaĵoj de la plumbo kaj aliaj pezaj elementoj;
- kontraŭvarma defendo de detaloj, funkciaj ĉe altaj temperaturoj pere de "elŝvitigaj" materialoj, tiaj kiel volframo-kupro, niobio-kupro, volframo-stano kaj aliaj;
- hejtaj detaloj de nukleaj reaktoroj;
- komponitaj materialoj kun altigita denseco de tipo W-Co.

En tiu ĉi parto ni pritraktis eblecojn de apliko de materialoj surbaze de NK, kiujn eblas antaŭvidi elirante ĉefe el analizo de fiziko-kemiaj specifecoj de komponantoj. Kiel estas videbla el supremmontrita analizo, tiuj eblecoj estas

sufiĉe diversaj, tamen por realigo de ili necesas, ĉefe antaŭ ĉio alia, akiro de regula reciproka lokiĝo de strukturaj elementoj ĉe sufiĉe alta disperso de ili, kio por studataj sistemoj ne estas ĉiam facila, kaj iam estas eĉ neebla.

Formigo de strukturo en alojoj de nemiksiĝantaj komponantoj dum kunfandigo kaj postsekva kristaliĝo.

En titolo de ĉi tiu parto estas akcentitaj kondiĉoj de formigo de strukturoj, pri kiuj temos sube. Tio estas farite por substreki principan diferencon inter novaj teknologiaj eltrovaĵoj kaj la tradiciaj. Lige kun tio necesas menci, ke nuntempe ekzistantajn manierojn de produktado de metalaj materialoj eblas disdividi je du ĉefaj grupoj — metalurgiaj, bazitaj sur kunfandiĝo de komponantoj kaj posta kristaliĝo de fandaĵo, kaj manieroj de pulvora metalurgio, kombinantaj iam premadon kaj brulkunigon de pulvoroj kun ilia saturado per fandaĵoj de facile fandeblaj metaloj. Tamen malgraŭ diverseco de konataj variantoj de produktado de alojoj, ĉiuj ili ne eliras el kadroj de nomitaj bazaj grupoj kaj apartenas plejparte al unua grupo de metalurgiaj metodoj.

Metodoj de tiu grupo malplej taŭgas por produktado de alojoj de NK, precipe por sistemoj de tipo E3, E4 kaj E5. Tamen ĉar ĝuste dum kunfandiĝo kaj kristaliĝo pli klare estas videblaj specifecoj de tiuj sistemoj, do indas studi ĉefajn faktojn, menciitaj en literaturo, koncerne formadon de strukturo en alojoj de NK tradicimaniere.

3. Formado de strukturo en alojoj surbaze de sistemoj E1

Tipa diagramo de ekvilibro por sistemoj E1 estas montrita skize sur fig. 1. Ĝi karakteriziĝas per ĉeesto de degenerinta eŭtekta transformo, foresto de rimarkebla reciproka solvado en solida stato kaj sufiĉe signifa intervalo de kristaliĝo por plej multo de alojoj. Kiel ĉefaj ekzemploj de sistemoj de simila tipo eblas nomi jenajn: Ag-Bi, Al-Be, Al-Ga, Al-Sn, Bi-Cu, Cu-Li, Ga-Zn, In-Zn, Si-Zn, kaj ankaŭ kelkaj similaj sistemoj, limigitaj per puraj metaloj kaj intermetalidoj, ekzemple FeAl₃-Al, AlSb-Sb, CdTe-Te.

Simpla listigo de tiuj sistemoj montras, ke ilia praktika signifo estas sufiĉe granda — sufiĉas, por ekzemplo, diri pri tiuj sistemoj kiel Al-Sn, Al-Be, Cu-Bi.

Ni studu pli detale specifecojn de formado de strukturo en sistemoj de tipo E1 sur ekzemplo de alojoj Al-Sn kaj Be-Al (fig. 2, 3). La unua sistemo, kiel estas konate, estas bazo por la plej bonaj antifrikciaj eluzimunaj alojoj, la dua servas por produktado de firmaj malpezaj maŝinkonstruaj alojoj de speciala destino. En alojoj de sistemo Al-Sn, enhavantaj ĝis 50 pez.% Sn, intervalo de kristaliĝo estas 370-420°C. Kristaliĝo komenciĝas kun eliĝo de dendritoj de la preskaŭ pura aluminio, enhavo de la stano en kiuj ne estas pli ol 0,1 pez.%. Kristaloj de la aluminio intense segregacias laŭ denseco, tial fandaĵbloko de alumini-stana alojo ordinare rezultiĝas ege ne homogena laŭ la konsisto, se ne uzi specialajn metodojn por forigo de segregacio laŭ denseco, ekzemple per akcelita malvarmigo de supervarma fandaĵo.

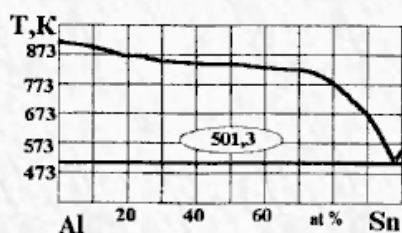


Fig. 2. Diagramo de ekvilibro de listemo Al-Sn

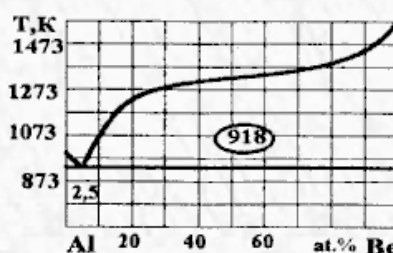


Fig. 3. Diagramo de ekvilibro de tistemo Al-Be

Alumini-beriliaj alojoj diference de la alumini-stanaj estas ne tiom inklinaj al segregacio laŭ specifa maso. Al ĉefaj specifecoj, difinantaj formadon de strukturo de ili, indas apartenigi indikitajn antaŭe por E1 sistemoj tre grandan intervalon de kristaliĝo — pli ol 500°C kaj pli altajn gradojn de kaŝita varmo de kristaliĝo kaj varmokapacito, pli ol trioble pli altaj ol tiuj de aliaj alumini-aj alojoj. Menciitaj specifecoj malfaciligas produktadon de altkvalitaj gisaĵoj kaze de disvolviĝo de kruda dendrita strukturo, granda poreco kaj signifa longeco de zono de kolonaj kristaloj. Pro tio, ke kaŝita varmo de kristaliĝo de berila fazo okazigas dominan influon al varmoenhavo de alojo, tradiciaj metodoj de ekstera varma efiko al strukturo formiĝanta fandbloko evidentiĝas malmulte efektiva. Por venki menciitajn malfacilaĵojn estas proponata enkonduko en procezon de solidiĝo de alojo Be-Al ĝis 10% laŭ maso de fandiĝanta konstruaĵo el la sama alojo, varmigo kaj fandado de kiu interne de la fandaĵo postulas eliminon de parto de eliĝanta varmo de kristaliĝo.

4. Formado de strukturo en alojaj surbaze de sistemoj tipe E2-a

Tipa reprezentanto de la subklaso estas sistemoj Fe-Cu kaj Nb-Cu (des. 4,5). Vidu ni pli detale procezon de formado de strukturo en sistemo Fe-Cu.

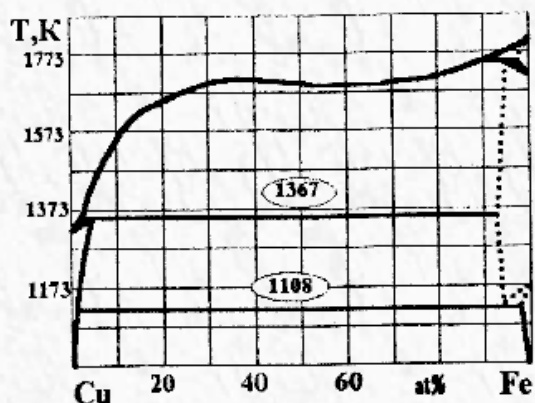


Fig. 4. Diagramo de ekvilibro de sistemo Cu-Fe

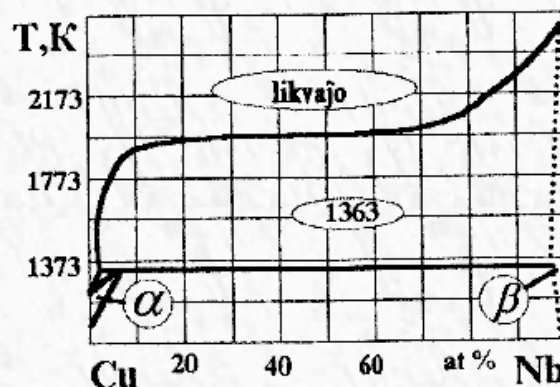


Fig. 5. Diagramo de ekvilibro de sistemo Cu-Nb

Detala kvanta termoanalizo de alojaj de sistemo Fe-Cu en temperatura intervalo de 300-1600°C montras, ke maksimuma grado de varmo de miksado kun 1600°C estas observata ĉe alojo kun 47% de la kupro, ĝi evidentiĝis 2200 kal/g-a. Termodinamika analizo de aktivecoj ankaŭ konfirmas antaŭe trovitan tendencon de la sistemo al distavoliĝo.

Koncentriteca kurbo de densecoj de alojaj Fe-Cu deklinas de ideala aditiva rekto: dum miksiĝo en la sistemo okazas precipe signifa altiĝo de specifa volumeno, kio bone akordiĝas kun faktoj de termodinamika analizo, antaŭvidanta eblecojn de distavoligo en likva stato. Vico da esploristoj montras, ke en sistemo Fe-Cu ekzistas dominado de fortoj de para interligo de samnomaj atomoj super tiuj de la malsamnomaj. Rezulto de tio estas forto de forpuŝo Fe-Cu, kaj en binara sistemo Fe-Cu sen almiksaĵoj estas tre dekliva likveclinio, konstatanta pri tendencoj al distavoligo.

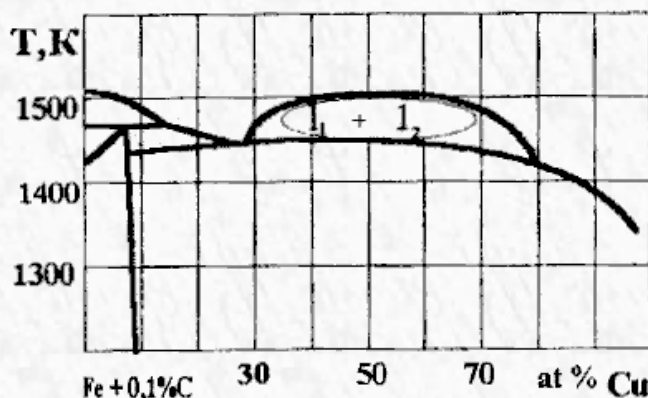


Fig. 6. Pseŭdoduobla sekcado de diagramo de stato de sistemo Fe-Cu ĉe konstanta interrilato Fe:C

Por tio, ke komenciĝu distavoliĝo al du likvaĵoj L1 kaj L2 (fig. 6) sufiĉas aldoni en sistemon kelkajn centonojn da procento de karbono. Aldono 0,13% da karbono al alojo 50-50 okazigas plenan distavoliĝon de la alojo al fera kaj kupra fazoj. Tiel la karbono realigas inklinon de la sistemo al distavoliĝo, aperanta ĉe ĝi, evidente, ankaŭ dum foresto de almiksaĵoj.

En sistemo Fe-Cu fortoj de forpuŝo kondukas al tio, ke procezo de formado de likva solvaĵo estas endoterma, sed libera molenergio de miksado estas priskribata per ekvacio

$$\Delta G_{cm} = H_{cm} - T\Delta S_{cm}.$$

Ĉe pli altaj temperaturoj dominas entropia faktoro $\Delta G_{cm} < 0$, $\frac{\partial^2 G_{cm}}{\partial N_{cm}^2} > 0$ en tuta koncentriteca intervalo, kio

konformas senliman reciprokan solvodon de la fero kaj kupro en likva stato. Dum plimalaltiĝo de temperaturo

entropia faktoro malgrandiĝas kaj kun eĉ negranda kvanto da karbono en koncentriteca kurbo de G_{cm} aperas parto kun minusa kurbeco (vidu fig. 6), kio ja atestas distavoliĝon.

5. Formado de strukturo en sistemoj de tipo E3

Tipo E3 — estas lasta el vico E1-E5 de sistemoj de nemiksiĝantaj komponantoj, en kiuj eblas produktado de pli-malpli homogene dislokiĝo de strukturaj komponantoj en volumeno de fandbloko pere de kunfandiĝo kaj posta kristaliĝo. Pli frue tamen jam estis menciite, ke tio estas vera ĉefe nur por alojaj proksimaj al monotektoj: en antaŭ- kaj postmonotekaj alojaj segregacio laŭ specifa maso povas esti sufiĉe signifa.

El sufiĉe granda nombro de metalaj kaj nemetalaj sistemoj de simila tipo ĝis nuna tempo detale estas studitaj ne pli ol 10-15. La plej grandan atenton inter la studitaj estis direktita al sistemoj zinko-plumbo (fig. 7.), kupro-plumbo (fig. 8), bismo-zinko kaj kelkaj trioblaj sistemoj sur ilia bazo.

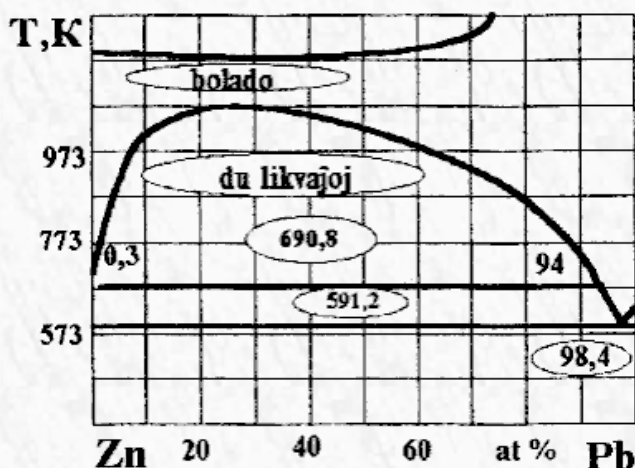


Fig. 7. Diagramo de ekvilibro de sistemo Zn-Pb

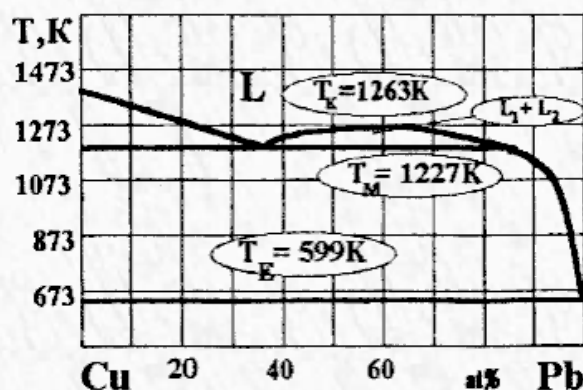


Fig. 8. Diagramo de ekvilibro de sistemo Cu-Pb

Komenco por detalaj esploroj pri limoj de nemiksiĝeco en metalaj sistemoj en likva stato estis farita sur ekzemploj de sistemoj Zn-Pb kaj Zn-Bi. Por la unua fojo estis aplikita metodo de elpreno de provaĵoj de likva metalo el distavoliĝantaj partoj de fandaĵo per speciala provilo varmigitaj ĝis konvena temperaturo, kio signifas altigis precizecon de difino de limaj koncentritecoj. Kiel oportuna modelo la sistemo Zb-Bi estas pristudata ankaŭ nuntempe. Aparte la sistemo estis kiel objekto por kontrolo de diversaj teorioj de koalescenca en distavoliĝantaj fandaĵoj; en kvar fandaĵoj de postmonotekta konsisto, enhavantaj 4-10 pez.% Bi oni studis procezon de koalescenca de likvaj gutoj surbaze de bismo ĉe temperaturo iom pli ol monotekta.

Al zono de nemiksiĝeco en sistemoj Zn-Pb kaj Zn-Bi signifan influon okazigas diversaj aldonaĵoj, tiuj kiel kupro, kromo, nikelo kaj titano. Alojado de monotektoj sistemoj per tria komponanto plej ofte larĝigas zonon de nemiksiĝeco kaj altigas krizan temperaturon de distavoliĝo. Tamen se alojiga aldonaĵo estas mem malfacile fandebla komponanto, do alojado kondukas al rimarkebla dispecio de enmiksaĵoj de peza facile fandebla komponanto kaj sufiĉgrade subigas segregacion laŭ specifa maso.

Estis studitaj ankaŭ influo de aldonaĵoj de facile fandebla komponanto — la stano — al formado de strukturo de alojaj zinko-plumbo. Analizo montris, ke por akiri homogenan dislokiĝon de produktoj de distavoliĝo en likva stato necesas pulvoriĝo de fandaĵo al eroj de likva fazo kun grandeco 10^{-8} m, kondiĉe, ke interfaza surfaca tensio $\sigma \rightarrow 0$. La lasta kondiĉo estas plenumata kun temperaturoj iom malpli ol kupolo de distavoliĝo. Post memfara emulgiĝo de fandaĵo necesas ĝia fiksado pere de akcelita malvarmigo, kio eblas signife pli facile efektiviĝi, se maksimuma temperaturo de kupolo de distavoliĝo T_K relative ne alta.

Malaltigi T_K eblas per enigo de komponanto en la fandaĵon, konsistigantan kune kun du la estantaj eŭtektaj sistemoj. Tiu komponanto estas la stano rilate al Zn kaj Pb. Eksperimentoj montris, ke aldonado al fandaĵo 28Pb-38Zn 34 pez.% da la stano malaltigas krizan temperaturon T_K de 1073°K por duobla fandaĵo, ĝis 653°K por la triobla, kio estas teknologie tre grava.

Estas pristudita ankaŭ influo de tria komponanto (aparte de la stano kaj nikelo) al limoj de zono de distavoliĝo en sistemo kupro-plumbo. La stano signifas larĝigas ne nur koncentritecajn limojn de zono de nemiksiĝo, sed ankaŭ nivelon de T_K . Tiel kompare kun T_K por sistemo kupro-plumbo, egala al 1000°K, en sistemo kupro-stano-plumbo ĝi altiĝas ĝis 1408°K. Montrita fenomeno estis klarigita pere de influo de intermetalido en intervalo de

temperaturoj de distavoliĝo. Tiel, por ekzemplo, dum interrilato de la kupro kaj stano en fandaĵo, konforma al kombinaĵo Cu_3Sn_8 en ĝi, kun temperaturo iom pli ol punkto de fandiĝo de tiu kombinaĵo en fandaĵo povas solviĝi ne pli ol 3 pez.% da la plumbo. Pligrandiĝo de solveco de la plumbo en tia fandaĵo kun plialtiĝo de temperaturo estas kaŭzata de disociado de kompleksoj Cu_3Sn_8 .

Dum aldonado de negrandaj kvantoj de la plumbo forte malaltigas grado σ de la kupro: ĉe $1100\text{--}1200^\circ\text{C}$ aldonado de 1 pez.% da la plumbo malaltigas gradon σ de 1300 ĝis 400 din/cm. Estis ankaŭ montrite, ke fluktuada mikroheterogeneco de fandaĵoj Cu-Pb, rimarkebla proksime de kriza punkto de distavoliĝo, kondukas al plialtiĝo de viskozeco de fandaĵoj.

Pluraj esploristoj sciigis pri konstataĵo de fakto de epitaksio inter plumba kaj kupra fazoj en kupro-plumbaj alojoj. Aparte estis menciite, ke epitaksa kresko de kristaloj de la plumbo sur kupra subaĵo oni observis sendepende de kondiĉoj de eksperimento.

Relativa simpleco de produktado de alojoj de la kupro kaj plumbo en la plej grava intervalo de koncentritecoj estas klarigata pere de specifecoj de diagramo de ekvilibro de la sistemo: nealta kupolo de distavoliĝo en likva stato kaj signifa enhavo de la plumbo en monotekta punkto. Rimarkindas, ke ekzaktaj nombroj de kriza temperaturo de distavoliĝo, monotekta temperaturo kaj monotekta konsisto dum pluraj jardekoj estis objekto de konstanta atento kaj pliĝustigo.

Por hodiaŭa tago fakte estas akceptitaj sekvaj nombroj: monotekta temperaturo $T_M=1227\text{K}$, monotekta enhavo de la plumbo $L_m=36$ pez.% kaj kriza temperaturo de distavoliĝo $T_K=1273\text{K}$ (vidu fig. 8).

Tipaj kondiĉoj de eksperimentoj, uzataj dum studado de sistemo kupro-plumbo, indas konsideri kiel ordinaraj por ĉiuj metalaj sistemoj — kunfandiĝo, supervarmigo de fandaĵo ĝis unufaza stato, tenado en unufaza zono por homogeniĝo kaj malvarmigo kun diversaj rapidecoj.

Rezulte de pristudo de mikro-kaj makrostrukturoj de laŭlarĝa sekco de fandblokoj de kupro-plumbaj alojoj (de 50 ĝis 300g pezaj) estis konstatitaj reguloj de formado de strukturo en la alojoj, konverĝantaj al jenaj:

1. en antaŭmonotektaj alojoj kristaliĝo komenciĝas kun eliĝo de unuaj kristaloj de la kupro, kiuj pro diferenco de specifaj masoj rilate al la fandaĵo, riĉigita per la plumbo, supreniĝas;
2. en postmonotektaj alojoj interne de kupolo de distavoliĝo montriĝas disiĝo de la fandaĵo je du likvaj fazoj, dum tio la fazo, enhavanta pli da kupro, supreniĝas kaj laŭ malaltiĝo de temperaturo akiras monotektan konsiston;
3. laŭ plialtiĝo de enhavo de la plumbo en postmonotektaj alojoj tendenco al distavoliĝo kreskas malrapide, tiel ke dum relative malrapida kristaliĝo en gisformujo (kokuilo) la fandaĵo kun 45% da la plumbo kondukas preskaŭ same, kiel monotekta. Makrosegregacio estas pli forta en antaŭmonotektaj alojoj;
4. akva hardado de postmonotektaj fandaĵoj, supervarmigitaj ĝis unufaza stato, estas akompanata per certa dicpeciĝo de strukturo, sed ne subigas formadon de zonoj, riĉigitaj per la plumbo.

Pri influo de Al al formado de strukturo en alojoj kupro-plumbo estas konate nur, ke eĉ malgrandaj kvantoj — ĉirkaŭ 1 pez.% da la aluminio kondukas al plena distavoliĝo en sistemo kupro-plumbo en ordinaraj kondiĉoj de kristaliĝo, kaj produkti alojojn kun pli-malpli homogenea dislokiĝo de la plumbo oni ne sukcesas.

En tiu ĉi parto ni pritraktis specifecojn de formado de strukturo de alojoj de tipoj E1-E3 en kondiĉoj de tradicia kunfandiĝo kaj postsekva kristaliĝo de komponantoj. El menciitaj faktoj estas videble, ke malgraŭ certaj distingo de sistemoj de tipoj L, V kaj Z en studataj sistemoj principe eblas produktado de materialoj pere de kunfandiĝo kaj kristaliĝo. Tamen malgraŭ tio, ke tendenco al distavoliĝo kaj makrolikvado laŭ specifa maso en certaj limoj povas esti neŭtraligita per akcelita malvarmigo, simila teknologio, ordinare donas neripetebajn rezultojn rilate al makro- kaj mikrostrukturo de alojoj, t.e. egala dislokigo de strukturaj komponantoj, iliaj dimensioj kaj formoj ne estas kontroleblaj parametroj.

Se rilate al alojoj surbaze de sistemoj E1-E3 tradicia metalurgia teknologio principe estas aplikebla, kvankam limigas kvaliton de materialoj, do alojoj surbaze de sistemoj E4 kaj E5 (vidu ekz. fig. 9,10) per ĝia helpo entute ne povas esti produktitaj. Granda diferenco de fandtemperaturoj kaj specifaj masoj, fakta degenereco de monotekta transformo kaj foresto de iom-ajn longa zono de unufaza likva solvaĵo faras principe neebla produkton de materialoj pere de kunfandiĝo de komponantoj kaj posta kristaliĝo.

En tiu ĉi okazo rezulto de tiu teknologio ĉiam estos fandbloko, konsistanta el du aparte lokitaj metaloj — la pli peza malsupre, la pli malpeza supre de la fandbloko (fig. 11). Ĝuste pro tiu ĉi kaŭzo dum longa tempo oni ne sukcesis produkti komponitajn materialojn de tipo aluminio-bismo kaj fero-plumbo kun enhavo de peza facile

fandebila komponanto pli ol 4-5 pez.%, kaj ankaŭ enigo de la malgrandaj, ĝis 5 pez.% de facile fandebila komponanto, estis akompanata de signifaj teknologiaj malfacilaĵoj.

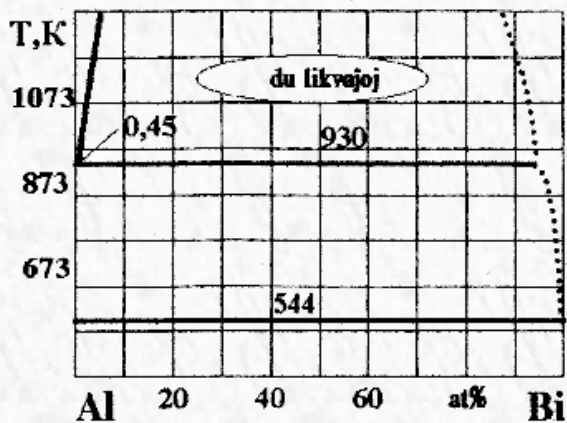


Fig. 9. Diagramo de ekvilibro de sistemo Al-Bi

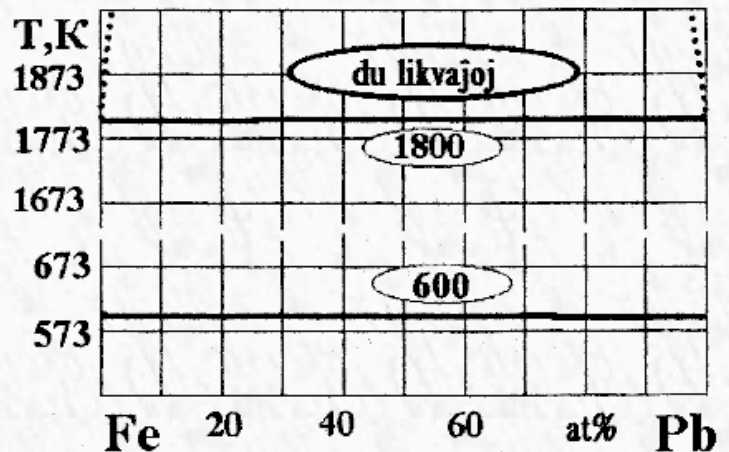


Fig. 10. Diagramo de ekvilibro de sistemo Fe-Pb

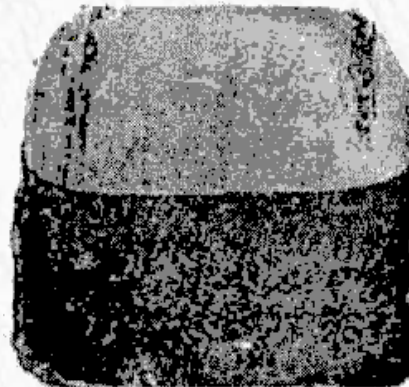


Fig. 11. Makrostrukturo de gisita alojo Al-Pb

Tial por produktado de alojoj el NK dum longa tempo oni ellaboradis specialajn metodojn de fabrikado, bazitaj ĉefe sur akiro de neekvilibrigaj kondiĉoj de formado de strukturo. Plue estas prezentota detala priskribo de la metodoj (inter ceteraj ankaŭ kelkaj ellaboritaj de ni) kun pritrakto de iliaj kvalitoj kaj mankoj, kaj ankaŭ limoj de aplikado. Kune kun ekzemploj de aplikado de la metodoj por sistemoj E4, E5 estos demonstrita ilia avantaĝo antaŭ tradiciaj metodoj kaj ankaŭ rilate al sistemoj E1-E3.

6. Analizo de konataj manieroj de produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj

Konforme kun diagramoj de ekvilibro tipaj binaraj alojoj surbaze de sistemoj de nemiksiĝantaj komponantoj devas konsisti el du fazoj, per certa maniero dislokiĝantaj en volumeno de fandbloko. Ĉar reciproka solveco de NK en solida stato estas neglekteble malgranda, do ĉiu el fazoj de la alojo fakte estas unu el komponantoj, aŭ en apartaj okazoj intermetalida kombinaĵo sur ilia bazo.

Dominanta, de vidpunkto de fiziko-mekanikaj kvalitoj de similaj materialoj, estas reciproka dislokiĝo de fazoj unu rilate al la alia kaj ilia disperseco. Kalkuloj kaj eksperimentoj montras, ke ideale estus aspiri al maksimume ebla disperseco de la fazoj kaj maksimume homogena ilia dislokiĝo en volumeno de materialo. Tamen uzante tradiciajn metodojn de kunfandiĝo kaj kristaliĝo, ricevi similan mikrostrukturon en alojoj de NK ordinare oni ne sukcesas. Plej ofte produktata fandbloko disdividiĝas je du partoj — la funda, pliriĉita per peza komponanto, kaj la supra, pliriĉita per la malpeza. En sistemoj, similaj al sistemo Al-Pb, ambaŭ partoj de fandbloko fakte konsistas el puraj komponantoj.

Pli frue estis jam menciite, ke ankaŭ en tiuj ne multaj ekzemploj, similaj al sistemo Cu-Pb, kiam peza facile fandebila komponanto ne plene segregacias laŭ maso, strukturo de alojoj, produktitaj per tradiciaj metodoj, ordinare ne konvenas al farataj postuloj kaj malbone ripetiĝas de fando al fando.

Traktitaj supre specifecoj de sistemoj NK kaj kaŭzitaj de ili seriozaj teknologiaj malfacilaĵoj kondukis al provoj ellabori la plej diversajn specialajn manierojn por produktado de materialoj sur ilia bazo. Ĉiuj ili, malgraŭ grandaj distingoj, estas unuigitaj per unu komuna signo, nome — per aspiro eviti distavoliĝon en likva stato.

En tiu ĉi parto estas prezentata sistema priskribo de konataj manieroj de produktado de materialoj de tiu klaso kaj, aparte, kelkaj manieroj, antaŭnelonge ellaboritaj en MGIU.

6.1. Metodoj de pulvora metalurgio

Ĝis antaŭnelonge oni opiniis ke produktado de tiaj komponitaj materialoj, kiel, ekzemple, Fe-Pb, eblas nur pere de metodoj de pulvora metalurgio.

Oni dividas du variantojn de produktado de similaj komponitaj materialoj el pulvoroj. Laŭ unu el ili bezonatas anticipa preparo de miksaĵo el pulvoroj de komponantoj kun certa kvanta proporcio kaj disperseco, briketigo de la pulvormiksaĵo kaj posta brulkunigo de la briketo. Laŭ la dua varianto bezonatas prepari brulkunigitan porozan skeleton el malfacile fandebla komponanto kun posta saturado de ĝi per fandaĵo de facile fandebla komponanto. En tiu ĉi priskribo ne estas necesa detaligi teknologion de produktado de miksaĵoj, briketigo, brulkunigo kaj saturado, ĉar multnombraj informoj pri menciitaj procezoj estas en vico da monografioj kaj artikoloj.

Indiku ni nur jenajn ĉefajn mankojn de pulvora teknologio aplike al sistemoj de NK, kiuj ne permesas plene uzi avantaĝojn de materialoj sur ilia bazo:

- konstruiva firmeco kaj kelkaj aliaj laboraj kvalitoj de brulkunigitaj komponaĵoj el nemiksiĝantaj komponantoj kelkefoje estas signife malpli grandaj ol teorie probablaj por la sistemo, kio estas klarigebla per limigo de temperaturoj de brulkunigo pro disfluo de facile fandebla fazo, konservo de resta fermita porozeco kaj aliaj kaŭzoj;
- limigiteco de dimensioj de produktaĵo kaj ebleco produkti nur relative facilajn formojn;
- malfacile forigebla oksida ŝelo surface de dispersaj eroj, relativa influo de ju pli grandaj, des pli malgrandaj brulkunigitaj eroj, kaj alta gasenhavo negative influas al firmecaj kaj laboraj kvalitoj de materialoj, malfaciligas ĝian postan plastikan deformadon;
- ne alta imuno de brulkunigitaj materialoj kontraŭ influo de altaj temperaturoj, kaŭzita de nestabileco de eroj de facile fandebla fazo kaj ilia emo malgrandigi sian surfacan energion sub influo de fortoj de surfaca streĉo;
- fakta foresto de ebleco por kontroli formon de enmetaĵoj de facile fandebla fazo kaj egala dislokiĝo en volumeno dum preparo de miksaĵoj;
- neceso de produktado de pulvoroj de malfacile fandeblaj kaj facile fandeblaj komponantoj kaj ilia defendo de oksidiĝo, kio signife plikostigas finan produktaĵon.

Supre nomitaj mankoj kaŭzis, ke malgraŭ vasta uzado en industrio de brulkunigitaj materialoj surbaze de NK kaj en Rusio, kaj eksterlande aktive estis kaj estas nuntempe serĉado de alternativaj teknologioj, kiuj ebligus produkti senporajn materialojn kun certa kemia konsisto kaj mikrostrukturo kun bona reprodukteco de atingataj rezultoj.

La plej multo el metodoj, pri kiuj temos plu, estas bazitaj sur ideo de subigo de segregacio laŭ specifa maso en likva stato kaj fiksado de alttemperatura stato pere de akcelita malvarmigo.

6.2 Metodoj, bazitaj sur subigo de segregacio laŭ specifa maso

Metodoj de produktado de senporaj materialoj el NK, bazitaj sur subigo de segregacio laŭ denseco, celas tiun aŭ la alian deeksteran influon al sistemo de NK, bremsantan procezon de distavoliĝo kaj segregacio. Ĉar plene subigi segregacion laŭ denseco ne estas ebla, tial nepre por realigo de traktata grupo de metodoj de produktado de materialoj el NK estas akcelita malvarmigo de fandaĵo samtempe kun efiko de eksteraj faktoroj, bremsantaj segregacion.

Kiel jam estis menciite supre, necesas dividi du tipojn de sistemoj de NK — tiujn, en kiuj en industriaj cirkonstancoj estas atingebla stato de unufaza homogena likva solvaĵo aŭ sistemoj kun fermita kupolo de distavoliĝo, kaj tiujn, en kiuj ĝis vaporiĝo de unu el komponantoj kunekzistas du likvaj solvaĵoj, forte diferencaj laŭ denseco, aŭ sistemoj kun malfermita kupolo de distavoliĝo. Apliko de konkreta maniero de subigo de segregacio en la sistemo kaj atendata rezulto unuavice dependas ĝuste de tipo de sistemo. Plue dum traktado de ĉiu el metodoj ni atentigos aparte pri tio ĉi. Al metodoj, bazitaj sur subigo de segregacio laŭ denseco, apartenas:

- metodo de varmigo de fandaĵo ĝis zono de unufaza homogene likva solvaĵo (en la sistemoj, kie tio eblas) kaj akcelita malvarmigo de fandaĵo;
- metodo de kristaliĝo sub premo kun akcelita malvarmigo;
- plialtigo de efektiva viskozeco de fandaĵo per surface aktivaj aldonaĵoj;
- mekanika miksaĵo de du-faza fandaĵo dum procezo de kristaliĝo kaj akcelita malvarmigo;
- ultrasona miksaĵo de fandaĵo kaj akcelita malvarmigo;
- kristaliĝo en mikrogravita stato;
- kristaliĝo en kvazaŭsenpezeca stato sub efiko de krucigaj elektra kaj magnetaj kampoj kaj akcelita malvarmigo;
- metodo de direktita kristaliĝo.

6.3. Metodo de granuligo de supervarmigita fandaĵo kun posta brulkunigo de granuloj

Metodo de granuligo estas varianto de metodo de supervarmigo de fandaĵo kaj akcelita malvarmigo. Pri demandoj de strukturformado dum rapida kaj superrapida malvarmigo kun rapideco ĝis 106 K/c oni konstante kaj multe atentis. Tamen la plej vastan praktikan aplikon, aparte por produktado de antifrikciaj aloj surbaze de sistemo Al-Pb, atingis metodo de granuligo de supervarmigita fandaĵo kun posta brulkunigo de granuloj. Estis kreita speciala instalaĵo por produktado de granuloj de aluminio-plumba alojo. Ĝia ĉefa parto estas cilindra glaso kun rondaj aperturoj, rotacianta kun rapideco ĉirkaŭ 1500 cik/min.

Dum kontakto de fandaĵfluo kun rotacianta glaso formiĝas gutoj-granuloj kun diametro de 1 ĝis 5 mm. Antaŭ granuligo la alojajn supervarmigis ĝis zono de unufaza likva solvaĵo — antaŭmonotektaj aloj super linio de likveco je 200-250°, sed postmonotektaj aloj, enhavantaj ne pli ol 30 pez. de plumbo — je 150-200° super la linio, limiganta zonon de distavoliĝo. Malvarmigo de dispergita fandaĵo efektiviĝis en la akvo, dank' al malgranda diametro de granuloj rapideco de malvarmiĝo atingis 103-104 K/c, kio ebligis fiksi en volumeno de granuloj, diametre ĝis 5 mm, egalan dislokiĝon de etaj eniĝoj de la plumbo en matrico de aluminio. Al egala dislokiĝo de eniĝoj de la plumbo en sufiĉe signifa kvanto — ĝis 30 pez% helpis tio, ke alta rapideco de malvarmigo de supervarmigita fandaĵo okazigis dekstriĝon de linioj limigantaj zonon de distavoliĝo kaj malaltiĝo de temperaturo de monotekta transformado.

Por uzo de produktitaj granuloj en glitlagroj oni ilin plue premas, brulkunigas kaj plastike deformas. La metodo, kiel sekvas el la supre skribita, taŭgas por tiuj sistemoj, kie eblas supervarmigi aloj kun certa konsisto ĝis zono de unufaza likva solvaĵo; al tiuj ekzemple apartenas sistemoj aluminio-plumbo kaj kupro-plumbo. Tamen dum aplikado de industria teknologio de granuligo kaj brulkunigo aperis problemoj, kiujn, kiel evidentiĝis, malfacile eblas solvi. Tiel, premado kaj brulkunigo signife malfaciliĝas per tio, ke surface de granuloj formiĝas heterogenaj eniĝoj de la plumbo, kaj ankaŭ oksidaj ŝeloj de la plumbo kaj aluminio. Negativan rolon ludas ankaŭ solvita en granuloj la hidrogeno, trafanta supervarmigitan fandaĵon dum kontakto kun atmosfero kaj pro adsorbo de la akvo tra oksida ŝelo. Se ne okazigi malaltiĝon de ĝia kvanto antaŭ brulkunigo de granuloj kaj ilia plastika deformado, do post malvarma laminato okazas ŝvelado de aluminio-plumba alojo.

6.4. Metodo de akcelita malvarmigo de supervarmigita fandaĵo kun plua inkandesko en temperatura intervalo de solida-likvafaza ekvilibro

Tiu variaĵo de la metodo de supervarmigo de fandaĵo kaj ĝia akcelita malvarmigo indas specialan studon, ĉar en tiu okazo temas pri eblecoj de produktado de masivaj produktaĵoj (sed ne granuloj) de alojo el nemiksiĝantaj komponantoj en vasta intervalo de koncentritecoj: dum tio sferaj eniĝoj de peza facile fandebla fazo egale lokiĝas en volumeno de alojo, kaj diametro de tiuj eniĝoj eblas ŝanĝi laŭdezire.

La metodo de produktado taŭgas por ĉiuj sistemoj NK, en kiuj aloj de certa konsisto povas esti supervarmigitaj ĝis zono de unufaza likva solvaĵo (sistemoj E1-E4). Laŭ la metodo, celante altiĝon de aplikeblaj kvalitoj de materialo pere de egala dislokiĝo de pezaj facile fandeblaj komponanto de alojo, fandaĵon varmigas je 200-300° pli alte ol kriza temperaturo de distavoliĝo, sed malvarmigo de fandaĵo realiĝas kun rapideco 100-150 K/c, post kio estas farata inkandesko en intervalo inter temperaturoj de eŭtektika T_E kaj monotekta T_M de transformado en la sistemo.

Kiel jam estis menciite, distinga specifeco de la metodo estas, tio ke per ĝia helpo oni povas produkti specimenojn de relative grandaj diametroj — ĝis 30-35 mm diametre kaj, plej grave estas, ke la metodo ebligas produkti alojajn kun bona reproduktebleco de strukturo kaj kontrolebla grandeco de sferaj eniĝoj. Tamen, same

kiel ĉiuj metodoj, enhavantaj supervarmigon kaj akcelitan malvarmigon, ĝi havas gravajn mankojn. La ĉefa el ili estas malalta produktiveco, ligita kun neceso pounua hardado de fanduĵoj kun fandaĵoj de certa konsisto, kaj ankaŭ litigitaj kun tio limigitaj laŭ volumeno de rezultataj fandblokoj. Tial ĉefan aplikadon proponata metodo povas trovi en industrio, por ekzemplo, de materialoj por mikroglitlagroj, posedantaj intercetere tian kvalitojn, kiuj ne povas esti atingitaj pere de tradiciaj rimedoj.

6.5. Kristaliĝo sub premo

Metodo de kristaliĝo sub premo bazigas sur hipotezo pri pligrandiĝo de efektiva viskozeco de metalaj fandaĵoj sub efiko de altaj hidrostatecaj premoj kaj pri efiko de premo al pozicio de krizaj linioj kaj punktoj de diagramo kun monotekta transformo. Kiel sekvo de realiĝo de indikitaj hipotezoj devas esti efektiva bremsado de segregacio laŭ specifa maso kaj larĝigo de temperaturo-koncentritecaj zonoj de ekzisto de unufazaj likvaj solvaĵoj en sistemoj de NK. La metodo de kristaliĝo sub premo havas du modifojn. Laŭ unua varianto estas fandado de NK, varmigo de fandaĵo pli supre ol temperaturo de distavoliĝo, sed pli malsupre ol temperaturo de vaporiziĝo de komponantoj kaj posta kristaliĝo. En tiu varianto por plialtigo de homogeneco de dislokiĝo de fazoj laŭ volumeno de alojo kaj ĝiaj mekanikaj kvalitoj la tuta procezo estas aranĝita sub ĉiufanka premo je 4-100 kbar. Por realigo de la metodo estas necesa, kiel videblas el la priskribo, atingi de zono de unufaza likva solvaĵo, kio por kelkaj sistemoj povas signifi neceson realigi sufiĉe altajn temperaturojn, tiom pli altaj, kiom pli multe da peza facile fandebla komponanto estas enkondukata en la alojon. Tiel por produkto de alojo Al-50Pb kun helpo de menciita metodo estas bezonata varmigo de la fandaĵo ĝis 1773 K, tenado dum 2 minutoj kaj malvarmigo kun rapideco ĉirkaŭ 1273 K. La tuta procezo estas aranĝata sub premo je ĉirkaŭ 75 GPa en kamero de alta premo.

Tiamaniere malgraŭ tio ke priskribita metodo estas evidente sola el konataj, per kiu eblas produkti alojojn, similajn al Al-Pb, kun enhavo de peza komponanto ĝis 50 pez.%, larĝa apliko de la metodo estas katenita per ĝia relative nealta produktiveco, limigeco de kapacitoj de produktataj materialoj kaj certaj teknikaj malfacilaĵoj de realigo.

La dua varianto de la metodo de kristaliĝo sub premo ne havas kelkajn mankojn, menciitajn supre. Ekzemple, dum ĝia realigo ne necesas varmigi objekton ĝis temperaturo de unufaza likva stato. La metodo inkluzivas anticipan preparon de pulvormiksaĵo de komponantoj de certa konsisto kaj disperseco, varmigo ĝis fandtemperaturo de unu aŭ kelkaj komponantoj kaj distingiĝas per tio, ke same kiel en unua varianto, varmigo, fandado, eltenado de solida-likva miksaĵo kaj kristaliĝo oni aranĝas sub premo je 0.4-10 GPa.

Do, temas pri kombina metodo de produktado de senporaj materialoj el NK, inkluzivantan elementojn de pulvora metalurgio kaj partan fandadon de duonprodukto sub efiko de sufiĉe granda hidrostateca premo. Ĝuste efiko de alta premo kun relative altaj temperaturoj ebligas solvi vicon da problemoj, kiuj ordinare aperas dum kutima varianto de likvafaza brulkuniĝo de duonproduktoj. Unuavice fakte plene estas foriĝantaj gasoj el duonprodukto, porozeco de rezultata produkto okazas preskaŭ nula. Sendepende de temperaturo kaj kvanto de peza facile fandebla komponanto ne okazas elfluo de likvaĵo el volumeno de la duonprodukto. Dum procezo de fandado kaj posta kristaliĝo sub premo okazas intensiva detruo de oksidaj ŝeloj sur pulvoreroj, kio signife plibonigas mekanikajn kaj laborajn kvalitojn de produktataj materialoj kaj ĝia prilaboro per plastika deformado.

Dank' al supre priskribitaj specifecoj de la metodo signife kreskas ebleco de vastigo de nomenklature de produktataj materialoj. Tiel fariĝas ebla enkonduki ajnan kvanton de nemetalaj aldonaĵoj, aparte karbidoj, nitrido k.t.p. Per helpo de la metodo estis, ekzemple, produktitaj tiaj senporaj komponaĵoj de nemiksiĝantaj komponantoj, kiel kupro-grafito, aluminio-niobio, kupro-karbido de cirkonio k.t.p., kaj ankaŭ kupro-plumbo kaj aluminio-plumbo. Per tio ĉi malfermiĝas vastaj perspektivoj por fabrikado de novaj antifrikciaj brulimunaj, varmrezistaj kaj eroziimunaj materialoj.

Inter mankoj de la varianto de metodo de kristaliĝo sub premo restas bezono pri speciala instalaĵo, kvankam parte teknikaj malfacilaĵoj de realigo de metodo povas esti malpliigitaj pere de speciale ellaborita kamero de alta premo.

6.6 Metodoj de produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj per bremsado de segregacio per aldonaĵoj

Plialtigi de efektiva viskozeco de fandaĵo per diversspecaj aldonaĵoj estas unu el la plej efikaj metodoj de bremsado de segregacio laŭ specifa maso. Kiel elementoj, plialtigantaj efektivan viskozecan de fandaĵo povas esti uzataj elementa karbono, kombino de malofteteraj elementoj, karbidoj, nitrido, aldonaĵoj de malfacile fandeblaj

elementoj, aparte nikelo, titano, fero k.a. Metodoj de produktado de materialoj el komponantoj, forte distingigantaj laŭ specifa maso, trovis sian respekulon en patentita literaturo de diversaj landoj.

Ekzemple povas esti jena skemo de realigo de la metodo rilate al sistemoj NK. Por egala dislokiĝo en matrico el elemento A de komponanto C, nemisiĝanta kun A kaj forte distingiganta de A laŭ specifa pezo, oni elektas naturan komponaĵon — eŭtektan, monotekton aŭ eŭtetidon B-C tian, ke estu almenaŭ limigita reciproka solveco en sistemo AB. Poste elektita komponaĵo B-C estas fandita, dispecigita kaj enkondukita en fandaĵon de matrica elemento.

Interago en sistemo A-B, unue, efektivas firman ligan A kaj C, kaj due, bremsas segregacion de pli peza elemento C sur fundo de gissitelo. Dank' al granda diverseco de naturaj komponaĵoj per la metodo eblas produkti diversajn materialojn surbaze de sistemoj de NK. Tiel, ekzemple, estas produktata alojo Al-Cu-Pb kun enhavo de 15 pez.% da Pb, produktado de kiu per tradicia kunfandado de komponantoj neblas pro segregacio de la plumbo. Por tio oni fondas la aluminion, varmigas la fandaĵon ĝis 700°C, poste enigas en la fandaĵon pulvoron de anticipe fandita monotekta alojo Cu-36pez.% da Pb kaj laŭeble rapide malvarmigas la fandujon, ĉirkaŭblovante ĝin, ekzemple, per malvarma aero aŭ malvarmigante en fandaĵo de eŭtektiko de ĉambra temperaturo.

Por produkti alojojn aluminio-plumbo, zinko-plumbo aŭ kupro-plumbo, enhavantaj ĝis 50 pez.% da plumbo, egale dislokiĝinta en volumeno de plumbo, oni aldonas ĝis 5 pez.% da fero, fondas ĉefajn komponantojn, supervarmigas la fandaĵon laŭeble ĝis temperaturo de unufaza stato, tenas ĝis 30 minutoj kaj malvarmigas en aero. Rezulte estas produktataj materialoj kun tute taŭga homogeneco de dislokiĝo de fazoj.

La metodoj, baziĝantaj sur altiĝo de efektiva viskozeco de fandaĵo, ne havas limigojn pri dimensioj de produktaĵoj; por ilia realigo ne estas bezonata speciala instalaĵo aŭ signifa supervarmigo. Tamen ili havas kelkajn mankojn, kiujn ne havis antaŭe priskribitaj metodoj.

Antaŭ ĉio la metodoj ne ebligas celdirekte variigi dimensiojn de fazoj de alojoj kaj ilian formon. En kelkaj variantoj ekzistas limigoj pri enhavo de peza facile fandebla elemento. En la okazoj, kiam por plialtigo de efektiva viskozeco aldonata elemento kontaktas la fandaĵon, rezulto de la kontakto povas esti fazoj nedezirataj de vidpunkto de komplekso de kvalitoj de produktita materialo.

6.7. Metodoj de produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj per mekanika miksaĵo de fandaĵo

Metodo de mekanika, kaj interalie ankaŭ de ĉiu alia miksaĵo de fandaĵo pozitive distingigas de antaŭe priskribitaj per tio, ke por ĝia realigo ne estas bezonate supervarmigi fandaĵon ĝis unufaza stato. Dank' al intensa miksaĵo de dufaza miksaĵo de likvaĵoj eblas atingi sufiĉe altan dispersecon de fazoj kaj ilian relative egalan dislokiĝon en volumeno de rezultiganta emulsio, kaj per postsekva rapida malvarmigo fiksi tiun ĉi staton en solida materialo.

La metodo baziĝas sur principo de intensa mekanika emulsiigo de fandaĵo kaj rapida malvarmigo per verŝo en gissitelon. Konvena instalaĵo konsistas el cilindra ŝtala fandujo je 90 mm diametre kaj 150 mm longe, destinita por fandado kaj supervarmigo de miksaĵo de komponantoj pere de elektrozista forno. En fundo de la fandujo estas aperturo por eligo de fandaĵo, havanta ŝtopilon kun resorta movigilo. Miksaĵo de fandaĵo efektiviĝas per helico kun rapideco de rotacio en intervalo de 0 ĝis 1450 cik/min. Dum konstruado de miksaĵo estis uzitaj ĉiuj principoj de konvena kemia teknologio. Por preventi malpuriĝon de fandaĵo ĉiuj metalaj partoj, kontaktantaj la fandaĵon, estis defenditaj per surŝmiraĵo.

La plumbo estas enkondukata en anticipe fanditan aluminion forme de rabotaĵo je 5 mm dika kun rapideco ĉirkaŭ 0,05 kg/min. Dum gisado miksaĵo daŭras. Oni gisas en krudferan gisujon kun diametro de 40 mm kaj 250 mm longa. Kiel optimuman aŭtoroj de la metodo proponas sekvan reĝimon — temperaturo de miksaĵo kaj gisado — 903°K, rapideco de rotacio de helico — 1200 cik/min, daŭro de miksaĵo 15 minutoj.

Rezulte dum aplikado de supre priskribita metodo en fandblokoj de indikita dimensio oni sukcesas havi egalan dislokiĝon de la plumbo en volumeno de sufiĉe granda gisaĵo. Tamen tiu ĉi metodo havas sufiĉe signifan mankon, kiu multe malpliigas ĝian signifon dum produktado de alojoj, enhavantaj pli ol 15 pez.% de la plumbo. Tiu manko estas en tio, ke ĉe granda enhavo de la plumbo ĝiaj eniĝoj lokiĝas kiel seninterrompa reto laŭ randoj de grajnoj de aluminio, disigante ilin kaj per tio sufiĉe malfirmigante materialon. Atingi dislokiĝon de la plumbo interne de grajnoj de alumina matrico kun enhavo de la plumbo pli ol 15 pez.% enkadre de proponita metodo oni ne sukcesis.

6.8. Metodo de produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj helpe de ultrasono

Laŭ esenco de efiko al fandaĵo metodo de kristaliĝo de distavoliĝantaj alojoj helpe de ultrasono ne distingiĝas de priskribita supre metodo de mekanika miksado.

Fenomeno de efiko de ultrasono povas esti multe pliigita, se kunigi tiun metodon kun aldonado en fandaĵon surface aktivajn elementojn, helpantaj subigi segregacion laŭ denseco.

Interesa modifo de la metodo estas en tio, ke estas prilaborata per ultrasono ne fandaĵo, lokiĝanta en fandujo, sed elfluaĵo de alojo dum procezo de gisado en gisujon. Helpe de la metodo estas produktita alojo de aluminio kun plumbo, tamen enhavo de la plumbo ne superis 10 pez. %.

Entute aplikado de ultrasono, same kiel mekanika miksado de fandaĵo, distingiĝas per sekvaj mankoj — per tendenco de eniĝoj de peza facile fandebla fazo lokiĝi sur randoj de grajnoj, kaj ankaŭ per malfacileco de gvido de disperseco de fazoj kaj iliaj formoj.

6.9. Produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj en mikrogravita stato

Se ni rigardu historion de studado kaj aplikado de materialoj surbaze de sistemoj de nemiksiĝantaj komponantoj, do ni trovos, ke post relative longa periodo, kiam laboro en tiu direkto aperadis nur epizode, komenciĝis periodo de aktiva kresko de intereso al indikitaj sistemoj samtempe kaj en diversaj landoj de la mondo. Tiu ĉi periodo koincidis kun planado de laboroj en USSR kaj USA pri kosma materialologio kaj teknologio en orbitaj kosmaj laboratorioj.

Tio, ke ĝuste sistemoj de NK iĝis unu el ĉefaj objektoj, planitaj por studo en senpezeca stato, ne mirigas, ĉar en tera stato ĝuste gravita forto estas faktoro, kiu kaŭzas segregacion laŭ specifa maso kaj malhelpas rezultiĝon de dezirata strukturo.

En mikrogravita stato oni provis produkti alojojn de plej diversspecaj komponantoj, inter ceteraj tiuj kiel Al-Pb kaj Al-W. Ne haltante ĉe detaloj de procezoj de strukturoformado en senpeza stato ni indiku nur ĉefajn mankojn de la metodo de produktado de materialoj el NK, kiuj faras, laŭ nia opinio, signife malfacila ĝian uzadon en fabrikado de necesa kvanto da similaj materialoj.

- Granda kosto de programo de kosmaj studoj kaj limigiteco de kvanto da fabrikata produktaĵo faras dubinda laŭcelan neceson de produktado en mikrogravita stato de tiuj materialoj, kiuj estas bezonataj en grandaj kvantoj, ekzemple por pezŝargitaj glitlagroj.
- Foresto de malfacilaĵoj, ligitaj kun segregacio laŭ specifa maso ne forigas tutan vicon de aliaj problemoj de produktado de materialoj el NK, aparte tiujn, kiel dispersio de fazoj, egala ilia dislokiĝo laŭ volumeno, regulado de formoj kaj dimensioj, kompensado de efiko de fortoj de surfaca streĉo kaj aliaj.
- Nestabileco de parametroj de mikrogravito, ligita, ekzemple, kun regula ŝanĝo de rapideco de laboratorio, kaŭzigas nekontentigan reprodukteblecon de rezultoj rilate al mikrostrukturo de materialoj.ĵ

6.10. Produktado de alojoj el nemiksiĝantaj komponantoj en kvazaŭsenpezeco, kreita fare de krucigaj elektra kaj magnetaj kampoj

Laŭ si mem faro de tasko pri imitado en surtera stato mikrograviton estas ege interesa, ĉar decido de ĝi tuj forigus problemojn, ligitaj kun tro granda kosto de materialoj, produktitaj en orbitaj laboratorioj.

Teoria argumentado de ebleco krei kondiĉojn de kvazaŭsenpezeco aplike al ensemblo da eroj de dua fazo, dislokitaj en volumeno de kondukanta likvaĵo, bazita sur principoj pri apero de Lrenco-fortoj dum efiko al kurentokondukanta objekto samtempe de elektra kaj magnetaj kampoj. Necesas, tamen, menciigi, ke ekzistas vico de malfacilaĵoj, ligitaj kun preciza priskribo de konduto de ensemblo entute, ĉar tio postulus kontrolon de tiaj faktoroj, kiel rompo de homogeneco de elektra kaj magnetaj kampoj ĉirkaŭ eroj de dua fazo, apero de devigaj spontanaj konvektaj fluoj en fandaĵo de ĉefa fazo, diverseco de formoj kaj dimensioj de eroj de dua fazo, kaŭzanta distingon en rapideco de ilia migrado.

Metodo de kreo de kvazaŭsenpezeco pere de krucigaj elektra kaj magnetaj kampoj estis proponita por produktado de alojoj el NK. Tiu metodo estas bazita sur elekta efiko de krucigaj elektra kaj magnetaj kampoj al diversaj fazoj

de sistemo, dependa de grandeco de ilia elektrokondukeco. Ŝanĝante grandecon kaj signon de kampoj eblas krei kondiĉojn, dum kiuj pli densa fazo povas suprenigi, sed malpli densa fazo sinki al fundo de fandujo kun fandaĵo. Helpe de la metodo de kvazaŭsenpezeco estis produktitaj alojoj surbaze de la aluminio, enhavantaj ĝis 12 pez.% da la plumbo kaj specimenoj de alojoj de la zinko kun la plumbo, enhavantaj ĝis 50 pez.% da la plumbo.

Tamen detala analizo de konataj publikaĵoj, koncernantaj tiun metodon, diras pri tio, ke pere de ĝi dume ne eblas solvi la taskon pri produktado de materialoj el NK kun certa kemia konsisto, reproduktebla strukturo kaj en sufiĉa kvanto.

Koncentrite la malfacilaĵoj de industria aplikado de la metodo de kvazaŭsenpezeco povus esti formulitaj jene.

1. Por realigi en alojo homogenan strukturon kaj malgranddispersajn fazojn estas necesa kreado antaŭ komenco de kristaliĝo homogenan strukturon. Tio povas esti atingita aŭ per mekanika aŭ elektromagneta miksado, aŭ per "fiziko-kemia miksado", t.e. varmigo ĝis unufaza zono, kio estas traktata kiel preferata. Se ne fari specialajn rimedojn pri miksado de fandaĵo, do peza komponanto depende de grado de elektromagneta efiko povas lokiĝi en ajna horizontala nivelo de fandbloko kiel tuta tavolo.
2. Ĉar rapideco de distavoligo kaj segregacio laŭ denseco en sistemoj de nemiksiĝantaj komponantoj, kiel regulo, estas tre granda, do kristaligon necesas fari laŭeble pli rapide, kaj ĉar kondiĉoj de solidiĝo signife dependas de dimensio de volumeno, do procezon de solidiĝo necesas fari en laŭeble malgrandaj ujoj.
3. Grandan influon al strukturo de produktitaj en elektromagnetaj kampoj gisaĵoj faras teknologiaj manieroj kaj konstruaj specifecoj de instalaĵo. Tio estas ligita kun tio, ke al spaca dislokado de disperganta fazo signifan influon okazigas neprecizeco de kompenso de denseco de fazoj, influo de elektra kurento al propra magneta kampo, kaj ankaŭ ekzisto en fandaĵo devigaj kovektaj fluoj. Tiel, pro interinfluo de elektra kurento kaj propra magneta kampo, aperas aldonaj nekompensitaj fortoj laŭ radiuso, kio en certaj kondiĉoj povas konduki al forte nehomogena dislokado de fazoj. Krom tio, dislokiĝo de peza fazo en ĉeelektroda zono ĉiam distingiĝas de tiu en centro. Tial realigo de bezonata dislokado de denseco de elektromagnetaj fortoj en aktiva zono de instalaĵo kun tasko de alkonduko de kurento al fandaĵo postulas specialan esploradon. Ne malpli malfacilaj estas demandoj pri elektado de materialo por elektrodoj kaj fandujo.

6.11. Produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj per metodo de direktita kristaliĝo

En certaj kondiĉoj en kelkaj sistemoj kun distavoliĝo en likva stato eblas subigo de segregacio laŭ specifa denseco kaj kreo de dupleksa strukturo, kiu estas samorientitaj fibroj de unu fazo, egale lokiĝantaj en matrico el la alia. Por realigo de tiuj kondiĉoj necesas: signifa gradiento de temperaturo en zono de kristaliĝo — ĉirkaŭ 9×10^2 K/cm, relative malgranda rapideco de kristaliĝo — ĉirkaŭ 10^{-4} cm·sek⁻¹, kaj ankaŭ efektivigo de sekvaj interrilatoj: $0 < \Theta_{L_2} / S_1 < 180^\circ$ en ĉeesto de likvaĵo L_1 t.e. ke en ĉeesto de fandaĵo angulo de malsekiĝo de solida fazo S_1 , per likvaĵo L_2 estu en indikitaj limoj kondiĉe ke rando de disiĝo estas plata.

Dum vico da jaroj oni sciigis pri kreo de direktitaj komponaĵoj en vico de monotektaj sistemoj: Bi-Se, Sb-S, Al-Bi, Al-Bi-Fe, Al-Pb, Al-In, Cu-Pb, Cd-Ga, Fe-O-S, Al-Bi, Cu-Pb, Cu-Pb-Al, Cu-Pb-Zn, Cu-Pb-Si, Al-Bi, Al-Pb-Bi. Per luma mikroskopo en intervalo de temperaturoj oni esploris defektojn de periodecaj strukturoj, formiĝantaj dum procezo de direktita kresko kun diversaj rapidecoj en travideblaj monotektaj sistemoj. Stabiliĝinta kresko modeliĝis en miksaĵo de sukcionitrilo (CN₂CN) kaj 7,5 % da glicerino, nestabiliĝinta — en miksaĵo (CN₂CN) kun 20,2 % da etanolo, monotekta solidiĝo kun formado de facetita fazo en miksaĵo de P-kreozolo kun 13% da la akvo. Estis trovite, ke aldono al sistemo Al-Bi de 0,2 ĝis 0,6 pez.% da la fero kaŭzas ĉelan kristaliĝon de la tuta sistemo. La bismo kristaliĝas en nodaj punktoj de ĉeloj, aŭ kiel egale dislokitaj vicoj de sferoj ĉe 0,2% Fe, aŭ kiel senorda reto ĉe 0,65Fe. En la sama sistemo Al-Bi sen aldonoj de la fero oni observis formadon de du tipoj de ordigitaj strukturoj: facile fandebla komponanto povas kristaliĝi kiel kolonetoj, kiam rilato de temperatura gradiento c al rapideco de kresko R estas granda, kaj kiel vico de sferoj, kiam tiu rilato estas malgranda. Menciitan procezon oni klarigis en kadroj de imagoj pri rompoj de interfaza fronto kaj mekanismo de kapilara nestabileco inter du likvaj fazoj. Estis trovita korelado inter konduto de monotekta sistemo dum procezo de kristaliĝo kaj alteco de kupolo de distavoliĝo. Aldonaĵoj de tria elemento, ŝanĝanta tiun altecon, povas ankaŭ signife ŝanĝi kaj mikrostrukturon de alojo (ekz., aldonaĵoj de la stano al sistemo Al-In kaj la aluminio al sistemo kupro-plumbo). Mikrostrukturoj de direkte kristaliĝintaj monotektaj alojoj eblas kondiĉe disdividi je du grupoj — alojoj kun komponita strukturo de vicigitaj fibroj de sama dikeco kun egalaj interspacoj inter ili kaj alojoj kun pli krudaj kaj malpli egala dislokado de fazoj. Tiu disdividiĝo koincidas kun tipo de faza diagramo kaj grandeco de surfaca energio de limo de disiĝo de solida kaj likva fazoj.

Transiro de unua mekanismo de kristaliĝo al la dua efektiviĝas ĉe $T_M/T_K = 0,9$. Gvidado de mekanismo de monotekta kristaliĝo Al-Bi alojo povas esti realigita per aldono de la fero. Nestabila surfaco de disdivida limo estis videbla jam ĉe 0,025% de la fero. Dum tio morfologio de monotekta komponaĵo dependas de rilato de temperatura gradiento G al rapideco de kresko R . Dum $G/R < 10^9 \text{Kc/m}^2$ formiĝas kaose dislokitaj gutoj de monotekta likvaĵo L_2 , sed ĉe $G/R > 10^9 \text{Kc/m}^2$ — regula fibra strukturo.

Dum plua pligrandiĝo de G/R okazas formado de monofaza strukturo sen fazo L_2 . Alojado per la fero kondukas al pligrandiĝo de kriza nombro de G/R . Aspekto de mikrostrukturo oni klarigas per interago inter L_2 kaj moviĝanta monotekta fronto.

Necesas rimarki, ke metodo de direktita kristaliĝo estas sola, per kiu eblas produkti fibrajn komponitajn materialojn de tiu klaso kaj tial ĝi povas esti ege utila en fabrikado de elektroteknikaj kaj magnetaj materialoj.

Tamen por antifrikciaj materialoj forta anizotropio, evidente, multokaze estas nedezirinda, krome malfacilaĵoj de realigo de bezonata gradiento de temperaturoj estas sufiĉe grandaj, kio siavice signife limigas kvanton de produktitaj fandblokoj.

6.12. Plasma surpulvorigo de alojoj el nemiksiĝantaj komponantoj

Metodo de plasma surpulvorigo el du fontoj estis aplikita por kreo de ŝelaj specimenoj de alojo Al-Pb. Per tiu metodo oni sukcesis produkti alojon kun enhavo de la plumbo ĝis 1 pez.% kio pli ol duoble malgrandigis koeficienton de froto de materialo. La metodo dume ne trovis aplikadon pro malfacileco de instalaĵoj.

6.13. Kombinitaj metodoj de produktado de materialoj el nemiksiĝantaj komponantoj

Kiel kombinitaj ni nomis tiujn metodoj de produktado de materialoj el NK, kiuj enhavas elementojn de kelkaj rimedoj, priskribitaj supre.

Tiel por produktado de malfacile alojitaj alojoj de NK surbaze de la aluminio estis proponita metodo, enhavanta tiajn elementojn de pulvora metalurgio kiel preparo de miksaĵo de pulvoroj de NK, ilia briketado kaj brulkunigo, distinganta per tio, ke kun celo de malpliigo de resta porozeco, kaj ankaŭ malutila influo de oksidaj ŝeloj surface de eroj, briketoj antaŭ brulkunigo premis kun samtempa efiko de akso forto kaj rotacia forto, sed procezo de brulkunigo okazigas en elektra kampo. En tiu metodo kunigo de akso forto kun rotacia forto ebligas ĉie kie eroj ekzemple de la aluminio kontaktas la plumbon aŭ unu la alian forigi oksidan ŝelon, kiu malhelpas brulkunigon ĉe relative malaltaj temperaturoj kaj ankoraŭ dum procezo de precipitado kun tordado produkti komponaĵon, en kiu enhavaĵoj de facile fandebla komponanto estas bone izolitaj kaj ne povas elflui dum postseka inkandesko. Brulkunigo en elektra kampo kondukas al tio, ke per granda elektra rezisto en loko de kontakto de diversaj fazoj efektiviĝas intensa loka varmiĝo, kondukanta eĉ al atingo de temperaturo de monotekta transformo, kvankam en tuta volumeno temperaturo povas esti signife malpli alta. Loka monotekta transformo kondukas al efektiva korektado de restintaj post precipitado poroj, eĉ se tiuj poroj estas fermitaj, kio rezulte signife helpas al altiĝo de plastikeco de materialo.

Per tiu metodo estis produktitaj ekzemple fakte senporaj alojoj Al-Pb-Cu kaj Al-Pb-Cu-Al₂O₃.

Ankoraŭ unu metodo de sama speco kunigas ordinaran kristaliĝon de alojo de NK kun posta termomekanika prilaboro, kiu enhavas varmigon ĝis temperaturoj en intervalo inter eŭtekta kaj monotekta transformado kaj aldono de ĉiudirektaj kunpremaj fortoj. Fakte temas pri metodo de transformado de gisita materialo kun relative kruda mikrostrukturo, aparte tiaj, kia rezultiĝas ĉe alojo kupro-plumbo post gisado en gisformujon. Celo de tiu transformado estas dispecigo de enhavaĵoj de peza facile fandebla komponanto kaj plibonigo de homogeneco de ĝia dislokado. Por realigo de la fenomeno, celata de la metodo, post tenado de materialo en intervalo de temperaturoj T_E - T_M sub efiko de kunpremantaj fortoj oni ĝin malvarmigis, ne forigante la fortojn ĝis ĉambra temperaturo. En rezulto anstataŭ grandaj malegalaj laŭ formo kaj dimensioj enhavaĵoj de la plumbo en kupro-plumba alojo aperas aro de malgrandaj dispersaj plumbaj enhavaĵoj, egale dislokitaj laŭ volumeno de kupra matrico.

6.14. Pritakso de aplikado de metodoj de produktado de alojaj el nemiksiĝantaj komponantoj

Farante komunan resumon pri farita antaŭe priskribo de specialaj metodoj de produktado de alojaj el NK eblas veni al konkludo pri tio, ke nek unu el listigitaj supre metodoj, krom metodo de akcelita malvarmigo de supervarmigita fandaĵo kaj postsekva inkadesko en intervalo solida-likvafaza ekvilibro, donas reprodukteblaj rilate al strukturo de materialo rezultoj.

Nomita metodo (plue por mallongeco metodo de hardado kaj maljunigo) — sola el ĉiuj ebligas laŭcele reguligi dimension de eroj, kaj homogeneco de ilia dislokiĝo estas bone reproduktebla parametro. Kiel estas videble el supra priskribo, la metodo de hardado kaj maljunigo taŭgas por produktado de alojaj surbaze de sistemoj E3-E4, kvankam ĝiaj avantaĝoj rilate al konkretaj sistemoj bezonas aldonan studadon.

De alia flanko, estas facile rimarki, ke ĉiuj ceteraj metodoj, krom la pulvora, ankaŭ devas finiĝi per akcelita malvarmigo de fandaĵo, en kiu per tiu aŭ alia maniero oni sukcesis subigi segregacion. El la dirita sekvas aparta rolo de rapideco de malvarmiĝo pri formado de makro- kaj rnikrostrukturo de alojaj de sistemoj E1-E2, en kiuj eblas atingi zonon de unufaza likva solvaĵo.

Fonto: Strukturo kaj kvalitoj de alojaj surbaze de sistemoj de nemiksiĝantaj komponantoj de A. D. Ŝljapin, Moskvo, 2000

STEB: <http://www.eventoj.hu>