

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Գ.Ա. ՎԱՍԻԼՅԱՆ, Վ.Ա. ՄԻՄՈՆՅԱՆ

**ΠC-H18K10M5Re ՄԱԿՆԻՇԻ ՄԱՐՏԵՆՄԻՏԱՑԻՆ ԾԵՐԱՑՈՂ ՊՈՂՊԱՏԱՓՈՇՈՒՑ
ՊԱՏՐԱՍՏՎԱԾ ԾԱԿՈՏԿԵՆ ՄԱՍԼՎԱԾՔՆԵՐԻ ՏԱՔ ԱՐՏԱՄՂՄԱՆ ԵՎ
ՋԵՐՄԱՅԻՆ ՄՇԱԿՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

Բարձր և ֆունկցիոնալ հատկություններով օժտված փոշեկոմպոզիտային նյութերի ստեղծումը, ինչպիսիք են բացասական ջերմաստիճաններում փխրուն քայքայման նկատմամբ կայուն մարտենսիտային ծերացող փոշեպողպատները, հանդիսանում է ժամանակակից նյութագիտության առաջնային ուղղություններից մեկը: Այս պողպատները լավ մշակվում են կտրմամբ, հեշտ դեֆորմացվում են և ենթարկվում ջերմային մշակման:

Հետազոտվել են բարդ օբյեկտների սինթեզման եղանակով ստացված ΠC-H18K10M5Re մակնիշի մարտենսիտային ծերացող պողպատափոշուց մամլված ծակոտկեն մամլվածքների եռակալման, տաք արտամղման, ջերմային մշակման ու կառուցվածքագոյացման գործընթացները: Հետազոտությունների արդյունքում մշակվել է մարտենսիտային ծերացող պողպատափոշուց արտադրատեսակների ստացման տեխնոլոգիա, որը ներառում է պողպատափոշուց ծակոտկեն մամլվածքների մամլման, մամլվածքների եռակալման, տաք արտամղման և ջերմային մշակման գործընթացները: Ցույց է տրված, որ ստացված փոշեպողպատներն իրենց ֆիզիկա-մեխանիկական և տեխնոլոգիական հատկություններով չեն զիջում ստանդարտ պեղպատներին, իսկ որոշ դեպքերում գերազանցում են դրանց:

Առանցքային բառեր. պողպատափոշի, մամլում, եռակալում, տաք արտամղում, փոշեպողպատ, թրծում, մխում, ծերացում, մանրահատիկ կառուցվածք, ինտերմետաղական ֆազ:

Ներածություն: Հատուկ տեխնիկայում, հատկապես ռազմական արդյունաբերության ոլորտում, պահանջվում է ֆունկցիոնալ հատկություններով, ինչպիսիք են բարձր ամրությամբ, կարծրությամբ, հարվածային մածուցիկությամբ, ջերմակայունությամբ, սառնաբեկունությամբ և այլն, նյութերի ստեղծում, որոնք ունակ կլինեն աշխատելու նշանափոխ բեռնվածքների տակ բարձր և ցածր ջերմաստիճաններում՝ հատկապես բացասական: Այդպիսի հեռանկարային նյութերից են մարտենսիտային ծերացող պողպատները, որոնք օգտագործվում են տրանսպորտային տեխնիկայում, ինքնաթիռաշինությունում, նավաշինությունում, սարքաշինությունում, ատոմային էներգետիկայում, ռազմական արդյունաբերությունում և այլուր [1-3]: Ի տարբերություն կարբիդային ֆազերով ամրացվող պողպատների, այդ թվում՝ լեգիրված, մարտենսիտային ծերացող պողպատներն ավելի կայուն են

փխրուն քայքայման նկատմամբ, հատկապես բացասական ջերմաստիճաններում: Այս պողպատները լավ մշակվում են կտրմամբ, հեշտ դեֆորմացվում են և ենթարկվում ջերմային մշակման [2-7]:

Մարտենսիտային ծերացող պողպատները քիմիական բաղադրությամբ պետք է լինեն բարձր մաքրությամբ և չպարունակեն այնպիսի խառնուրդներ, ինչպիսիք են ածխածինը, ջրածինը, թթվածինը, ազոտը, ծծումբը և ֆոսֆորը: Ուստի առավել նպատակահարմար է նշված պողպատները ստանալ փոշեմետալուրգիական եղանակով՝ բաղադրիչների բարձր մաքրությամբ օքսիդներից բարդ օքսիդների սինթեզման [8, 9], ամոնիումի պերոքսիդի ավելացմամբ բովախառնուրդի պատրաստման, վերականգնման, ստացված պողպատափոշու մամլման, եռակալման, տաք արտամղման և ջերմային մշակման միջոցով [3]: Նշված տեխնոլոգիայով ստացված փոշեպողպատն առանձնանում է մանրահատիկ կառուցվածքով, բարձր ֆիզիկա-մեխանիկական, տեխնոլոգիական և շահագործական հատկություններով: Մակայն լեգիրված մետաղափոշիների արտադրության սահմանափակությունն առայժմ հնարավորություն չի տալիս այս փոշեպողպատների արտադրությունը դարձնել զանգվածային, ինչպես նաև մինչև այժմ ուսումնասիրված չեն այս պողպատափոշիներից մամլված ծակոտկեն մամլվածքների եռակալման, տաք արտամղման և ջերմային մշակման գործընթացները, որոնց պատճառով դրանց արտադրությունը լայն տարածոսմ չի ստացել:

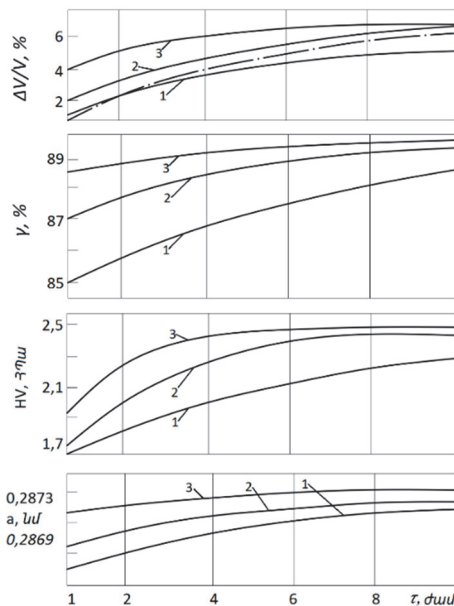
Ելնելով վերոհիշյալից՝ աշխատանքի նպատակն է հետազոտել ПС-Н18К10М5Re մակնիշի մարտենսիտային ծերացող պողպատափոշուց մամլված ծակոտկեն մամլվածքների եռակալման, տաք արտամղման, ջերմային մշակման ու կառուցվածքագոյացման գործընթացները և մշակել համապատասխան տեխնոլոգիա:

Խտրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Մշակված ПС-Н18К10М5Re մակնիշի մարտենսիտային ծերացող պողպատափոշուց արտադրատեսակների պատրաստման գործընթացներից են մետաղափոշիների մամլումը և եռակալումը: Ինչպես ցույց է տրված աշխատանք [10]-ում, ստացված պողպատափոշու մամլունակությունը բավականին բարձր է և որոշվել է ըստ գործող ստանդարտի (ГОСТ25280-82), համաձայն որի՝ 400...500 ՄՊա ճնշման պայմաններում ծակոտկենությունը իջնում է մինչև 18...20%:

Փոշեկոմպոզիտային նյութերի եռակալման բնութագրերից են ամրությունը, խտությունը, էլեկտրադիմադրությունը, նստվածքը և այլն: Մարտենսիտային ծերացող փոշեպողպատների եռակալման գործընթացին է նվիրված [11] աշխատանքը, որում ուսումնասիրվել է կոմպոնենտների մեխանիկական խառնմամբ ստացված մամլվածքների եռակալման գործընթացը, համաձայն որի՝ 1100°C ջերմաստիճանում ($\tau_{\text{en}} = 1...10$ ժ) եռակալված փոշեպողպատն ունի անհամասեռ կառուցվածք,

որի մեջ առկա են Ni-ի, Co-ի և Mo-ի չլուծված հատիկներ: Եռակալման ջերմաստիճանի բարձրացումը՝ մինչև 1200°C , չի վերացնում կառուցվածքային անհամասեռությունը, չնայած միկրոկարծրությունը, խտությունը և նստվածքը մեծանում են: Ելնելով փորձի արդյունքներից, աշխատանք [11]-ում ընտրվել են եռակալման օպտիմալ ռեժիմներ՝ $T_{\text{եռ}}=1250\ldots1300^{\circ}\text{C}$, $\tau=5\ldots6$ ժ: Պողպատի կառուցվածքը ներկայացնում է համասեռ պինդ լուծույթ (ածխածին չպարունակող մարտենսիտ), որի ծակոտկենությունը $\sim 10\%$ է: Նշված բարձր ջերմաստիճանները ($1250\ldots1300^{\circ}\text{C}$), որոնք մոտ են հալման ջերմաստիճանին ($1350\ldots1450^{\circ}\text{C}$), և պահման տևողությունը ցանկալի չեն, չնայած ապահովում են կառուցվածքային համասեռությունը: Նշվածը կրկին ապացուցում է այս պողպատների ստացման աննպատակահարմարությունը կոմպոնենտների մեխանիկական խառնման միջոցով, որի դեպքում ծակոտկենությունը կազմում է $9\ldots11\%$:

Հետազոտության արդյունքները: Նկ. 1-ում բերված է ПС-Н18К10М5Re մակնիշի պողպատափոշուց 20% ծակոտկենությամբ մամլված մամլվածքի $1000\ldots1250^{\circ}\text{C}$ ջերմաստիճանում եռակալման ռեժիմների ազդեցությունը փոշեպողպատի հատկությունների վրա:



Նկ. 1. Եռակալման ջերմաստիճանի և պահման տևողության ազդեցությունը
 ПС-Н18К10М5Re փոշեպողպատի հատկությունների վրա.
 1 – 1100°C , 2 – 1175°C , 3 – 1250°C

Ելնելով ծավալային նստվածքի մեծությունից ($\sim 4\%$ ծավ. $\tau = 4$ ժ դեպքում), ПС-Н18К10М5Re փոշեպողպատի եռակալման գործընթացը բավարար է: Հաշվի

առնելով, որ ПС-Н18К10М5Re մակնիշի պողպատափոշին, որը ստացվել է առաջարկված տեխնոլոգիայով, ունի համասեռ կառուցվածք, հետևապես՝ եռակալման համար չեն պահանջվում երկար ժամանակ և բարձր ջերմաստիճաններ ($T_{\text{եր}}$): Այսպիսի ռեժիմներ չեն պահանջվում նաև նստվածքի ($\Delta V/V$) մեծացման համար, որը կհանգեցնի խտության մեծացման: Նմանատիպ համաձուլվածքների համար ցանկալի է խտացման նպատակով տաք մշակման եղանակների կիրառումը, ինչպիսին է, օրինակ, տաք արտամղումը (էքստրուզիան): Ուսումնասիրվել է տաք արտամղման գործընթացը, որի դեպքում մամլվածքների նախնական ծակոտկենությունը (15...35%) գործնականում չի ազդել տաք արտամղված նմուշների վերջնական խտության վրա: Այդ իսկ պատճառով առաջարկվող տեխնոլոգիայի դեպքում չի պահանջվում բարձր խտությամբ մամլվածքների ստացում, որի համար անհրաժեշտ են բարձր ճնշումներ:

Նկ. 2-ում ցուց է տրված Mo-ի բաշխվածության սկանագիրը ПС-Н18К10М5Re փոշեպողպատում, որը ստացվել է $T_{\text{եր}} = 1100^\circ\text{C}$ ջերմաստիճանում $\tau_{\text{եր}} = 2\text{ժ}$ տևողությամբ եռակալումով: Ինչպես երևում է նկարից, Mo-ի բաշխվածությունը հավասարաչափ է: Այստեղից կարելի է անել հետևություն, որ եռակալման նշված ռեժիմների դեպքում առաջարկվող համաձուլվածքի կառուցվածքի ձևավորումը հիմնականում ավարտվում է, և այն կարելի է ենթարկել տաք արտամղման: Որպես եռակալման օպտիմալ ռեժիմներ ընտրվել են՝ $T_{\text{եր}} = 1100...1150^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{եր}} = 1,5...2,0\text{ ժամ}$:



Նկ. 2. ПС-Н18К10М5Re մակնիշի փոշեպողպատում Mo-ի բաշխվածության սկանագիրը.
 $T_{\text{եր}} = 1100^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{եր}} = 2\text{ ժ}$

Հետագա հետազոտություններն ուղղված են տաք արտամղման ժամանակ ПС-Н18К10М5Re մակնիշի եռակալված փոշեպողպատի կառուցվածքազոյացման օրինաչափությունների բացահայտմանը: Հիմնական գործոնները, որոնք ազդում են արտամղման գործընթացի վրա, հետևյալն են՝ արտամղման ջերմաստիճանը

($T_{արտ}$, $^{\circ}C$), տաքացման տևողությունը ($\tau_{արտ}$, $րոպե$), արտամղման գործակիցը (λ), սկզբնական ծակոտկենությունը ($\theta_{սկզ}$) և մամլամայրի կոնական անկյունը ($\alpha_{ս}$, $սստ$):

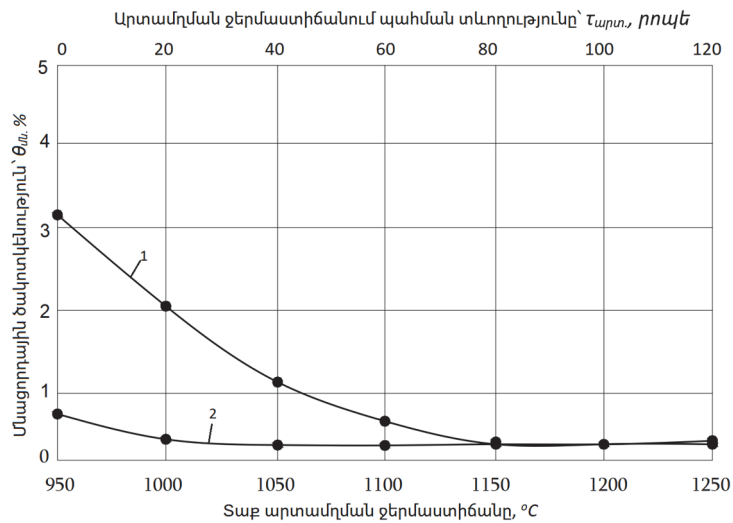
Նշված պարամետրերի օպտիմալացումն իրականացվել է փորձի պլանավորման մեթոդներով [12, 13]: Որպես ելքային պարամետր վերցրվել է տաք արտամղված փոշեպողպատի մնացորդային ծակոտկենությունը ($\theta_{մնաց}$):

ПС-Н18К10М5Re մակնիշի եռակավված փոշեպողպատի տաք արտամղման օպտիմալ ռեժիմներն ընտրելու նպատակով կատարվել է փորձանմուշների տաք արտամղում $950^{\circ}C$ -ից մինչև $1250^{\circ}C$ ջերմաստիճանային տիրույթում՝ $50^{\circ}C$ քայլով: Որպես փորձանմուշ վերցվել են $\Phi 30$ մմ տրամագծով և $h = 50$ մմ բարձրությամբ ծակոտկեն գլանական նմուշներ, որոնց նախնական ծակոտկենությունը ընտրվել է $\theta_{սկզ} = 25\%$: Տաքացման ջերմաստիճանում պահման տևողությունը վերցվել է $0,5$ ժ, արտամղման գործակիցը՝ $\lambda = 5$, մայրակի կոնական անկյան թեքությունը՝ $\alpha_{ս} = 55^{\circ}$: Յուրաքանչյուր դեպքում փորձարկվել է երեք փորձանմուշ: Փորձերի արդյունքները՝ միջին թվաբանականով հաշված, բերված են նկ. 3-ում (1-ին կոր): Ինչպես երևում է նկարից, տաք արտամղման ջերմաստիճանի բարձրացմամբ տեղի է ունենում մնացորդային ծակոտկենության փոքրացում, որը $1150^{\circ}C$ -ում չի գերազանցում $0,3\%$ -ը: Այնուհետև ջերմաստիճանի հետագա բարձրացումը գործնականում մնացորդային ծակոտկենության վրա ազդեցություն չի թողնում. այն մնում է հաստատուն:

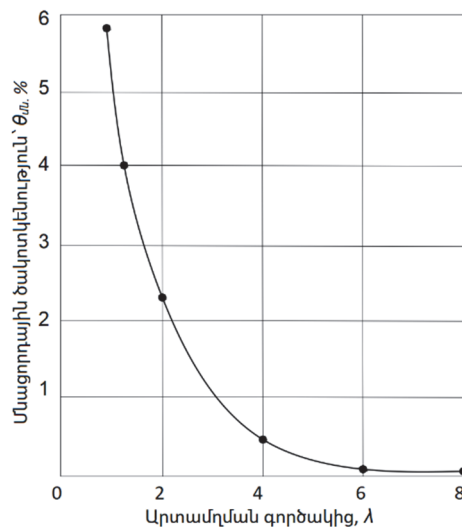
Փոքր է տաք արտամղման ջերմաստիճանում պահման տևողության ազդեցությունը մնացորդային ծակոտկենության վրա (նկ. 3, 2-րդ կոր): Ինչպես ցույց են տալիս փորձերը, 30 րոպե պահման տևողության դեպքում մնացորդային ծակոտկենությունը չի գերազանցում $0,3\%$:

Այլ է պատկերը տաք արտամղման գործակիցի մնացորդային ծակոտկենության փոփոխության կախվածության դեպքում (նկ. 4): Ինչպես երևում է փորձերի արդյունքներից, տաք արտամղման գործակիցի մեծացմամբ տեղի է ունենում մնացորդային ծակոտկենության կտրուկ անկում, և $T_{արտ}=1150^{\circ}C$ ջերմաստիճանում, երբ $\lambda = 5$, իսկ $\alpha_{ս} = 55^{\circ}$, մնացորդային ծակոտկենությունը ստացվում է $\theta_{ս} \leq 0,3\%$ (նկ. 4): Ելնելով կատարված փորձերի արդյունքներից՝ որպես տաք արտամղման օպտիմալ գործակից վերցվել է $\lambda = 5$:

Հետագա հետազոտությունների ընթացքում ուսումնասիրվել են մնացորդային ծակոտկենության կախվածությունը մամլվածքի սկզբնական ծակոտկենությունից՝ $\theta_{սկզ}$ (նկ. 5, 1-ին կոր) և մամլամայրի կոնական անկյան մեծությունից՝ $\alpha_{ս}$ (նկ. 5, 2-րդ կոր), անփոփոխ թողնելով տաք արտամղման ջերմաստիճանը՝ $T_{արտ}=1150^{\circ}C$, արտամղման ջերմաստիճանում պահման տևողությունը՝ $\tau_{արտ}=30$ րոպե և արտամղման գործակիցը՝ $\lambda = 5$, այսինքն տաք արտամղումը կատարվել է ընտրված օպտիմալ ռեժիմներով:



Նկ. 3. Տաք արտամղված նախապատրաստվածքների մնացորդային ծակոտկենության կախվածությունը արտամղման ջերմաստիճանից (1 կոր). $\theta_{սկզ} = 25\%$, $\tau_{արտ} = 30$ րոպե, $\lambda = 5$, $\alpha_{ս} = 55^\circ$ և արտամղման ջերմաստիճանում պահման տևողությունից (2 կոր).
 $T_{արտ} = 1150^\circ\text{C}$, $\theta_{սկզ} = 25\%$, $\lambda = 5$, $\alpha = 55^\circ$

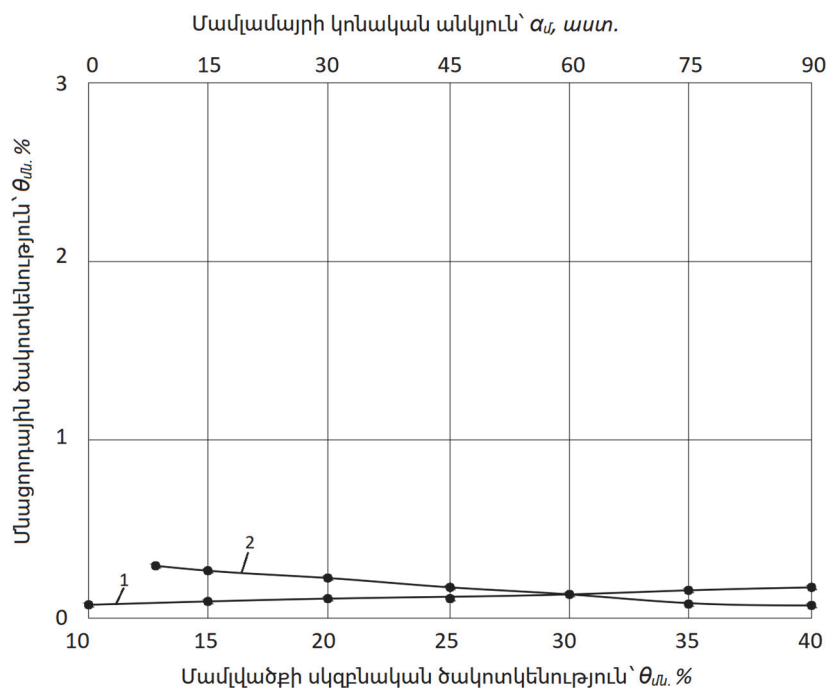


Նկ. 4. Տաք արտամղված նախապատրաստվածքների մնացորդային ծակոտկենության կախվածությունը արտամղման գործակիցից. $T_{արտ} = 1150^\circ\text{C}$, $\theta_{սկզ} = 25\%$, $\tau_{արտ} = 30$ րոպե, $\alpha = 55^\circ$

Հետազոտությունների արդյունքում պարզվել է, որ տաք արտամղման ժամանակ մամլվածքի սկզբնական ծակոտկենությունը գործնականում չի ազդում մնացորդային ծակոտկենության վրա, ինչը բացատրվում է տաք արտամղման

առանձնահատկություններով, այսինքն ճնշման տակ ծակոտկեն մարմինը կոնտեյներում խտանում է մինչև անծակոտկեն վիճակ, հետո սկսում է հոսել, ինչպես հոծ մարմինները [14]:

Ինչ վերաբերում է կոնական անկյան մեծությանը (նկ. 5, կոր 2), ապա նրա ազդեցությունը մնացորդային ծակոտկենության վրա նույնպես փոքր է: Խնդիրն այն է, որ արտամղման ժամանակ տեղի է ունենում կոնական անկյան կարգավորում արտամղվող մետաղի հաշվին. արդյունքում տեղի են ունենում անկյան փոփոխություն և արտամղման ճնշման փոքրացում [14]:



Նկ. 5. Տաք արտամղված նախապատրաստվածքների մնացորդային ծակոտկենության կախվածությունը մամլվածքի սկզբնական ծակոտկենությունից (1 կոր). $T_{\text{արտ}} = 1150^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{արտ}} = 30$ րոպե, $\lambda = 5$, $\alpha = 55^{\circ}$, և մամլամայրի կոնական անկյան մեծությունից (2 կոր). $T_{\text{արտ}} = 1150^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{արտ}} = 30$ րոպե, $\theta_{\text{սկ}} = 25\%$, $\lambda = 5$, $\alpha = 55^{\circ}$

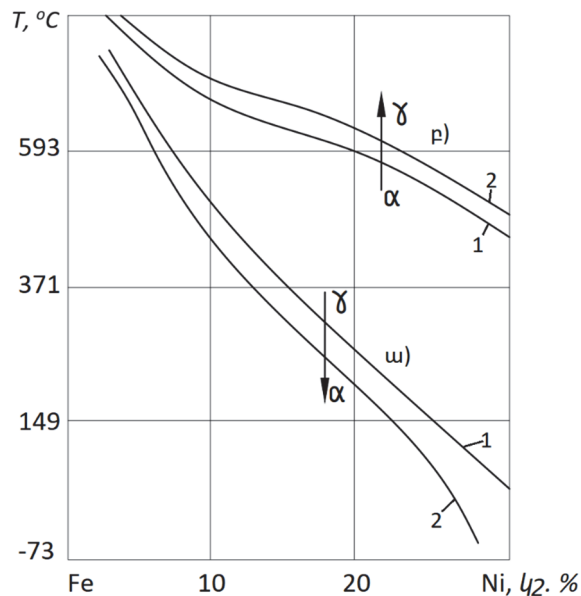
Ինչպես և սպասվում էր, ամենամեծ ազդեցությունը մնացորդային ծակոտկենության վրա թողնում են արտամղման ջերմաստիճանը ($T_{\text{արտ}}$) և արտամղման գործակիցը (λ), այնուհետև հաջորդում են արտամղման ջերմաստիճանում պահման տևողությունը ($\tau_{\text{արտ}}$), նախապատրաստվածքի սկզբնական ծակոտկենությունը ($\theta_{\text{սկ}}$) և մամլամայրի կոնական անկյունը ($\alpha_{\text{մ}}$): Փորձարկման տվյալների վերլուծության հիման վրա ընտվրել են տաք արտամղման հետևյալ պարամետրերը՝ $5 \leq \lambda \leq 6$, $T_{\text{արտ}} = 1150 \pm 25^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{արտ}} = 0,5 \dots 1,0$ ժամ, $\theta_{\text{սկ}} = 20 \dots 25\%$, $\alpha_{\text{մ}} = 90 \dots 120^{\circ}$, որոնք

օպտիմալ են և ապահովում են անծակոտկեն կառուցվածքով փոշեպողպատների ստացումը ու բարձր մեխանիկական հատկությունները:

Տաք արտամղմամբ ստացված նախապատրաստվածքները $820 \pm 20^\circ\text{C}$ ջերմաստիճանում մեկ ժամ պահման տևողությամբ թրծումից հետո ենթարկվել են մեխանիկական մշակման, այնուհետև՝ միսման և ծերացման:

Մարտենսիտային ծերացող պողպատների ջերմային մշակումը ներառում է պողպատի տաքացում $\alpha \rightarrow \gamma$ փոխակերպության ջերմաստիճանից բարձր, պահում այդ ջերմաստիճանում՝ մինչև աուստենիտացման գործընթացի ավարտը, միսում օդում կամ ջրում և ծերացում:

Համեմատած ածխածնային պողպատների հետ՝ միսման համար սառեցման արագությունն այս դեպքում կարևոր դեր չի խաղում: Ինչպես նշվել է, անկախ նրանից, թե ինչ արագությամբ է իրականացվում սառեցումը, վերջնական ֆազը մարտենսիտն է: Աուստենիտային կառուցվածքի ստացման ժամանակ տեղի է ունենում հատիկների աճ: Այդ պատճառով արագ սառեցման ժամանակ (ջրում) վերաբյուրեղացման արդյունքում ($\gamma \rightarrow \alpha$) ֆազային մանրահատիկությունը վերականգնվում է: Մյուս կողմից՝ ջերմամշակման գործընթացը բարդանում է, որովհետև Ni-ը կայունացնում է γ ֆազը (Ա), որի հետևանքով $\text{A} \rightarrow \text{U}$ տիրույթում առաջանում է ջերմաստիճանային հիստերեզիս (նկ. 6):



Նկ. 6. Ածխածին չպարունակող երկաթնիկելային համաձուլվածքների փոխակերպության դիագրամը. ա - սառեցում, բ - տաքացում, 1 - փոխակերպությունը կատարվել է 10%-ում, 2 - փոխակերպությունը կատարվել է 90%-ում

Ինչպես երևում է նկարից, Fe-Ni համաձուլվածքում Ni-ի պարունակության մեծացմամբ $U \rightarrow \sigma$ փոխակերպությունը տեղափոխվում է ցածր ջերմաստիճանային տիրույթ: Այդ իսկ պատճառով Ni-ը վերցվում է այնպիսի քանակությամբ, որ ապահովվի առավելագույն հիստերեզիսի ստացումը ($\geq 15\%$ Ni): Վերջինս ապահովում է մինչև բարձր ջերմաստիճանային տաքացման ժամանակ մարտենսիտային կառուցվածքի պահպանումը: Սա թույլ է տալիս խուսափել $\sigma \rightarrow U$ հակադարձ փոխակերպությունից, որի դեպքում կբացավի ծերացման ջերմաստիճանում դիսպերս կարծրացման գործընթացը: Սակայն համաձուլվածքում Ni-ի կոնցենտրացիայի ավելացումը հանգեցնում է մնացորդային աուստենիտի քանակության մեծացման, որի հետևանքով մարտենսիտային փոխակերպությունը կարող է իրականացվել միայն բացասական ջերմաստիճաններում՝ մինչև -73°C : Այդ իսկ պատճառով մարտենսիտային ծերացող պողպատներում Ni-ի օպտիմալ պարունակությունը համարվում է 16...19%, որի ժամանակ մնացորդային աուստենիտի քանակությունը չի գերազանցում 7...9%: Մնացորդային աուստենիտի նվազեցումը՝ մինչև փոքրագույն քանակություն, կախված է նաև լեգիրող տարրերի կազմից (Co, Mo, Re և այլն):

Մարտենսիտային ծերացող պողպատների, այդ թվում՝ փոշեպողպատների ամրացումը կախված չէ միմյան գործընթացից, ուստի այնպիսի հասկացություններ, ինչպիսիք են «մխելիությունը» և «լիամխելությունը», ինչպես նաև «ածխածնազրկումը», այստեղ կիրառելի չեն և հատուկ են ածխածնային պողպատներին: Վերանում է նաև արտադրատեսակների չափաբերման հարցը, ինչպես նաև դրանց մեխանիկական մշակումը, քանի որ ծերացման չենթարկված մարտենսիտը պլաստիկ է, այսինքն «փափուկ է» և հեշտ ենթարկվում է մեխանիկական մշակման:

Ինչպես արդեն նշվել է, միաված «փափուկ» մարտենսիտի կարծրությունը չի գերազանցում HRC35 միավորը: Մարտենսիտային ծերացող պողպատների, այդ թվում՝ փոշեպողպատների ամրացումն իրականանում է ծերացման ժամանակ գերհագեցած α պինդ լուծույթի (σ) դիսպերս տրոհման արդյունքում՝ Ni_3Mo , Ni_3Re , NiRe , FeRe , Fe_2Mo և այլն, ինտերմետաղական ֆազերի անջատումով:

Մխումից հետո մարտենսիտի ծերացումն իրականացվել է $350...650^\circ\text{C}$ ջերմաստիճանային տիրույթում, որի արդյունքում փոշեպողպատի ամրությունը հասել է 3500 MPa և ավելի, իսկ կարծրությունը՝ մինչև 60...63HRC:

Մարտենսիտային ծերացող պողպատներում, այդ թվում՝ փոշեպողպատներում, Ni-ը իրականացնում է մարտենսիտային ($\gamma \rightarrow \alpha$) փոխակերպության գործընթացը, որը կատարվում է սահքի, այսինքն անդիֆուզիոն մեխանիզմով: Այն նպաստում է լեգիրող տարրերի լուծմանը α -Fe-ի մեջ և, հետևաբար, ամրացնում է պողպատը՝ ի հաշիվ Ni_3Mo , Ni_3Re , NiRe , FeRe , Fe_2Mo և այլ ինտերմետաղական

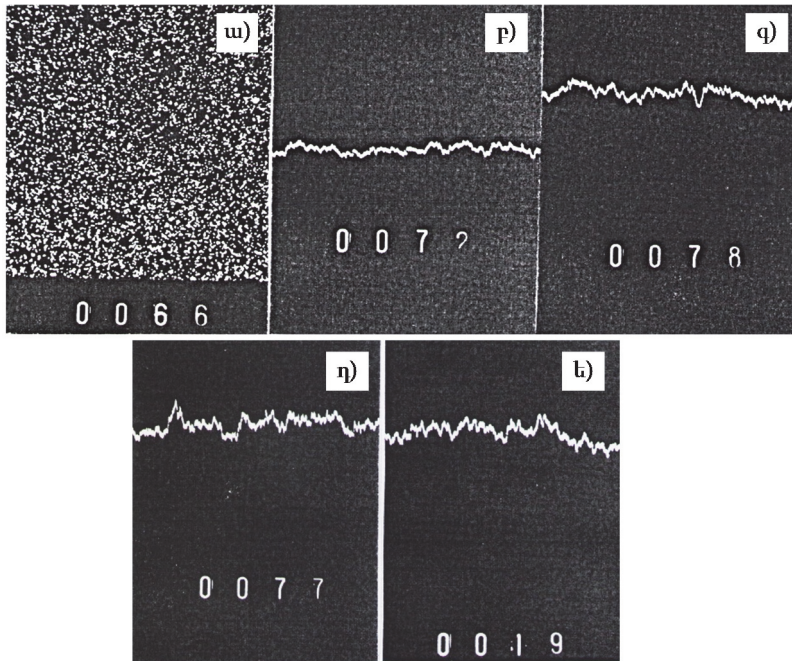
ֆազերի առաջացման: Co-ը, ինչպես և Ni-ը, նույնպես օժանդակում է պողպատի ամրացմանը, սահմանափակելով α -Fe-ում լեգիրող տարրերի լուծելիությունը, դրանով իսկ մեծացնելով երկրորդ ֆազի ծավալային մասը ձերացման ժամանակ: Ուստի Fe-Ni-Co-Mo-Re համակարգում «ինտերմետաղական» տարրեր են համարվում Mo-ը և Re-ը, որոնց միջոցով տեղի է ունենում մարտենսիտային ձերացող փոշեպողպատների դիսպերս ամրացումը: Մարտենսիտային ձերացող պողպատներում լավագույն ամրացնող տարրեր են նաև Ti-ը, Be-ը և Al-ը: Սակայն այս տարրերը, բարձրացնելով σ_{δ} և HRC, կտրուկ նվազեցնում են պողպատի, այդ թվում՝ փոշեպողպատի պլաստիկությունը (δ, ψ) և մածուցիկությունը (KC)՝ դարձնելով պողպատը ոչ կիրառելի կրիոգեն պայմաններում: Խնդիրն այն է, որ կարծրությունը (60...63HRC) և ամրությունը ($\sigma_{\delta} = 3000 \text{ ՄՆ/մ}^2$) կարելի է հեշտությամբ ապահովել ցածր և միջին լեգիրված Fe-C հիմքով պողպատների դեպքում՝ կիրառելով ջերմամեխանիկական մշակում [15, 16]: Ուստի բարձրացնելով ամրային հատկությունները (σ_{δ} , HRC), ի հաշիվ պլաստիկության (δ, ψ) և մածուցիկության (KC), նշանակում է կանխել մարտենսիտային ձերացող փոշեպողպատների պրակտիկ նպատակահարմարությունը, որի արժեքը 5...25 անգամ թանկ է կոնստրուկցիոն նշանակությամբ երկաթ-ածխածնային լեգիրված պողպատներից:

Հաշվի առնելով [17] աշխատանքում բերված տվյալները, իրականացվել է համալիր մետաղագրական հետազոտություն PIC-H18K10M5Re մակնիշի մարտենսիտային ձերացող փոշեպողպատի ջերմային մշակման օպտիմալ ռեժիմների բացահայտման նպատակով: Մամլվածքները պատրաստվել են գլանաձև ($d=30 \text{ մմ}$, $h=50 \text{ մմ}$) $\sim 25\%$ ծակոտկենությամբ, այնուհետև եռակավվել են եռակավման օպտիմալ ռեժիմներում ($T_{\text{եռ}} = 1100...1150^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{եռ}} = 2 \text{ ժամ}$) և ենթարկվել տաք արտամղման՝ $T_{\text{արտ}} = 1150^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{արտ}} = 0,5 \text{ ժամ}$, $\lambda = 5$, $\alpha_{\text{մ}} = 55^{\circ}$: Ստացված փորձանմուշները թրծվել են աուստենիտային տիրույթի ջերմաստիճանում ($820 \pm 20^{\circ}\text{C}$), որից հետո ենթարկվել միսման (սառեցումը ջրում) և ձերացման:

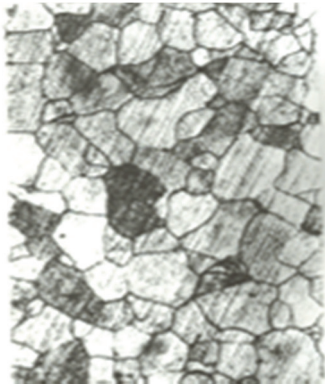
Նկ. 7-ում (ա, բ, գ, դ, ե) ցույց է տրված թրծված PIC-H18K10M5Re փոշեպողպատում կոմպոնենտների բաշխվածությունը նմուշի երկայնական և լայնական կտրվածքներում: Ինչպես երևում է նկարից, Fe, Ni, Co, Mo և Re տարրերի բաշխումը համասեռ է, այսինքն հոմոգենացումն ավարտված է: Սա հիմնական պահանջն է, որն ապահովում է բարձրամուր նյութերի շահագործման հուսալիությունը, որոնց թվին են պատկանում մարտենսիտային ձերացող պողպատները, այդ թվում՝ փոշեպողպատները: Հենց կառուցվածքի համասեռությունով է պայմանավորված նյութերի ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների կայունությունը:

Կառուցվածքային հետազոտությունների մի մասը բերված է նկ. 8, 9 և 10-ում: Թրծումից հետո կառուցվածքը միաֆազ է (նկ. 8) և անհամեմատ մանրահատ:

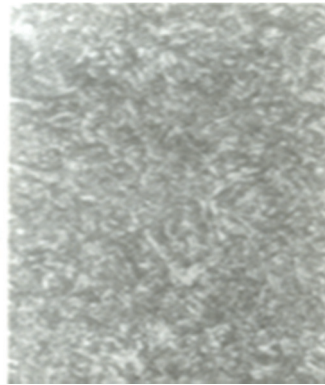
Մարտենսիտը, որը ստացվել է միսման ժամանակ (նկ. 9), չունի որոշակի կառուցվածք և նման է անկառուցվածք մարտենսիտին:



Նկ. 7. PC-H18K10M5Re փոշեպողպատում կոմպոնենտների բաշխվածությունը թրծումից հետո. ա – Fe, բ – Ni, գ – Co, դ – Mo, է – Re



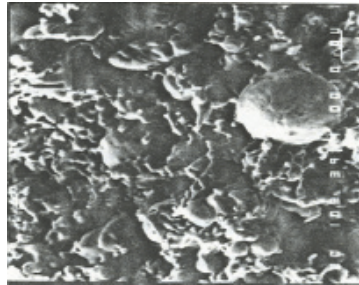
Նկ. 8. PC-H18K10M5Re պողպատի միկրոկառուցվածքը թրծումից հետո (x 250)



Նկ. 9. PC-H18K10M5Re պողպատի միկրոկառուցվածքը միսմից հետո (x 600)

ԲՅՄ-200 մակնիշի էլեկտրոնային մանրադիտակով նկարահանվել են միջմետաղական մասնիկները, որոնք անջատվել են ծեփացման ժամանակ (նկ. 10):

Մասնիկները կոհերենտ կապված են մայրակի հետ, իսկ նրանց չափերը (0,01...0,1 մկ) համապատասխանում են այն մասնիկների կրիտիկական չափերին, որոնք ապահովում են դիսպերս ամրացում [18]:



Նկ. 10. Ծերացման ժամանակ անջատված միջմետաղական մասնիկների միկրոկառուցվածքը ($\times 25000$)

Մասնիկների ծավալային պարունակությունը կախված է լեգիրող տարրերի քանակից, իսկ մասնիկների չափերը և ձևը՝ ծերացման ջերմաստիճանից և տևողությունից: Սրանց ազդեցության տակ տեղի են ունենում մասնիկների աճ և կոագուլյացիա, որոնք հանգեցնում են գերծերացման, ինչը երևում է նկ. 10-ում: Միջմետաղները անջատվում են ոչ միայն հատիկի սահմաններում, այլ նաև հատիկի ծավալում:

Ռենտգենյան անալիզի միջոցով որոշվել են ֆազերը և ցանցերի պարամետրերը: Ֆազի ձևավորումը հիմնականում իրականանում է Fe-Ni վիճակի դիագրամի համաձայն՝ Co-ի, Mo-ի և Re-ի մասնակցությամբ: ПС-Н18К10М5Re միաված փոշեպողպատի ցանցի պարամետրը՝ $a = 0,28674$ նմ, իսկ ծերացումից հետո՝ $a = 0,28603$ նմ ($T_{\text{ծեր}} = 450^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{ծեր}} = 5$ ժամ): Ցանցի պարամետրի նվազումը տեղի է ունենում մարտենսիտի տրոհման արդյունքում՝ ի հաշիվ Ni_3Mo , Ni_3Re , NiRe , FeRe , Fe_2Mo միջմետաղական ֆազերի առաջացման: Այս միջմետաղների լրացուցիչ ուսումնասիրումը ցույց է տալիս, որ սրանք իրականում մասամբ լեգիրված են և ներկայացնում են $(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co}, \text{Re})_2\text{Mo}$ և $(\text{Ni}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Re})_3\text{Mo}$ տիպի միացություններ:

ПС-Н18К10М5Re մակնիշի մարտենսիտային ծերացող փոշեպողպատի ամրությունը որոշվել է ըստ քիմիական բաղադրության և ծերացման ռեժիմների [8, 9]: Փոշեպողպատի քիմիական բաղադրությունն ընտրվել է այնպես, որ 20°C ջերմաստիճանում չմնա մնացորդային աուստենիտ: Ինչ վերաբերում է միսման ռեժիմներին, ապա դրանք որոշիչ չեն և վերցվել են $820...850^\circ\text{C}$, որը բավարարում է օպտիմալ մեխանիկական հատկությունների ստացումը $T_{\text{ծեր}} = 480...520^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{ծեր}} = 2...4$ ժամ ռեժիմներով ծերացումից հետո: Ինչպես նշվել է, միսման ջերմաստիճանի բարձրացումը նպատակահարմար չէ, քանի որ այն կապված է հատիկի աճի և զագահագեցման հետ:

Աղյուսակում բերված են ПС-Н18К10М5Re մակնիշի մարտենսիտային ծեփացող փոշեպողպատի և Н18К10М5Т մակնիշի ստանդարտ մարտենսիտային ծեփացող պողպատի մեխանիկական հատկությունները: Ընդ որում, Н18К10М5Т մակնիշի պողպատը մարտենսիտային ծեփացող պողպատների ընտանիքում համարվում է բազային և շնորհիվ իր բարձր հատկությունների՝ ունի ամենամեծ կիրառությունը: Այս պողպատի հիման վրա էլ իրականացվել են ПС-Н18К10М5Re մակնիշի փոշեպողպատի ընտրումը և մշակումը:

Աղյուսակ

Մարտենսիտային ծեփացող պողպատների հատկությունները

Պողպատի մակնիշը	$\sigma_{0.2}$	σ_{δ}	δ	ψ	KC, $\mathcal{Q}/\text{սմ}^2$	Ծանոթություն
	$\text{ՄՆ}/\text{սմ}^2$		%			
ПС-Н18К10М5Re:						
- արտամղված, $\lambda_{\text{արտ}} = 4$	2000...2150	2300... 2460	7... 8	45...50	35...40	HRC = 55 – 58, $T_{\text{մխում}} = 820\pm20^{\circ}C$, $\tau_{\text{մխում}} = 1,5 \text{ ժամ}$, $T_{\text{ծեք}} = 400\pm10^{\circ}C$, $\tau_{\text{ծեք}} = 12 \text{ ժամ}$;
- արտամղված, $\lambda_{\text{արտ}} = 6$	2180...2240	2480... 2550	10...12	51...57	86...92	
Н18К10М5Т [21]	1800...2000	1900... 2100	8...10	45...55	40...60	Ti = 0,6...0,8%, $T_{\text{ծեք}} = 480\text{-}500^{\circ}C$, $\tau_{\text{ծեք}} = 3 \text{ ժամ}$: Խառնուկներ: C ≤ 0,03%, S ≤ 0,01%, P ≤ 0,01%, Mn ≤ 0,1%, Si ≤ 0,1%

Հատկությունների համեմատումը ցույց է տալիս, որ ամրությամբ ($\sigma_{0.2}$, σ_{δ}) և պլաստիկությամբ (δ , ψ , KC) ПС-Н18К10М5Re փոշեպողպատը գերազանցում է Н18К10М5Т ստանդարտ պողպատին: Ինչպես երևում է աղյուսակից, տաք արտամղումը, երբ $\lambda_{\text{արտ}} = 4$, չի ապահովում փոշու մասնիկների միակցում, և ստացվում է ~0,5% սահմաններում մնացորդային ծակոտկենություն (նկ. 4): Հենց սրանով է բացատրվում է փոշեպողպատի հատկությունների բարձրացումը $\lambda_{\text{արտ}} = 6$ և հատկապես հարվածային մածուցիկության (KC = 86...92 $\mathcal{Q}/\text{սմ}^2$) դեպքում: Սա վկայում է մարտենսիտային ծեփացող պողպատների բարձր զգայությունը կառուցվածքային արատների նկատմամբ: Մեկ առանձնահատկություն ևս. Н18К10М5Т պողպատը պարունակում է 0,6...0,8% Ti, որի ձգման ամրության սահմանը ($\sigma_{\delta} = 1900\text{...}2100 \text{ ՄՆ}/\text{սմ}^2$) ավելի ցածր է, քան ПС-Н18К10М5Re փոշեպողպատինը ($\sigma_{\delta} = 2480\text{...}2550 \text{ ՄՆ}/\text{սմ}^2$): Սա բացատրվում է նրանով, որ փոշեպողպատի ծեփա-

ցումն իրականացվել է ցածր ջերմաստիճաններում ($T_{\text{ծեր}} = 400^{\circ}\text{C}$) և երկար տևողությամբ ($\tau_{\text{ծեր}} = 12$ ժամ), այսինքն մասնիկների անջատումն ավելի դիսպերս է ու հավասարաչափ, և հետևաբար՝ բարձր են նրա ամրությունն ու կարծրությունը ($\text{HRC} = 55 \dots 58$): H18K10M5T մակնիշի ստանդարտ պողպատի ծերացումը նույնպես կարելի է իրականացնել 400°C և ցածր ջերմաստիճաններում, սակայն դիսպերս կարծրացումը կարգելակվի Ti-ի առկայության պատճառով, որը բլոկավորում է դիֆուզիոն գործընթացները: Բացի Ti-ից, արգելակող տարրեր են նաև Al, Cr և այլն: Այդ պատճառով արդյունաբերական մարտենսիտային ծերացող պողպատների ծերացման ջերմաստիճանը հասնում է մինչև $600 \dots 650^{\circ}\text{C}$ [19-21]: Այդ ջերմաստիճանում տեղի է ունենում միջմետաղական ֆազերի աճ և կոագուլիացիա, այսինքն միաժամանակ ընթանում են հակադիր գործընթացներ՝ ամրացում և թուլացում, ինչը էականորեն նվազեցնում է մարտենսիտային ծերացող պողպատների հատկությունները:

ΠC-H18K10M5Re մակնիշի մարտենսիտային ծերացող փոշեպողպատի բարձր հատկությունները պայմանավորված են ոչ միայն նրա քիմիական մաքրությամբ (ըստ խառնուկների) և կառուցվածքային համասեռությամբ, այլ նաև արտամղման գործընթացով, որի ժամանակ տեղի են ունենում հատիկների մանրացում և ամբողջ ծավալով հավասարաչափ բաշխում: Կատարված համալիր հետազոտությունների արդյունքում մշակվել է մարտենսիտային ծերացող պողպատափոշուց արտադրատեսակների ստացման տեխնոլոգիա (նկ. 11):

ΠC-H18K10M5Re մակնիշի մարտենսիտային

Ծերացող պողպատափոշի

↓
Մամլում

↓
Եռակայում

↓
Swag արտամղում

↓
Թրծում

↓
Մեխանիկական մշակում

↓
Մխում

↓
Ծերացում

↓
Վերջնամշակում

↓
Պատրաստի արտադրանք

Նկ. 11. Մարտենսիտային ծերացող փոշեպողպատների և արտադրատեսակների ստացման տեխնոլոգիա

Մշակված տեխնոլոգիան ներառում է մամլվածքների մամլման, եռակալման, տաք արտամղման և ջերմային մշակման գործընթացները: Ցույց է տրված, որ ստացված փոշեպողպատներն իրենց ֆիզիկա-մեխանիկական և տեխնոլոգիական հատկություններով չեն զիջում ստանդարտ պողպատներին, իսկ որոշ դեպքերում գերազանցում են դրանց:

Եզրակացություն: Հետազոտվել են ПС-Н18К10М5Re մակնիշի մարտենսիտային ձերացող պողպատափոշուց պատրաստված ծակոտկեն մամլվածքների եռակալման, տաք արտամղման և ջերմային մշակման գործընթացները: Ցույց է տրված, որ ռենիումը, լինելով շատ ակտիվ մետաղ և լուծվելով Fe-Ni-Co-Mo համակարգում, առաջացնում է պինդ լուծույթներ և ռենիումի միջմետաղական միացություններ՝ բարձրացնելով փոշեպողպատի ամրությունը, կարծրությունը, հարվածային մածուցիկությունը, ջերմակայունությունը, կոռոզիակայունությունը և սառնաբեկչությունը: Արդյունքում մշակվել է բարձր ֆիզիկա-մեխանիկական հատկություններով օժտված մարտենսիտային ձերացող փոշեպողպատի ստացման տեխնոլոգիա:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г.** Специальные стали: Учебник для вузов.- М.: Металлургия, 1985.- 408 с.
2. **Աղբալյան Ս.Գ., Սալտիկովա Եվ.Ս.** Հատուկ պողպատներ և համաձուլվածքներ. Ուսումնական ձեռնարկ.- Երևան: ՀՊՃՀ, 2003.- 260 էջ:
3. **Бадеян Б.Ф.** Разработка мартенситно-старееющих порошковых сталей и процессов их получения: Дис. ... канд. техн. наук.- Ереван, 1994.- 130 с.
4. Получение порошковых мартенситно-старееющих сталей / **С.Г. Агбальян, Б.Ф. Бадеян, Р.Г. Самвелян и др.** // Порошковая металлургия.- Киев, 1994.- N 9/10.- С. 7-15.
5. Формование структуры и свойств мартенситно-старееющих порошковых сталей, полученных экструзией / **С.Г. Агбальян, Б.Ф. Бадеян, С.А. Ассила и др.** // Порошковая металлургия.- Киев, 1994.- N 11/12.- С. 10-13.
6. Низколегированные порошковые стали, полученные по металлооксидной технологии / **С.Г. Агбальян, С.А. Ассила, Н.Н. Манукян и др.** // Порошковая металлургия.- Киев, 1995.- N 1/2.- С. 5-10.
7. **Бодяко М.Н., Астанчик С.А., Ярошевич Ф.Б.** Мартенситно-старееющие стали.- Минск: Наука и техника, 1976.- 248 с.
8. **Աղբալյան Ս.Գ., Միմոնյան Վ.Ա.** Մարտենսիտային ձերացող փոշեպողպատների ստացման տեխնոլոգիայի հիմնավորումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. ՏԳ սերիա.- Երևան, 2022.- Հատ. 75, N 3.- էջ 342-354:
9. **Агбальян С.Г., Симонян В.А., Арутюнян Ю.В.** Исследование процесса ферритизации в оксидных системах Fe₂O₃-NiO-CoO-MoO₃ и разработка технологии получения сложных оксидов // Вестник НПУА: Химические и природоохранные технологии.- Ереван, 2022.- N 2.- С.32-45.

10. **Агбальян С.Г., Оганесян А.М., Симонян В.А.** Исследование процесса восстановления системы $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x](\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_4 + \text{NH}_4\text{ReO}_4$ и разработка технологии получения мартенситно-стареющего стального порошка // Вестник НПУА: Металлургия, материаловедение, недропользование.- Ереван, 2022.- N 2.- С.31-41.
11. **Анциферов В.Н., Акименко В.Б.** Спеченные легированные стали.- М.: Металлургия, 1983.- 88 с.
12. **Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.** Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий.- М.: Наука, 1976.- 279 с.
13. **Новик Ф.С., Арсов Я.Б.** Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов.- М.: Машиностроение; София: Техника, 1980.- 304 с.
14. **Агбальян С.Г.** Теоретические и технологические основы формирования структуры и свойств порошковых материалов при экструзии: Автореф. дис. ... докт. техн. наук.- Ереван, 1992.- 33 с.
15. **Бернштейн М.Л.** Термомеханическая обработка металлов и сплавов.- Том 2.- М.: Металлургия, 1968.- 1172 с.
16. **Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Кануткина Л.М.** Термомеханическая обработка стали.- М.: Металлургия, 1983.- 483 с.
17. **Бокштейн С.З.** Старение и свойства металлических сплавов.- М.: Металлургия, 1971.- 496 с.
18. **Келли А., Николсон Р.** Дисперсионное твердение / Пер. с англ.- М.: Металлургия, 1966.- 300 с.
19. **Перкас М.Д., Кардонский В.М.** Высокопрочные мартенситно-стареющие стали.- М.: Металлургия, 1970.- 224 с.
20. **Бодяко М.Н., Астапчик С.А., Ярошевич Г.Б.** Мартенситно-стареющие стали.- Минск: Наука и техника, 1976.- 248 с.
21. **Энциклопедия неорганических материалов.** - Киев: Вища школа, 1977.- 840 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 29.08.2022:

С.Г. АГБАЛЯН, Г.А. ВАСИЛЯН, В.А. СИМОНЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕЙ ЭКСТРУЗИИ И
ТЕРМООБРАБОТКИ ПОРИСТЫХ ПРЕССОВОК, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ
МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩИХ СТАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ МАРКИ
ПС-Н18К10М5Re**

Создание порошковых композиционных материалов с высокими функциональными свойствами, таких как порошки мартенситно-стареющих сталей, устойчивые к хрупкому разрушению при отрицательных температурах, является одним из приоритетных направлений современного материаловедения. Эти стали хорошо поддаются механической обработке резанием, легко деформируются и подвергаются термической обработке.

Исследованы процессы спекания, горячей экструзии, термообработки и структурирования пористых прессовок, спрессованных из мартенситно-старееющего стального порошка ПС-Н18К10М5Re, полученного путем синтеза сложных оксидов. В результате исследований разработана технология получения изделий из порошка мартенситно-старееющей стали, включающая процессы прессования пористого стального порошка, спекания прессовок, горячей экструзии и термической обработки. Показано, что полученные порошковые стали по своим физико-механическим и технологическим свойствам не уступают стандартным сталям, а в ряде случаев даже превосходят их.

Ключевые слова: стальной порошок, прессование, спекание, горячая экструзия, порошковая сталь, отжиг, закалка, старение, мелкозернистая структура, интерметаллическая фаза.

S.G. AGHBALYAN, G.A. VASILYAN, V.A. SIMONYAN

INVESTIGATING THE PROCESSES OF HOT EXTRUSION AND HEAT TREATMENT OF POROUS PRESSED METAL MADE FROM MARTENSITE AGING STEEL POWDERS OF THE ПС-Н18К10М5Re TRADE

The creation of powder composite materials with high functional properties, such as maraging steel powders resistant to brittle degradation at negative temperatures, is one of the primary trends of modern material science. These steels are well machined by cutting, easily deformed and subject to heat treatment.

The processes of sintering, hot extrusion, heat treatment, and structuring of porous compacts pressed from the maraging PS-H18K10M5Re steel powder obtained by synthesizing complex oxides have been studied. As a result of the research, a technology has been developed for obtaining products from maraging steel powder, including the processes of pressing porous steel powder, sintering compacts, hot extrusion and heat treatment. It is shown that the resulting powder steels are not inferior to the standard ones in terms of their physical, mechanical and technological properties, and in some cases even surpass them.

Keywords: steel powder, pressing, sintering, hot extrusion, powdered steel, annealing, hardening, aging, fine grain structure, intermetallic phase.