

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԵՐԵՎԱՆ

ЕРЕВАН

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ
ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

Հատոր 76

N 4 2023

ՀՈԿՏԵՄԲԵՐ - ԴԵԿՏԵՄԲԵՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2023

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И
НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Том 76

N 4 2023

ОКТАБРЬ - ДЕКАБРЬ

ЕРЕВАН 2023

PROCEEDINGS

OF THE REPUBLIC OF ARMENIA NATIONAL ACADEMY OF
SCIENCES AND NATIONAL POLYTECHNIC UNIVERSITY OF
ARMENIA

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

Volume 76

N 4 2023

OCTOBER - DECEMBER

YEREVAN 2023

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Գլխավոր խմբագիր՝ Մելիքյան Վ.Շ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Գլխ. խմբագրի տեղակալ՝ Գրիգորյան Ա.Խ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Պատասխանատու քարտուղար՝ Սեյրանյան Ժ.Ս., ՀՀ
Խմբագրական կոլեգիա՝
Աղբալյան Ս.Գ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Ասլանյան Լ.Հ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Բաղդասարյան Հ.Վ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Բաղդասարյան Ս.Զ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Գռնեյմա Մ., տ.գ.թ., Եգիպտոս
Գրիմբլաթ Վ., տ.գ.թ., Չիլի
Դոկիչ Բ., տ.գ.դ., Բոսնիա և Հերցեգովինա
Զորյան Ե., տ.գ.թ., ԱՄՆ
Իյուշենկո Ա.Ֆ., Բելառուսի ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս
Լան Չ., տ.գ.թ., Չինաստան
Կրասնիկով Գ.Յ., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Կուրտուա Բ., տ.գ.թ., Ֆրանսիա
Հախումյան Ա.Ա., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Հակոբյան Վ.Ն., ֆ.-մ.գ.դ., ՀՀ
Հախանով Վ.Ի., Կիրառական ռադիոէլեկտրոնիկայի Ուկրաինայի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ.,
Ուկրաինա
Ղույյան Ա.Գ., ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Սանդալիկա Մ., տ.գ.թ., Հնդկաստան
Մարուխյան Ո.Զ., տ.գ.թ., պրոֆ., ՀՀ
Միխայլիչ Ա.Ա., տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս
Շիխտման Ու., տ.գ.թ., Գերմանիա
Չանգ Ֆ., Թայվանի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., Թայվան
Չապլիզին Յու.Ա., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Պետրոսյան Օ.Հ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Պետրոսյանց Կ.Օ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Սապատնեկար Ս., տ.գ.թ., ԱՄՆ
Մարգսյան Յու.Լ., ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Միմոնյան Ս.Հ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Ստեմպկովսկի Ա.Լ., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Վորոբյով Ա.Ե., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Տիխոմիրով Գ.Վ., ֆ.-մ.գ.դ., ՌԴ
Յանովա Մ., տ.գ.թ., Բուլղարիա
Ուբար Ռ., Էստոնիայի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., Էստոնիա
Ուսանով Վ.Ի., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор Меликян В.Ш., член-корр. НАН РА., д.т.н., проф., Армения

Заместитель главного редактора Григорян А.Х., д.т.н., проф., Армения

Ответственный секретарь Сейранян Ж.С., Армения

Редколлегия:

Агбалян С.Г., д.т.н., проф., Армения

Акопян В.Н., д.ф.-м.н., Армения

Асланиян Л.А., член-корр. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Армения

Ахумян А.А., член-корр. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Армения

Багдасарян М.К., д.т.н., проф., Армения

Багдасарян О.В., д.т.н., проф., Армения

Воробьев А.Е., д.т.н., проф., Россия

Гонейма М., к.т.н., Египет

Гримблат В., к.т.н., Чили

Гулян А.Г., академик НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Армения

Докич Б., д.т.н., Босния и Герцеговина

Зорян Е., к.т.н., США

Ильющенко А.Ф., член-корр. НАН Беларуси, д.т.н., проф., Беларусь

Красников Г.Я., академик РАН, д.т.н., проф., Россия

Куртуа Б., к.т.н., Франция

Лан Ч., к.т.н., Китай

Мандалика С., к.т.н., Индия

Марухян В.З., к.т.н., проф., Армения

Михайлович А.А., д.т.н., проф., Беларусь

Петросян О.А., д.т.н., проф., Армения

Петросянец К.О., д.т.н., проф., Россия

Сапатнекар С., к.т.н., США

Саркисян Ю.Л., академик НАН РА, д.т.н., проф., Армения

Симонян С.О., д.т.н., проф., Армения

Стемпковский А.Л., академик РАН, д.т.н., проф., Россия

Тихомиров Г.В., д.ф.-м.н., Россия

Убар Р., академик НАН Эстонии, д.т.н., проф., Эстония

Усанов В.И., д.т.н., проф., Россия

Хаханов В.И., академик Академии наук Украины по прикладной радиоэлектронике, д.т.н., проф., Украина

Цанова С., к.т.н., Болгария

Чанг Ф., академик Национальной академии Тайваня, д.т.н., Тайвань

Чаплыгин Ю.А., академик РАН, д.т.н., проф., Россия

Шлихтманн У., к.т.н., Германия

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief: Melikyan V.Sh., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Deputy Editor-in-Chief: Grigoryan A.Kh., Sci.Dr., Prof., Armenia

Executive Secretary: Seyranyan Zh.S., Armenia

Editorial Board:

Aghbalyan S.G., Sci.Dr., Prof., Armenia

Aslanyan L.H., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Baghdasaryan H.V., Sci.Dr., Prof., Armenia

Baghdasaryan M.Q., Sci.Dr., Prof., Armenia

Chang F., Member of National Academy of Taiwan, Sci.Dr., Taiwan

Chaplygin Yu.A., Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia

Courtois B., Ph.D., France

Dokic B., Sci.Dr., Bosnia and Herzegovina

Ghoneima M., Ph.Dr., Egypt

Ghulyan A.G., Academician of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Grimblatt V., Ph.Dr., Chile

Hahanov V.I., Academician of Academy of Sciences of Ukraine in Applied Radioelectronics, Sci.Dr., Prof., Ukraine

Hakhumyan A.A., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Hakobyan V.N., Sci.Dr., Armenia

Ilyushenko A.F., Corr.member of NAS of Belarus, Sci.Dr., Prof., Belarus

Krasnikov G.Y., Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia

Lan Ch., Ph.Dr., China

Mandalika S., Ph.Dr., India

Marukhyan V.Z., Ph.Dr., Prof., Armenia

Mikhaylevich A.A., Sci.Dr., Prof., Belarus

Petrosyan O.H., Sci.Dr., Prof., Armenia

Petrosyants K.O., Sci.Dr., Prof., Russia

Sapatnekar S., Ph.Dr., USA

Sargsyan Yu.L., Academician of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Schlichtmann U., Ph.Dr., Germany

Simonyan S.H., Sci.Dr., Prof., Armenia

Stempkovski A.L., Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia

Tikhomirov G.V., Sci.Dr., Russia

Tsanova S., Sci.Dr., Bulgaria

Ubar R., Academician of Academy of Sciences of Estonia, Sci.Dr., Prof., Estonia

Usanov V.I., Sci.Dr., Prof., Russia

Vorobyov A.Y., Sci.Dr., Prof., Russia

Zorian Y., Ph.Dr., USA

Հրատ. խմբագիր՝

Խմբագիրներ՝

Ժ.Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Հ.Ց. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

© Издательство НПУА

Известия НАН РА и НПУА (сер. Техн. наук), 2023

«Հայաստանի գիտությունների ազգային ակադեմիայի և Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի տեղեկագիր. տեխնիկական գիտությունների սերիա» հանդեսում տպագրվում են տեսական և փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները տեխնիկական գիտությունների հետևյալ բաժիններից՝ մեքենաշինություն, մետալուրգիա, նյութագիտություն, ընդերքօգտագործման տեխնոլոգիաներ, շինարարական կառուցվածքներ, հիդրավլիկա և հիդրոտեխնիկական կառույցներ, էներգետիկա, էլեկտրատեխնիկա, գիտական սարքաշինություն և չափողական տեխնիկա, հաշվողական տեխնիկա և ինֆորմատիկա, ռադիոէլեկտրոնիկա, միկրոէլեկտրոնիկա, լազերային տեխնիկա, ավտոմատացում և կառավարման համակարգեր:

Հանդեսում լուսաբանվում են ակադեմիական և ճյուղային գիտահետազոտական ինստիտուտների, բուհերի, գիտաարտադրական միավորումների և այլ կազմակերպությունների գիտական գործունեության առավել կարևոր արդյունքները:

Հանդեսի հիմնական նպատակն է խթանել գիտատեխնիկական առաջընթացը և նպաստել արտադրության մեջ այդ արդյունքների ներդրմանը:

Հանդեսը նախատեսված է ճարտարագետների, հետազոտողների և գիտնականների լայն շրջանների համար: Լույս է տեսնում երեք ամիսը մեկ անգամ:

В журнале “Известия Национальной академии наук РА и Национального политехнического университета Армении. Серия технических наук” публикуются результаты теоретических и экспериментальных исследований, охватывающих основные разделы технических наук: машиностроение, металлургия, материаловедение, технологии недропользования, строительные конструкции, гидравлика и гидротехнические сооружения, энергетика, электротехника, научное приборостроение и измерительная техника, вычислительная техника и информатика, радиоэлектроника, микроэлектроника, лазерная техника, автоматизация и системы управления.

Журнал является периодическим изданием, освещающим наиболее важные результаты научной деятельности академических и отраслевых научно-исследовательских институтов, вузов, научно-производственных объединений и др.

Основная цель журнала - пропагандировать фундаментальные и прикладные исследования в области технических наук, способствовать внедрению их результатов и ускорению научно-технического прогресса в производстве.

Журнал рассчитан на широкий круг ученых, исследователей и инженеров. Выходит один раз в три месяца.

The journal “Proceedings of the Republic of Armenia National Academy of Sciences and National Polytechnic University of Armenia. Series of Technical Sciences” publishes the results of theoretical and experimental investigations concerning the main branches of technical sciences: mechanical engineering, metallurgy, material science, mining engineering, natura utilization, building constructions, hydraulics and hydrotechnical constructions, power and electrical engineering, scientific instrument making and measuring devices, computer science and informatics, radioelectronics, microelectronics, laser equepment, automation and control systems.

The journal is a periodical edition that presents the most important results of scientific activities at academic and branch scientific-research institutions, universities, research - industrial companies, etc.

The main task of the journal is the propaganda of fundamental and applied investigations in the field of technical sciences, and the promotion of their introduction and the acceleration of scientific and technological progress in industry.

The journal is intended for a wide range of scientists, researchers and engineers. It is published once in three months.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Վ.Ա. ԲԱՂԴԱՍԱՐՅԱՆ, Գ.Ա. ՎԱՍԻԼՅԱՆ,
Ս.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

**ՏԱՔ ԱՐՏԱՄՂՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ ՁՈՒԼՎԱԾ ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՅԻՆ
ՀԱՄԱՁՈՒԼՎԱԾՔՆԵՐԻ ԴԵՖՈՐՄԱՅՄԱՆ ԼԱՐՎԱԾԱՅԻՆ ՎԻՃԱԿԻ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՈՒ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ՕՐԻՆԱԶՄՓՈԽՅՈՒՆԵՐԸ**

Ուսումնասիրվել է ձուլված ալյումինային համաձուլվածքների տաք արտամղման դեֆորմացման լարվածային վիճակը և կառուցվածքի ու հատկությունների ձևավորման ընթացքը: Բացահայտվել է, որ արտամղման ժամանակ մետաղի օղակաձև շերտերը ենթարկվում են ոչ միայն առանցքային և լայնական, այլ նաև սահքի դեֆորմացիայի: Վերջինս ներքին շերտերից դեպի մակերևութային շերտեր աճում է: Աճում են նաև երկարացման հիմնական լարումները և սահքի դեֆորմացիաների գումարը: Ցույց է տրված, որ մամլման մասի ելքի մոտ երկարացման գլխավոր լարումների ուղղությունները տարբեր են, դրանք կազմում են մամլման առանցքի հետ որոշակի անկյուն, որը նույնպես աճում է դեպի մակերևույթ: Արդյունքում բացահայտվել է, որ գլխավոր շառավղային և շրջանագծային դեֆորմացիաները հանդիսանում են արգելակող դեֆորմացիաներ:

Առանցքային բառեր. ձուլում, ալյումինային համաձուլվածք, տաք արտամղում, սահքի դեֆորմացիա, լարում, մամլմայր, ճնշում:

Ներածություն: Բարձր տեսակարար ամրությամբ, հրամրությամբ, պլաստիկությամբ և այլ արժեքավոր հատկություններով օժտված նոր նյութերի ստեղծման բնագավառում մեծ հետաքրքրություն են ներկայացնում մետաղական հիմքով կոմպոզիտային նյութերը, ինչպիսիք են, օրինակ, դիսպերս մասնիկներով կարծրացող և դիսպերս հատիկներով ամրացվող նյութերը, որոնցից առաջինում դիսպերս մասնիկների չափերը տատանվում են 0,01 մկմ-ից մինչև 0,1 մկմ, իսկ ծավալային պարունակությունը՝ 1-ից 15 ծավ. %, մինչդեռ երկրորդում դիսպերս հատիկների չափերը գերազանցում են 1,0 մկմ, իսկ ծավալային պարունակությունը՝ ~25 ծավ. %: Կոմպոզիտային նյութերի այլ օրինակ են հանդիսանում երկմետաղական և շերտավոր նյութերը: Սակայն հատկությունների բազմազանության տեսանկյունից առավել հեռանկարային են մետաղական թելքերով ամրանալորված կոմպոզիտային նյութերը, որոնց մեջ մետաղական թելքերի տրամագիծը տատանվում է մեկ մկմ-ի մասերից մինչև մի քանի տասնյակ և հարյուր մկմ, իսկ ծավալային պարունակությունը՝ մի քանի %-ից մինչև 70 ծավ. % և ավելի:

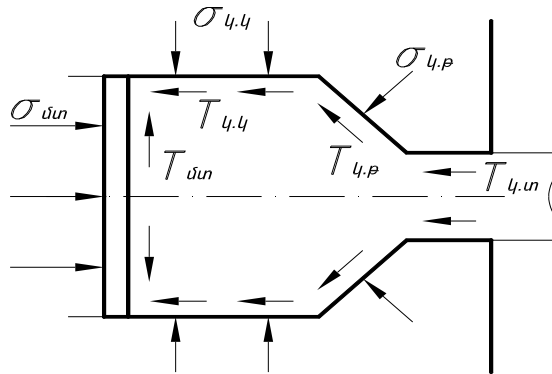
Վերջին տարիներին արդյունաբերության տարբեր բնագավառներում լայն կիրառություն են ստացել հատկապես ալյումինի հիմքով բարձրամուր համաձուլվածքները և կոմպոզիտային նյութերը, որոնց ստացումը նպատակահարմար է իրականացնել ձուլման տեխնոլոգիաներով: Խնդիրն այն է, որ ալյումինային փոշին բավականին օքսիդացած է, ինչը խոչընդոտում է լեգիրող տարրերի հետ մետաղական կոնտակտի և հետևաբար՝ համասեռ համաձուլվածքի ստացմանը, որի հետևանքով խիստ դժվարանում է անհրաժեշտ մեխանիկական հատկությունների ապահովումը: Բացի նշվածից, ալյումինային փոշին բավական թանկ է: Ձուլման եղանակով ստացված համաձուլվածքներում նշված թերություններն իսպառ վերանում են: Մյուս կողմից՝ ձուլման արատների վերացման և մանրահատիկ կառուցվածք ստանալու նպատակով, որոնք ապահովում են բարձր մեխանիկական հատկությունների ստացում, ժամանակակից տեխնիկայում մեծ կիրառություն են գտել ճնշմամբ մշակման տեխնոլոգիաները, այդ թվում՝ տաք արտամղումը:

Ելնելով վերոհիշյալից՝ աշխատանքի նպատակն է հետազոտել ձուլված ալյումինային համաձուլվածքների տաք արտամղման դեֆորմացման լարվածային վիճակը և ուսումնասիրել կառուցվածքի ու հատկությունների ձևավորման գործընթացը, ինչը հանդիսանում է խիստ արդիական և հեռանկարային խնդիր:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Մետաղների դեֆորմացման գործընթացի հետազոտման համար կիրառվում են բազմազան փորձնական և առանձին դեպքերում՝ վերլուծական հետազոտություններ: Այս եղանակները հնարավորություն են տալիս սահմանել արտամղվող մետաղի ծավալի տարրական մասնիկների փոխադարձ տեղափոխությունները, այդ տեղափոխությունները որոշող որակական և քանակական կախվածությունները և, հետևաբար, նաև արտամղվող մետաղի դեֆորմացման լարվածային վիճակը [1-5]: Փորձերը կատարվել են $\Phi 25$ մմ և $h=45$ մմ չափսերով A5E+(5,7...6,5)%Cu բաղադրությամբ ալյումինային համաձուլվածքից ձուլված գլանական և կիսագլանական նմուշների վրա:

Հետազոտության արդյունքները: Ուղիղ արտահոսքով մամլման ժամանակ մետաղի վրա ազդող արտաքին ուժերի և դրանց առաջացրած լարումների սխեման պատկերված է նկ. 1-ում [3]:

Արտամղվող մետաղի վրա մամլամատից ազդող ուժերը և լարումները ($\sigma_{մտ}$) հանդես են գալիս որպես առաջնային ակտիվ, իսկ կոնտեյների կողային և թեք մակերևույթներից ազդող ուժերը և լարումները ($\sigma_{կ,կ}$, $\sigma_{կ,թ}$), ինչպես նաև կոնտեյների և մամլամատի վրա առաջացած շփման ուժերը ($T_{կ,տ}$, $T_{կ,թ}$, $T_{կ,կ}$, $T_{մտ}$)՝ որպես երկրորդային ակտիվ ուժեր և լարումներ: Կոնտեյների վրա արտամղվող մետաղից ազդող ուժերը և լարումները հանդիսանում են ռեակտիվ ուժեր:



Նկ. 1. Ուղիղ արտահոսքով մամլման ժամանակ մետաղի վրա ազդող արտաքին ուժերի և նրանց առաջացրած լարումների սխեման (ուժերը ցույց են տրված նույն սլաքով)

Արտամղման ընթացքում այս բոլոր ուժերը և լարումները փոփոխվում են՝ կախված գործընթացի սկզբնական, ինչպես նաև հաջորդող փուլերում արագության և դեֆորմացման պայմաններից, մետաղի ֆիզիկական վիճակի և կոնտեյնների հետ մետաղի հպման մակերևույթի փոփոխություններից: Հատկապես զգալի փոփոխություն դիտվում է արտամղման գործընթացի վերջնական փուլում [1, 6, 7]:

Ըստ ուժային և դեֆորմացման պայմանների՝ արտամղման գործընթացը կարելի է բաժանել 3 հիմնական փուլերի [8]:

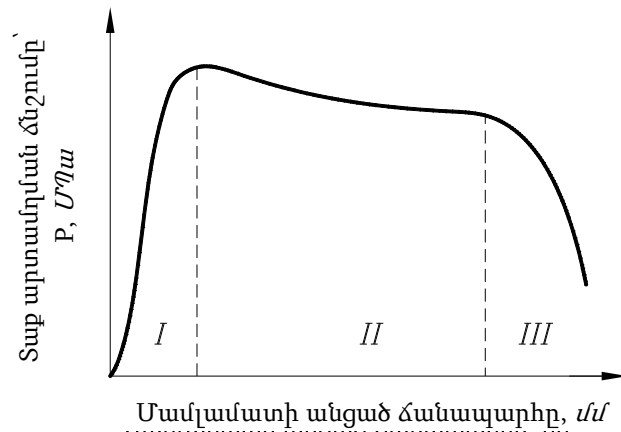
I փուլ - գործընթացի սկզբնական փուլն է, որի ընթացքում տեղի է ունենում արտամղվող նախապատրաստվածքի նստեցում,

II փուլ - գործընթացի հիմնական փուլն է, որը բնութագրվում է մետաղի կայունացած հոսքով,

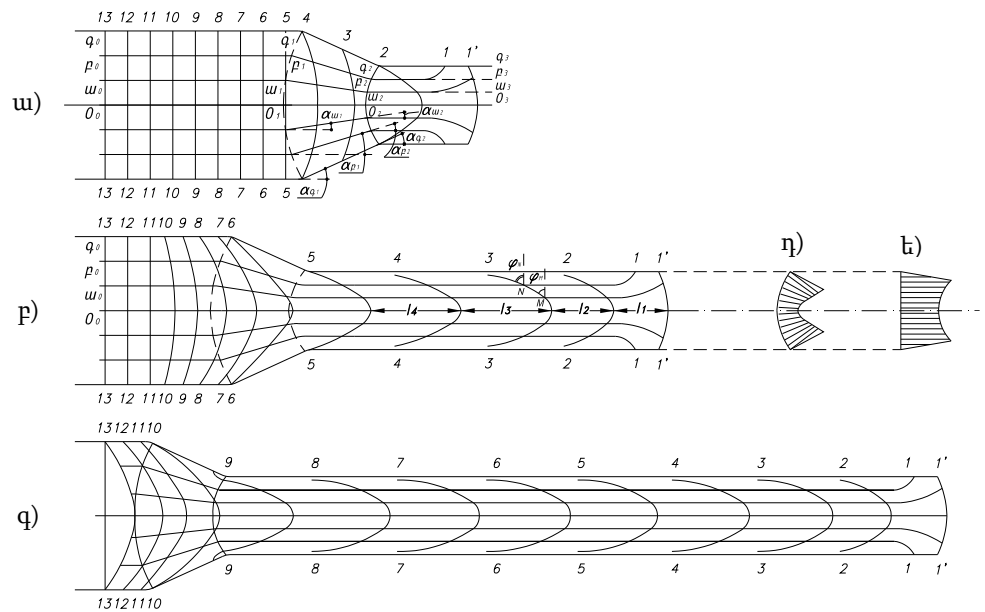
III փուլ - գործընթացի վերջնական փուլն է, որի ժամանակ մետաղի կայունացված հոսքը խախտվում է, և արտամղման գործընթացն ավարտվում է:

Փուլերից յուրաքանչյուրին բնորոշ են ուժային պայմաններ, որոնք որոշվում են հիմնականում ինդիկատորային դիագրամի (արտամղման լրիվ ճնշում – մամլամատի անցած ճանապարհ) միջոցով (նկ. 2) [3]:

Արտամղվող մետաղի դեֆորմացման վիճակը բնութագրվել է կոորդինատային ցանցի սխեմայի փոփոխմամբ՝ համապատասխանաբար գործընթացի սկզբում, մեջտեղում և ավարտին: Արտամղվող մետաղի կոորդինատային ցանցի և դեֆորմացման վիճակի ընդհանուր սխեման բերված է նկ. 3-ում:



Նկ. 2. Ուղիղ արտահոսքով մամլման ժամանակ մամլամատի վրա ազդող գումարային ճնշման փոփոխությունը տարբեր փուլերում (I, II, III)



Նկ. 3. Մամլվող մետաղի կորորդինատային ցանցի և լարվածային վիճակի ընդհանուր սխեման. ա- գործընթացի սկզբին, բ- գործընթացի հիմնական փուլում, գ- գործընթացի վերջնական փուլում, դ- գլխավոր դեֆորմացիաների էպյուրը պլաստիկ գոտու սեղմող մասի ելքի մոտ, ե- գլխավոր երկարացնող դեֆորմացիաների էպյուրը նմուշի տրամագծով

Սխեման կազմվել է միայն արտամղման բարենպաստ պայմաններում կատարված փորձերի հիման վրա: Այն հնարավորություն է տալիս սահմանել միանցուղի կոնական մայրակով արտամղման ժամանակ դեֆորմացիայի բնույթը բնորոշող հետևյալ հիմնական դրույթները.

1. Արտամոդումից հետո սկզբնական կոորդինատային ցանցի բոլոր երկայնական ուղիղ գծերը, բացառությամբ առջևի մասի, մնացել են ուղիղ, սակայն ծովել են մայրակի մամլման մասի մուտքի և ելքի մասում:

2. Ծովածքները փոխադարձ հակուղղված են, ինչպես, օրինակ՝ α_{q1} և α_{q2} անկյունները, որը վկայում է դեֆորմացիայի ոչ մոնոտոնության մասին:

3. Անկյուններ $\alpha_{q1} > \alpha_{p1} > \alpha_{w1}$ և $\alpha_{q2} > \alpha_{p2} > \alpha_{w2}$, ինչը վկայում է մակերևութից դեպի կենտրոն դեֆորմացիայի ոչ մոնոտոնության նվազման մասին:

4. Երկայնական ուղիղները ծովել են մայրակը սեղմող մասի մուտքի մոտ՝ q_1 , p_1 , w_1 և ելքի՝ q_2 , p_2 , w_2 կետերում: Դա ցույց է տալիս, որ արտամղվող մետաղի պլաստիկ գոտու մամլվող մասի ճակատային մակերևույթները ներկայացնում են սահուն ասիմետրիկ մակերևույթներ, որոնց ուռուցիկությունն ուղղված է արտամղմանը հակառակ:

5. Պլաստիկ գոտու մամլվող մասից որոշակի հեռավորության վրա կոորդինատային ցանցի երկայնական գծերը թեքվել են նախապատրաստվածքի առանցքի ուղղությամբ՝ առաջացնելով արտաքին շերտերի հաստացումներ և ներքին շերտերի նեղացումներ:

6. Նախապատրաստվածքում սկզբնական կոորդինատային ցանցի բոլոր լայնական գծերը սիմետրիկ թեքվել են ուռուցիկ մասով արտամղվող մետաղի հոսքի ուղղությամբ: Դա վկայում է, որ արտամղվող մետաղում ներքին շերտերը շարժվել են մակերևութային շերտերից արագ:

7. Արտամղման ավանդական պայմաններում արտամղվող մետաղում կոորդինատային ցանցի լայնական գծերը, բացառությամբ նախապատրաստվածքի ճակատային մասերին հարող գծերի, ստացել են պարաբոլի տեսք՝ $Y^2 = 2px$: Այս պարաբոլների p պարամետրը կախված է նախապատրաստվածքի ճակատային մասից ունեցած կորերի հեռավորությունից:

8. Առջևի ճակատին հարող լայնական գծերը (տվյալ դեպքում՝ մեկը) արտամոդումից հետո ընդունում են $1 - 1' - 1' - 1$ բեկյալի տեսք, ինչը ցույց է տալիս, որ մինչ դեֆորմացիան ուղիղ գծի ծայրերը տեղափոխվել են կողային մակերևույթ, և որ մամլվածքի ճակատային մակերևույթի մի մասն անցել է նրա կողային մակերևույթի վրա:

9. Լայնական գծերի ճկվածքի աղեղը մեծացել է մետաղի հոսքին հակառակ ուղղությամբ:

10. Ընդհանուր դեպքերում, մետաղի հոսքի հակառակ ուղղությամբ դիտվում է նաև լայնական գծերի հեռավորության չնչին աճ:

11. Լայնական գծերի թեքվածքների ձևը ցույց է տալիս, որ արտամղման ժամանակ արտամղվող մետաղի օղակաձև շերտերը ենթարկվում են ոչ միայն առանցքային և լայնական, այլ նաև սահքի դեֆորմացիայի: Վերջինս ներքին

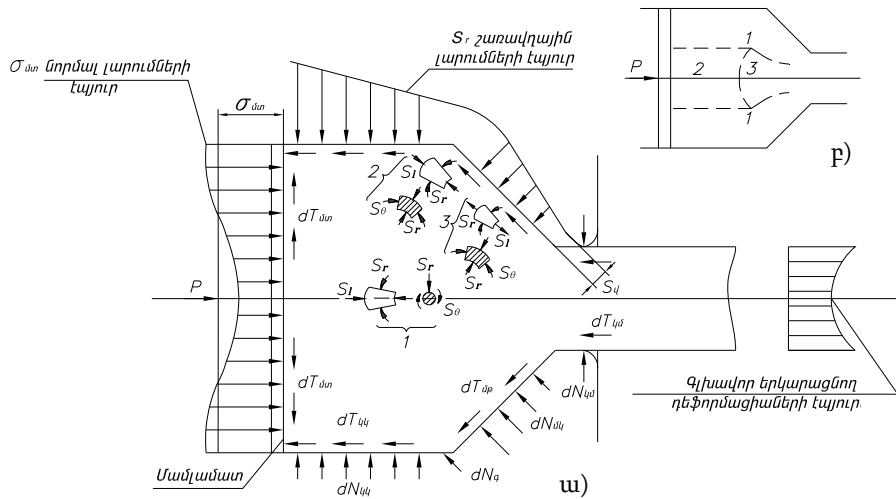
շերտերից դեպի մակերևութային շերտեր աճում է: Դա ապացուցվում է $\gamma_N > \gamma_M$ անկյունների անհավասարությամբ, որոնք բնութագրում են N և M կետերում սահքի դեֆորմացիաները:

12. Դեպի մակերևույթ սահքի դեֆորմացիայի աճը ցույց է տալիս, որ երկարացման լարումները, որոնք հանդիսանում են հիմնական և սահքի դեֆորմացիաների գումար, նույնպես աճում են դեպի մակերևույթ:

13. Մամլման մասի ելքի մոտ երկարացման գլխավոր լարումների ուղղությունները տարբեր են. դրանք մամլման առանցքի հետ կազմում են որոշակի անկյուն, որը նույնպես աճում է մակերևութի ուղղությամբ:

14. Դիտարկված սխեմատիկ փոփոխություններից հետևում է, որ նմուշի ամբողջ ծավալում գլխավոր շառավղային և շրջանագծային դեֆորմացիաները հանդիսանում են որպես կարճացման դեֆորմացիաներ:

Մամլվող մետաղի վրա ազդող ուժերի սխեման բերված է նկ. 4-ում [1, 9]: Եթե արտամղվող մետաղը մտովի բաժանենք անսահման փոքր պատի հաստություն ունեցող երկայնական օղակաձև (խողովակաձև) շերտերի և անտեսենք գործիքի հետ արտաքին շփման ազդեցությունը, ինչպես նաև շերտերի միջև ներքին շփումը, ապա նման բազմաշերտ օբյեկտի տաք արտամղման ժամանակ յուրաքանչյուր շերտ կգտնվի բազմակողմանի անհավասարաչափ սեղմման տակ: Դա նշանակում է, որ երկարացնող դեֆորմացիաները հիմնականում կլինեն պասսիվ: Արտամղման սովորական պայմաններում, երբ դեֆորմացման դիմադրությունը ամբողջ ծավալում գրեթե նույնն է, արտամղվող մետաղում ներքին շերտերը շարժվում են մակերևութային շերտերից արագ: Արդյունքում առաջանում են լրացուցիչ լարումներ՝ մակերևութային շերտերում ձգող, քանի որ յուրաքանչյուր ներքին շերտ, շարժվելով ավելի արագ հարևան շերտի նկատմամբ, տանում է նրան իր հետևից, իսկ ներքին շերտում՝ սեղմող, քանի որ յուրաքանչյուր մակերևութային շերտ խոչընդոտում է հարևան ներքին շերտի շարժմանը: Արդյունքում, ձգտելով լարումների հավասարեցման, առաջանում է արտաքին շերտերի գոտի, որը գտնվում է լրացուցիչ երկայնական ձգող լարումների ազդեցության տակ, որոնք փոքրանում են մակերևութից դեպի առանցք ուղղությամբ, և ներքին շերտերի գոտի, որը գտնվում է լրացուցիչ երկայնական սեղմող լարումների ազդեցության տակ, որոնք մեծանում են դեպի առանցք ուղղությամբ:



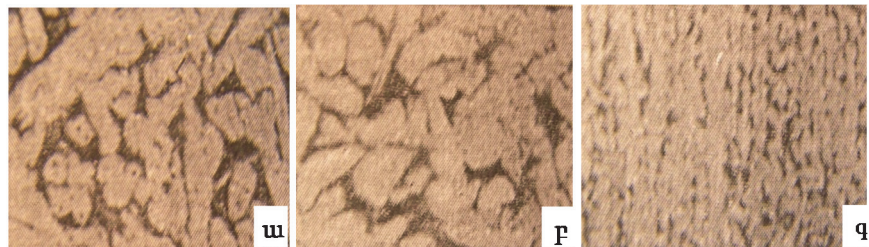
Նկ. 4. Տաք արտամղման ժամանակ արտամղվող մետաղի վրա ազդող ուժերի սխեման, դեֆորմացիաների էպյուրը և լարվածային վիճակի տեսակները՝ ա – գործընթացի իրականացում սովորական պայմաններում; բ – գործընթացի իրականացում մետաղի մակերևութային շերտում ամրային հատկությունների կտրուկ փոքրացման պայմաններում:
 P – մամլամատից մանվող մետաղի վրա ազդող լրիվ ճնշումը, $dT_{\alpha\alpha}$, $dT_{\alpha\beta}$, $dT_{\beta\alpha}$, $dT_{\beta\beta}$ – շփման տարրական ուժերի մեծությունները՝ համապատասխանաբար մամլամատի, կոնտեյնների կողային, մայրակի թեք և կալիբրող մակերևույթների վրա, $dN_{\alpha\alpha}$, $dN_{\alpha\beta}$, $dN_{\beta\alpha}$, $dN_{\beta\beta}$ – կոնտեյնների կողային, մայրակի թեք և կալիբրող մակերևույթների վրա նորմալի ուղղությամբ ազդող տարրական ուժերի մեծությունները, dN_{α} – տարրական ուժի լրիվ մեծությունը, որը հանդիսանում է $dN_{\alpha\alpha}$ և $dT_{\alpha\alpha}$ ուժերի գումարը; S_r , S_{θ} , S_{ϕ} – ընդերկայնական, շառավղային և շրջանային գլխավոր նորմալ լարումները մայրակի սեղմող տեղամասում, $\sigma_{\alpha\alpha}$ – մամլամատի մակերևույթի որևէ կետում նորմալ լարումը, 1, 2, 3 – տարբեր լարվածային վիճակում գտնվող գոտիները

Ներքին շերտերի գոտում (նկ. 4 ա, գոտի 1) լրացուցիչ սեղմող լարումները, վերադրվելով հիմնական սեղմող լարումների վրա, չեն փոխում մետաղի լարվածային վիճակը. այն մնում է նույնը, ինչ որ հիմնական տեսքը, այսինքն՝ բազմակողմանի անհավասարաչափ սեղմված:

Արտաքին շերտերի գոտում (նկ. 4 ա, գոտի 2 և 3) ձգման լրացուցիչ լարումները, վերադրվելով հիմնական սեղմող երկայնական լարումների վրա, փոքրացնում են դրանք, իսկ որոշ պայմանների դեպքում, գերազանցելով դրանց, փոխում են մետաղի լարվածային վիճակի տեսքը և բազմակողմանի անհավասարաչափ սեղմումը ձևափոխում երկկողմանի (լայնական) սեղմման և երկայնական ձգման: Տարանուն լարումներով գոտին (գոտի 3) գտնվում է պլաստիկ գոտու մամլման տեղամասի ելքի մոտ, որտեղ դեպի ելք ուղղությամբ հիմնական լարումները փոքրանում են, իսկ լրացուցիչները՝ աճում:

Գործընթացի այն պայմաններում, երբ արտաքին շերտի դեֆորմացման դիմադրությունները, համեմատած ներքինների հետ, շատ փոքր են, արտաքին շերտերը շարժվում են ավելի արագ, քան ներքին շերտերը: Արդյունքում առաջանում են լրացուցիչ լարումներ՝ ներքին շերտում ձգող, քանի որ յուրաքանչյուր արտաքին շերտ, շարժվելով արագ հարևան ներքին շերտի նկատմամբ, տանում է նրան իր հետևից, իսկ արտաքին շերտում՝ սեղմող, քանի որ յուրաքանչյուր ներքին շերտ, շարժվելով դանդաղ հարևան արտաքին շերտերի նկատմամբ, արգելակում է նրան: Այսպիսով, պլաստիկ գոտու մամլող մասում առաջանում են դեպի մակերևույթ փոքրացող լրացուցիչ երկայնական ձգող լարումներով ներքին շերտերի և դեպի առանցք փոքրացող լրացուցիչ սեղմող երկայնական լարումներով գոտիներ: Այդ լրացուցիչ լարումները, վերադրվելով հիմնականների վրա, առաջացնում են բազմակողմանի անհավասարաչափ սեղմմամբ արտաքին շերտերի գոտիներ (գոտի 1, նկ. 4 բ), բազմակողմանի անհավասարաչափ սեղմմամբ ներքին շերտերի գոտիներ (գոտի 2, նկ. 4 բ) և, հնարավոր է, լայնական սեղմմամբ և երկայնական ձգմամբ ներքին շերտերի գոտի (գոտի 3, նկ. 4 բ):

Տաք արտամղման ժամանակ համալձուլվածքների կառուցվածքային բնութագրերն են հատիկի չափը, ձևը և կառուցվածքային անհամասեռության աստիճանը: Մամլվածքի կառուցվածքը բնութագրվում է մեծ անհամասեռությամբ, որի հիմնական պատճառը դեֆորմացիայի անհամասեռությունն է: Կառուցվածքային անհամասեռության պատճառ են հանդիսանում նաև ջերմաստիճանային պայմանների փոփոխությունը, մամլման և դրանից հետո սառեցման ժամանակ մետաղում ընթացող կառուցվածքային փոփոխությունները [1, 10]: Ընդհանուր առմամբ, մամլվածքում անհամասեռությունն արտահայտվում է նրա լայնական և երկայնական հատույթներում հատիկի չափերի անհամաչափությամբ: Կախված դեֆորմացման վիճակից՝ մամլվածքում հատիկի չափը կենտրոնական շերտերից դեպի արտաքին մակերևույթ և առջևից հետին մաս փոքրանում է: Նկ. 5 և 6-ում պատկերված միկրոկառուցվածքներում հատիկի չափերի այդ տարբերությունները տեսանելի են:

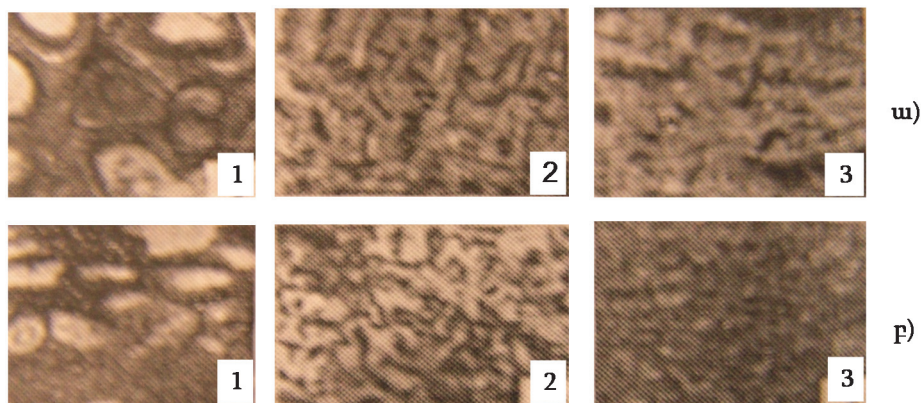


Նկ. 5. Դյուրալյումինային լարի ներքին շերտերի միկրոկառուցվածքը (x100).

ա – առջևի ծայր, բ – մեջտեղ, գ – հետևի ծայր

Հատիկի չափերի անհամաչափությունը մխումփց հետո էլ ավելի է զարգանում, քանի որ տաքացման ժամանակ մեծ դեֆորմացիաներով գոտիներում տեղի է ունենում ինտենսիվ վերաբյուրեղացում, որի հետևանքով առաջանում է խոշորահատիկ կառուցվածքով եզրաշերտ: Վերջինս աճում է մամլվածքի առջևից դեպի ետև: Այսպիսի եզրաշերտի առաջացումը և նրա հաստության փոփոխության բնույթը մեկ անգամ ևս ապացուցում են կառուցվածքային անհամասեռության փաստը [1, 11]:

Քսուքով մամլման դեպքում խոշորահատիկ եզրաշերտ կամ ընդհանրապես չի առաջանում, կամ ունենում է փոքր հաստություն [1]:

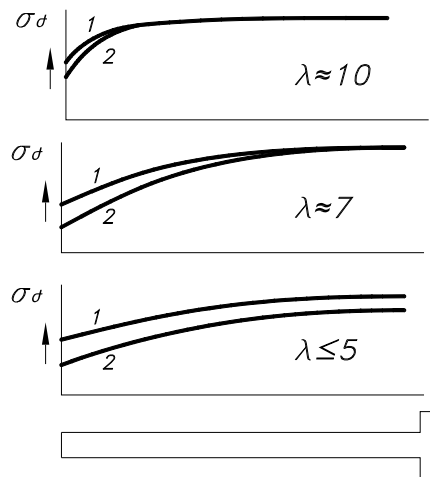


Նկ. 6. Առանց քսուքի մամլված դյուրալյումինային լարի տարբեր տեղամասերի միկրոկառուցվածքը ($\times 250$). ա – լարի մակերևույթ, բ – լարի կենտրոն.
1 – առջևի ծայր, 2 – մեջտեղի մաս, 3 – մամլամնացորդի մոտ

Մամլվածքի կառուցվածքը բնութագրող պայմանական հայտանիշ է հատիկի միջին չափը, որը կախված է մամլման պայմաններից: Դեֆորմացիայի մեծացմանը զուգընթաց հատիկի միջին չափը նվազում է, իսկ մամլման ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց՝ աճում:

Մամլվածքներում հաճախ դիտվում է առանցքին զուգահեռ արտահայտված շերտավորվածություն: Նման կառուցվածքի առկայության դեպքում խզված մամլվածքի լայնական կտրվածքն ունի աստիճանական մակերևույթ, որը վկայում է մամլվածքի առանցքին զուգահեռ մակերևույթների թուլացված մասերի առկայության մասին: Մամլվածքում առկա դեֆորմացման և կառուցվածքային անհամասեռությունն ազդում է նրա մեխանիկական հատկությունների վրա: Ուղիղ արտահոսքով մամլման դեպքում մամլվածքի ամրության սահմանն աճում է կենտրոնական շերտից դեպի մակերևույթ և առջևի ծայրից դեպի մամլամնացորդ: Որոշ դեպքերում նման կերպով, բայց հակառակ ուղղությամբ փոխվում է հարաբերական երկարացումը:

Արտամղման գործակցի ոչ մեծ արժեքների դեպքում մամլվածքի կենտրոնական և մակերևութային շերտերում մեխանիկական հատկությունների տարբերությունը մեծանում է: Արտամղման մեծ գործակիցների դեպքում այդ տարբերությունը կտրուկ նվազում է և հաճախ իսպառ վերանում: Դա պայմանավորված է մետաղների և համաձուլվածքների մեծ արտամղման գործակիցների դեպքում մեխանիկական հատկությունների անհամաչափության ինտենսիվության փոքրացմամբ: $\lambda=10$ և ավելի մեծ արժեքների դեպքում մամլվածքում մեխանիկական հատկությունները, բացառությամբ առջևի ծայրի ոչ մեծ տեղմասում, գործնականում հավասարվում են: Նկ. 7-ում բերված գրաֆիկում պատկերված է մամլվածքի կենտրոնական և ներքին շերտերում ամրության սահմանի փոփոխության և արտամղման գործակցի կապը [1]:



Նկ. 7. Մամլվածքի մակերևութային (1) և ներքին (2) շերտերում ամրության սահմանի փոփոխության կախվածությունը արտամղման գործակցից

Եզրակացություն: Տաք արտամղման գործընթացի հետազոտման արդյունքում բացահայտվել է, որ ներքին շերտերի գոտում լրացուցիչ սեղմող լարումները, վերադրվելով հիմնական սեղմող լարումների վրա, չեն փոխում մետաղի լարվածային վիճակը. այն մնում է նույնը, այսինքն՝ բոլոր կողմերից անհավասարաչափ սեղմված: Արտաքին շերտերի գոտում ձգման լրացուցիչ լարումները, վերադրվելով հիմնական սեղմող երկայնական լարումների վրա, փոքրացնում են դրանք, իսկ որոշ պայմանների դեպքում, գերազանցելով դրանց, փոխում են մետաղի լարվածային վիճակի տեսքը և բոլոր կողմերից անհավասարաչափ սեղմումը ձևափոխում երկկողմանի (ընդլայնական) սեղմման և երկայնական ձգման:

Ցույց է տրված, որ մամլվածքում առկա դեֆորմացման և կառուցվածքային անհամասեռությունն ազդում է դրա մեխանիկական հատկությունների վրա:

Ուղիղ արտահոսքով մամլման դեպքում մամլվածքի ամրության սահմանն աճում է կենտրոնական շերտերից դեպի մակերևույթ և առջևի ծայրից դեպի մամլամնացորդ: Արտամղման գործակցի ոչ մեծ արժեքների դեպքում մամլվածքի կենտրոնական և մակերևութային շերտերում մեխանիկական հատկությունների տարբերությունը մեծանում է, իսկ արտամղման մեծ գործակիցների դեպքում այդ տարբերությունը կտրուկ նվազում է և հաճախ իսպառ վերանում, որը պայմանավորված է մետաղներում և համաձուլվածքներում մեծ արտամղման գործակիցների դեպքում մեխանիկական հատկությունների անհամաչափության ինտենսիվության փոքրացմամբ:

Հետազոտությունները կատարվել են Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի «Նյութագիտություն և մետալուրգիա» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х.** Теория прессования металлов. - М.: Металлургия, 1975. – 467 с.
2. **Петросян Г.Л.** Пластическое деформирование порошковых материалов. -М.: Металлургия, 1988. – 153 с.
3. **Աղբալյան Ս.Գ., Ստեփանյան Ա.Մ.** Վոլֆրամմոլիբդենային արագահատ պողպատներ և դրանց ջերմամշակումը. Մենագրություն.- Երևան, 2006.- 123 էջ:
4. **Джонсон В., Кудо Х.** Механика процесса выдавливания металла / Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1965. – 174 с.
5. **Гун Г.Я., Полухин П.И., Полухин В.П., Прудовский Б.А.** Пластическое формоизменение металлов. - М.: Металлургия, 1965. – 174 с.
6. **Աղբալյան Ս.Գ., Ասլանյան Վ.Դ., Տոսյան Մ.Ե.** Исследование получения полых изделий экструзией // Композиционные материалы и их обработка. - Ереван, 1985.- С.33-38.
7. Горячая экструзия титановой губки / **В.А. Павлов, В.В. Щербина, В.П. Токарев и др.** // Порошковая металлургия.- 1974.- N 9.- С. 153-158.
8. **Дмитрович А.М.** Справочник литейщика.- Минск: Высшая школа, 1989.- 390 с.
9. **Աղբալյան Ս.Գ.** Теоретические и технологические основы формования структуры и свойств порошковых материалов при экструзии: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. –Ереван, 1992. – 33 с.
10. **Радомысельский И.Д., Шебран Н.И., Скальчук А.А.** О некоторых закономерностях экструзии из спеченных магниевых порошков // Порошковые конструкционные материалы.- Киев, 1980.- С. 85-87.
11. **Աղբալյան Ս.Գ., Ասլանյան Վ.Դ., Куроедов В.А.**Технология изготовления труб малого диаметра экструзией // Структура и свойства порошковых материалов. – Ереван, 1988. - С. 24-28.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 21.11.2023:

С.Г. АГБАЛЯН, В.А. БАГДАСАРЯН, Г.А. ВАСИЛЯН, С.А. АРУТЮНЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ЛИТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ГОРЯЧЕЙ
ЭКСТРАКЦИИ И ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ
СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ**

Исследовано напряженно-деформированное состояние литых алюминиевых сплавов при горячей экструзии и процесс формирования их структуры и свойств. Установлено, что в процессе экструзии окружные слои металла подвергаются не только осевой и поперечной деформации, но и деформации скольжения. Последняя растет от внутренних слоев к поверхности. Главные растягивающие напряжения и сумма касательных напряжений также возрастают. Показано, что направления главных растягивающих напряжений на выходе сжимающей части различны, они образуют определенный угол с осью сжатия, который также увеличивается по направлению к поверхности. В результате установлено, что основные радиальные и окружные деформации являются тормозными деформациями.

Ключевые слова: литье, алюминиевый сплав, горячее прессование, деформация скольжения, напряжение, матрица, давление.

**S.G. AGHBALYAN, V.A. BAGDASARYAN, G.A. VASILYAN,
S.A. HARUTYUNYAN**

**INVESTIGATING THE STRESS - STRAIN STATE OF ALUMINIUM
ALLOYS AT HOT EXTRUSION AND REGULARITIES OF STRUCTURE
AND PROPERTY FORMATION**

The stress strain state, as well as the process of formation of structure and features of aluminium alloys at hot extrusion are investigated. It has been shown that during hot extrusion, the ring layers of an extruded element experience not only longitudinal and transverse deformations but also a slip. The slip increases at passing from inner layers to the surface. The tensile principal stresses and the sum of slip deformations also increase. It has been also shown that at the exit of the pressing part, the tensile principal stresses have different directions, forming an angle with the extruder axis, which also increases towards the surface. As a conclusion, it has been stated that the main radial and circumferential deformations act as restraining deformations.

Keywords: casting, aluminium alloy, hot extrusion, slip, stress, matrix, pressure.

Ն.Վ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Դ.Ս. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Մ.Ա.Խ. ԱՐԱՂԻ, Տ.Վ. ՎԱՆԴՈՒՆՑ,
Ս.Գ. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ռ.Հ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ, Ա.Ս. ԵՐԵՄՅԱՆ

ՄԱՆԳԱՆԻ ՀԱՎԵԼՈՒՄՈՎ ԲԻՍՄՈՒԹ ՖԵՐՏԻ ՎԵՐԱՄԻԿԱԿԱՆ
ՆՍՈՒՇՆԵՐԻ ՍՏԱՑՈՒՄԸ ԵՎ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Մշակվել է մանգանի հավելումով բիսմութ ֆերիտի ինքնատարածվող բարձրջերմաստիճանային սինթեզման տեխնոլոգիա: Ռենտգենաֆազային վերլուծությամբ որոշվել են բովախառնուրդի պատրաստման և սինթեզման լավագույն պայմանները: Մշակվել են կերամիկական նմուշների ստացման և օհմական հպակների պատրաստման տեխնոլոգիական գործընթացները: Ուսումնասիրվել են դիէլեկտրիկ թափանցելիության և կորուստների անկյան տանգենսի հաճախությունից կախվածությունը ու վոլտ-ամպերային բնութագրերը:

Առանցքային բառեր. ֆերոէլեկտրիկ, մոլտիֆերոիկ, կերամիկա, ԻԲՄ, դիէլեկտրիկ թափանցելիություն, դիէլեկտրիկ կորուստներ:

Ներածություն: Պերովսկիտ ֆերոէլեկտրիկ և բազմաֆերոիկ նյութերը բնութագրվում են պարամետրերի հարուստ բազմազանությամբ, ինչպիսիք են՝ դիէլեկտրիկական, ակուստիկ/պիեզոէլեկտրական, ֆերոմագնիսական և այլն: Այս հատկությունները կարող են կարգավորվել արտաքին ազդակներով, ինչպիսիք են՝ էլեկտրական և/կամ մագնիսական դաշտը, ջերմաստիճանը կամ մեխանիկական լարվածությունը: Ֆերոէլեկտրիկ/մոլտիֆերոիկ նյութերի կիրառմամբ իրականացվում է ակուստիկական [1], օպտիկական [2], էլեկտրական/ԳԲՀ [3] համապիտանի ճկուն բաղադրիչների լայն բազմազանություն: Այնուամենայնիվ, մոլտիֆերոիկները լավագույնն են բազմաֆունկցիոնալության առումով: Դրանք համատեղում են ֆերոէլեկտրիկ, ֆերոմագնետիկ ու պիեզոէլեկտրիկ և այլ հատկությունները: Վերջիններս իրենց ֆերոէլեկտրական, ֆերոմագնիսական և ֆերոէլաստիկական հատկությունների շնորհիվ մեծ ուշադրության են արժանացել հետազոտական բազմաթիվ ոլորտներում, ինչպիսիք են, օրինակ, էներգաանկախ հիշող սարքերը, մագնիսական դաշտի սենսորները, ալեհավաքները, կարգաբերելի ինդուկտորներն ու գոյիչները, փուլի շրջող/շեղող սարքերը, և հնարավորություն են տալիս՝ նախագծելու նոր հատկություններով հեռանկարային սարքեր [4-12]:

BSTO և BFO-BTO կոմպոզիցիաների դիէլեկտրիկական հատկությունները հնարավոր է արագ/կտրուկ փոփոխել՝ շեղող լարման իմպուլս կիրառելով: Այս

նյութերն ունեն յուրահատուկ ներքին հատկություններ, որոնց շնորհիվ դրանք շատ գրավիչ են որպես արագագործ վենտիլներ և մեծ-հզորությամբ դեկավարվող կարգաբերիչներ՝ բարձր էներգիայով արագացուցչային տեխնիկայում կիրառությունների դեպքում:

Մուլտիֆերոէլեկտրիկները բնութագրվում են իրենց էլեկտրական և մագնիսական հատկությունների խիստ կապվածությամբ, որի միջոցով էլ հնարավոր է լինում սենյակային ջերմաստիճանի պայմաններում վերափոխել նյութի մագնիսական հատկությունները արտաքին էլեկտրական դաշտի միջոցով և հակառակը: Այս առանձնահատկությունը հայտնի է որպես մագնիսաէլեկտրական կապ (ME coupling) [6-9]: Այս նյութերն օժտված են նաև պիեզոէլեկտրական և պիրոէլեկտրական հատկություններով, և հետևաբար՝ նյութի հատկությունները կարելի է փոփոխել նաև ջերմաստիճանի և արտաքին մեխանիկական ազդեցությունների միջոցով:

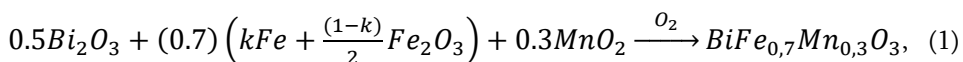
Գրականությունից հայտնի է, որ մագնիսաէլեկտրական կապն ավելի ուժեղ է կոմպոզիտային նյութերում, քան միաֆազ նյութերում: Ընդ որում, միաֆազ նյութերի մեծ մասում մագնիսաէլեկտրական կապը կա՛մ բավականին թույլ է, կա՛մ այն չի առաջանում: Միաֆազ մուլտիֆերոէլեկտրիկների շարքին է պատկանում բիսմութ ֆերիտը՝ BiFeO_3 (BFO), որը շեղանկյունանիստ բյուրեղային կառուցվածքով պերովսկիտ նյութ է և պատկանում է R3c խմբին [9]: Միաֆազ նյութերի համեմատությամբ BFO-ի առավելություններն են՝ բարձր Կյուրիի ջերմաստիճանը ($T_C=830^\circ\text{C}$), բարձր Նեելի ջերմաստիճանը ($T_N=367^\circ\text{C}$) և բարձր բևեռացումը ($P_r=90\ldots 100$ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$) [4, 6-9, 12]: Սակայն BFO նյութին բնորոշ են մի քանի թերություններ, որոնք ակնհայտորեն կարող են սահմանափակել դրանց կիրառությունը տարբեր ոլորտներում: BFO-ի թերություններից է համեմատաբար թույլ մագնիսաէլեկտրական կապը, քանի որ էլեկտրական և մագնիսական հատկություններ ապահովող իոնները տարբեր են, նյութի էլեկտրական հատկություններն ապահովում են Bi-ի իոնները, իսկ մագնիսական հատկությունները՝ Fe-ի իոնները: BFO նյութին բնորոշ թերություն է նաև կորստի մեծ հոսանքը՝ ցածր դիմադրությունը, քանի որ BFO-ի պատրաստման ընթացքում առաջանում են հավելյալ Fe^{2+} իոններ, հետևաբար՝ Bi-ի և O-ի վականախաներ: Ընդ որում, կորստի մեծ հոսանքի պատճառով մեծ դժվարություն է առաջանում՝ ստանալու այնպիսի BFO նյութ, որի բևեռացումը կլինի $90\ldots 100$ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ [6, 10]:

Վերը նկարագրված թերությունների պատճառով սովորաբար անհրաժեշտություն է առաջանում լավարկել BFO նյութի հատկությունները, որն իրականացնելու համար գոյություն ունեն մի քանի արդյունավետ մեթոդներ: Առաջին մեթոդի դեպքում իրականացվում է BFO նյութի իոնների մի մասի փոխարինում համապատասխան իոններով: Հայտնի է, որ այս դեպքում համար օգտագործվում

են սակավահողային իոններ (La^{3+} , Sm^{3+} , Nd^{3+} , Ho^{3+})՝ բիսմութի իոնների փոխարինման համար և անցումային մետաղների իոններ (Mn^{3+} , Ti^{4+} , Co^{3+} , Zr^{4+})՝ երկաթի իոնների փոխարինման համար: Երկրորդ մեթոդի դեպքում BFO նյութը խառնում են պերովսկիտների խմբին պատկանող մեկ այլ նյութի հետ, օրինակ՝ CaTiO_3 , PbTiO_3 , BaTiO_3 , LaFeO_3 : $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{BaTiO}_3$ պինդ խառնուրդը (BF-BT), Կյուրիի բարձր ջերմաստիճանի և նվազեցված կորստի հոսանքի հատկությունների շնորհիվ, հետազոտողների համար հանդիսանում է որպես հեռանկարային նյութ և կապար պարունակող նյութերի այլընտրանք [6, 8, 10, 12-14]: Գոյություն ունեն նաև կապար չպարունակող այլ նյութեր, որոնցից են, օրինակ՝ $(\text{Ba,Ca})\text{TiO}_3$ - $\text{Ba}(\text{Ti,Zr})\text{O}_3$ (BCZT), $(\text{Bi,Na})\text{TiO}_3$ (BNT), $(\text{K,Na})\text{NbO}_3$ (KNN):

Որպես լավագույն պիեզոէլեկտրական նյութ՝ նախկինում լայնորեն կիրառություն ուներ կապարի ցիրկոնիում տիտանատը ($\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ կամ PZT), սակայն քանի որ կապարը համարվում է թունավոր նյութ մարդկանց և շրջակա միջավայրի համար, այդ պատճառով էլ օրենսդրական սահմանափակումների միջոցով արգելվեց էլեկտրոնային սարքերում կապարի օգտագործումը սնդիկի, կադմիումի և վեցավալենտ քրոմի հետ միասին:

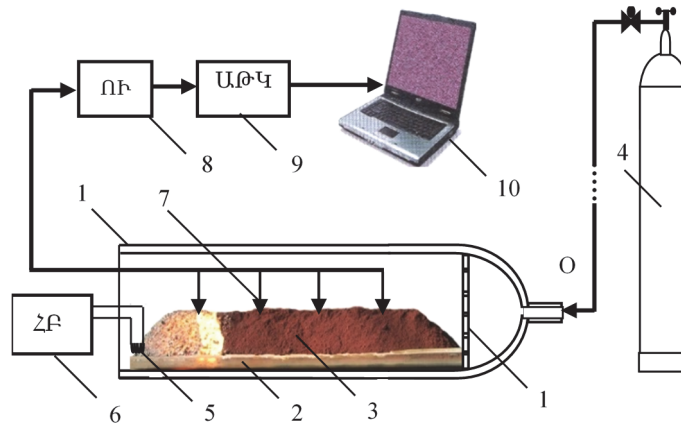
Փորձական մաս: ԻԲՄ տեխնոլոգիայով $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ փոշենյութի ստացման համար օգտագործվել են հետևյալ ելանյութերը. որպես վառելիք՝ Fe, իսկ որպես օքսիդիչ՝ թթվածին (O_2), բիսմութի օքսիդ՝ Bi_2O_3 (մաքրությունը > 99,975 %, մասնիկի չափը՝ 1...5 մկմ), երկաթի օքսիդ՝ Fe_2O_3 (մաքրությունը > 99,975 %, մասնիկի չափը՝ 1...5 մկմ), երկաթ՝ Fe (մաքրությունը > 99 %, մասնիկի չափը՝ 1...5 մկմ), մանգանի երկօքսիդ՝ MnO_2 (մաքրությունը > 99,9 %, մասնիկի չափը՝ 1...5 մկմ): Մինչև իրականացվել է հետևյալ քիմիական ռեակցիայով՝



որտեղ k-ն ռեակցիայի էկզոթերմիան կարգավորող գործակից է: ԻԲՄ տեխնոլոգիայով օքսիդային նյութի ստացման գործընթացի կազմակերպման, այրման պրոցեսների փորձարարական հետազոտությունների իրականացման համար պատրաստվել և օգտագործվել է պարբերական գործողությամբ լաբորատոր ռեակտոր (նկ. 1):

Լաբորատոր քվարցե խողովակի (1) մեջ տեղադրված է քվարցե պնակ (2), որի մեջ մամլված կամ ազատ վիճակում լցվում է ելանյութերի փոշեխառնուրդը (3): Խողովակի մի ծայրը բաց է, իսկ մյուս ծայրին ամրացված է շտուցեր՝ թթվածնի մատակարարման համար: Թթվածինը ռեակցիոն խցիկ է մղվում բալոնից (4)՝ զազի հոսքը կարգավորող սարքի միջոցով: Ելանյութերի փոշեխառնուրդի սկզբնականում տեղադրված է վոլֆրամից պատրաստված շիկացման պարույր (5), որի

շիկացման ժամանակ փոշեխառնուրդի սկզբնամասի մակերևութային շերտում տեղի է ունենում քիմիական ռեակցիա, և ձևավորվում է այրման ճակատ: Մկզբնավորված այրման ճակատը հաստատուն արագությամբ տարածվում է փոշեխառնուրդի երկայնքով, իսկ նրա անցնելուց հետո, խառնուրդի հովացմանը զուգընթաց, ձևավորվում է նպատակային օքսիդային փոշենյութը:

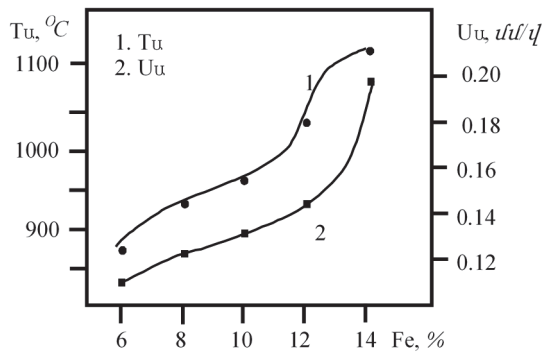


Նկ. 1. Լաբորատոր ԻԲՄ ռեակտորի սխեման. 1-քվարցե խողովակ, 2-քվարցե պնակ, 3-էլանյութերի փոշեխառնուրդ, 4-թթվածնի բալոն, 5-շիկացման պարույր, 6-հարուցման բլոկ, 7-թերմոդուգ, 8-ազդանշանի ուժեղարար, 9-անալոգ-թիվ կերպափոխիչ, 10-համակարգիչ, 11-քվարցե ցանց

Որքան մեծ լինի k գործակիցը, այնքան մեծ կլինի ելանյութերի խառնուրդում վառելիքի քանակությունը, որից էլ կախված է խառնուրդի այրման ջերմաստիճանն ու այրման ճակատի տարածման արագությունը: Փորձերն իրականացվել են տեխնոլոգիական տարբեր ռեժիմներում. պատրաստվել են ելանյութերի խառնուրդներ՝ օժտված տարբեր էկզոթերմիայով: Փորձնական արդյունքները ցույց են տվել, որ համակարգում ԻԲՄ սկզբնավորելու և պահպանելու համար անհրաժեշտ է k -ն վերցնել 0,32 և ավելի (6 % և ավելի երկաթի փոշի): Այդ արժեքից ցածր արժեքների դեպքում ԻԲՄ գործընթացը կամ չի սկզբնավորվում, կամ կարճ ժամանակ հետո այրման գործընթացը մարում է: Ինչպես երևում է նկ. 2-ից, ելանյութերի խառնուրդում վառելիքի՝ Fe-ի փոշու քանակության մեծացմանը զուգընթաց աճում է ինչպես այրման ջերմաստիճանը, այնպես էլ այրման ճակատի արագությունը:

k -ի 0,73 արժեքից (14% Fe-ի փոշի) սկսած՝ այրման ջերմաստիճանը և ճակատի տարածման արագությունը սկսում են կտրուկ աճել, ինչը պայմանավորված է հետևյալ հանգամանքով: Ինչպես հայտնի է, այրման գոտին տարածվում է վառվող տեղամասից դեպի բովախառնուրդի հարակից շերտը՝ ջերմության փոխանցման հաշվին, այսինքն՝ հարակից հում շերտը տաքանում է մինչև այրման

ջերմաստիճան ու բռնկվում, ընդ որում, փոխանցված ջերմության քանակը հիմնականում կախված է երկու գործոններից՝ համակարգի ջերմահաղորդականությունից և վառվող ու հարակից հում շերտերի միջև ջերմային գրադիենտից:



Նկ. 2. Այրման ջերմաստիճանի T_c և արագության U_c կախվածությունը վառելիքի քանակից $BiFe_{0.7}Mn_{0.3}O_3$ համակարգում

Ջերմահաղորդման աճը պայմանավորված է մետաղների, տվյալ դեպքում՝ երկաթի բարձր ջերմահաղորդականությամբ (մետաղների օքսիդներն ունեն ավելի ցածր ջերմահաղորդականություն): Իսկ ջերմային գրադիենտի մեծացումը պայմանավորված է k -ի մեծացմանը զուգընթաց այրման առավելագույն ջերմաստիճանի մեծացմամբ: Ահա այս հանգամանքով էլ, հավանաբար, պայմանավորված է այրման ջերմաստիճանի և ճակատի տարածման արագության կտրուկ աճը:

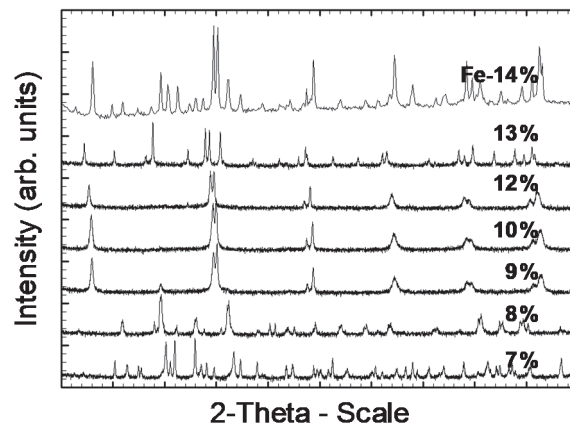
Այրման ճակատի տարածման արագությունը որոշվել է ժամանակից, որն անհրաժեշտ է նմուշում ջերմազույգերի միջև ճակատի տարածման համար: Տվյալների գրանցումը կատարվում է LabView ծրագրի միջոցով:

Նպատակային նյութերի սինթեզման ժամանակ, պայմաններից կախված, հիմնական կառուցվածքագոյացման ռեակցիաներն ամբողջությամբ տեղի չեն ունենում, և ստացված այրման արգասիքները, բացի նպատակային նյութից, պարունակում են նաև ելանյութերի որոշ քանակություն, ինչպես նաև այլ սինթեզված ֆազեր: $BiFeO_3$ փոշենյութի սինթեզման աստիճանի վրա այրման պարամետրերի և սինթեզման պայմանների ազդեցությունը պարզելու համար տեխնոլոգիական տարբեր ռեժիմներում սինթեզված նմուշները ենթարկվել են ռենտգենաֆազային անալիզի: Հետազոտությունները կատարվել են D8-advanced դիֆրակտաչափի միջոցով ստացված դիֆրակցիոն պատկերների՝ դիֆրակտագրերի հիման վրա: Ռենտգեն հետազոտությունները ցույց են տվել, որ ցանկալի ֆազով նպատակային նյութը սինթեզվում է, երբ բովախառնուրդի մեջ վառելիքի քանակը 9...12 % է:

Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ այրման ցածր ջերմաստիճանի (վառելիքի քիչ քանակության) դեպքում ԻԲՄ գործընթացն ավարտվում է Fe -ի

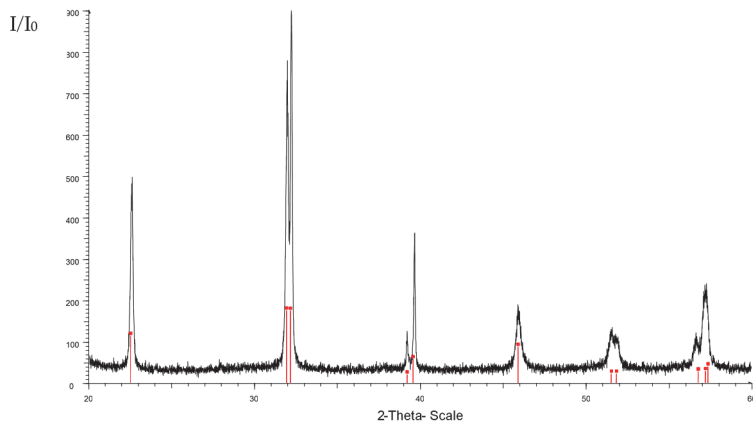
փոշու օքսիդացումով, և արդյունքում սինթեզված նյութի մեջ մնում են զգալի քանակությամբ ելանյութեր: Վառելիքի ավելացումը, որն ուղեկցվում է այրման ջերմաստիճանի աճով, նպաստում է BFO նյութի սինթեզմանը: Որքան շատ է վառելիքի քանակությունը ելանյութերի խառնուրդում, այնքան բարձր է նյութի սինթեզման աստիճանը:

ԻԲՄ տեխնոլոգիայով ստացված $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ փոշենյութի ռենտգենագրերը բերված են նկ. 3-ում և 4-ում: Կորերից կարելի է եզրակացնել, որ ֆազերի ինտենսիվությունների վրա հիմնականում ազդում են այրման ջերմաստիճանը և ճակատի տարածման արագությունը:



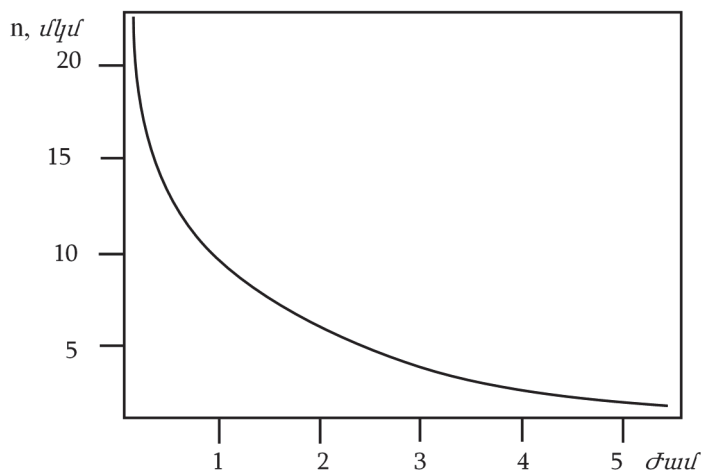
Նկ. 3. Ֆազի հարաբերական ինտենսիվությունը վառելիքի տարբեր քանակի դեպքում $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ համակարգում

Կերամիկական նմուշների նախապատրաստում (մանրացում, մամլում) և թրծում: Էլեկտրոնիկայում և էլեկտրատեխնիկայում օգտագործվող կերամիկական նյութերի հատկությունները կախված են նրանց միկրո և նանոկառուցվածքից: Կերամիկայի ծակոտկենությունը և հատիկների կառուցվածքային համասեռությունը ազդում է դրա հատկությունների վրա (դիէլեկտրիկ թափանցելիություն, մագնիսական թափանցելիություն, հիստերեզիսի կորի տեսք և այլն): Իր հերթին կերամիկական նյութերի միկրոկառուցվածքը կախված է դրանց եռակալման պայմաններից: Ինչպես հայտնի է, էլեկտրաֆիզիկական հատկությունների ձևավորման վրա զգալի ազդեցություն են թողնում այնպիսի գործոններ, ինչպիսիք են ելանյութերի ֆիզիկաքիմիական վիճակը, ելանյութի մանրացման աստիճանը, պատրաստման պայմանները և սկզբունքը: Իսկ թրծման ժամանակ զգալի ազդեցություն են թողնում թրծման ժամանակը, ջերմաստիճանը, տաքացման և հովացման ընթացքում ջերմաստիճանի փոփոխման արագությունը, գազային միջավայրը և այլն:



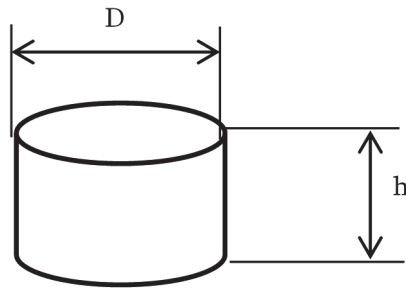
Նկ. 4. $BiFe_{0.7}Mn_{0.3}O_3$ փոշենյութի ռենտգենագիրը Fe-ի 12 %-ի դեպքում

ՌՖԱ հետազոտություններից հետո իրականացվել են մանրացման, մամլման և թրծման գործընթացներ: Որպես մանրացման մեթոդ՝ ընտրվել է մոլորակային մեթոդը, մանրացման արագությունը՝ 600 պտ/ր, պարկուճները/պահունակները լցվել են 70%-ով, մանրացնող գնդերի և նյութի հարաբերակցությունը համապատասխանաբար 4/3 է, մանրացնող հեղուկը՝ սպիրտը՝ նյութի 200%-ը: Մանրացումն իրականացվել է մինչև հատիկների 1...8 մկմ չափի ապահովումը (նկ. 5):



Նկ. 5. Մանրացման ժամանակային կորը

Կերամիկական նմուշներ պատրաստելու նպատակով մանրացված փոշենյութին որպես պլաստիկարար ավելացվել է 15...20% պոլիվինիլային սպիրտի 10%-ոց լուծույթ, որից հետո նյութերը մամլվել են զլանաձև՝ 16x5 մմ (Dxh) ձևաչափով (նկ. 6):

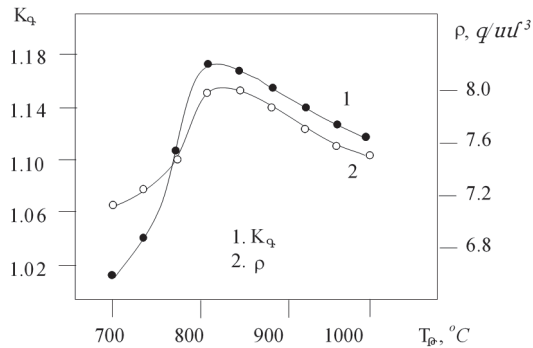


Նկ. 6. Մամլվածքի գլանաձև ձևաչափը

Նախքան թրծելը նմուշները հարկավոր է չորացնել, երբ նմուշից հեռանում են օրգանական նյութերը և ջուրը: Նշենք, որ մեծ ձևաչափով նմուշները բարձր ջերմաստիճանում և օդափոխիչ միջավայրում չի կարելի չորացնել: Նման դեպքերում նմուշի մակերևույթից օրգանական նյութերը և ջուրը հեռանում են ինտենսիվորեն, իսկ խորքերից նմուշի փոքր գազաթափանցելիության հետևանքով օրգանական նյութերը և ջուրը սակավ ինտենսիվությամբ են հեռանում: Այս երևույթի հետևանքով նմուշի խորքը, որտեղ խոնավությունը բարձր է, քիչ են կծկումները, իսկ մակերեսը, որտեղ խոնավությունը քիչ է, կծկումները զգալի են:

Անհավասար կծկումների հետևանքով նմուշի մակերևույթում առաջանում են ճաքեր և շերտավորումներ: Այս երևույթից խուսափելու համար նմուշները հարկավոր է չորացնել դանդաղ, ցածր ջերմաստիճաններում և երբեմն օդի բարձր հարաբերական խոնավության միջավայրում: Այս գործընթացը հարկավոր է ապահովել հատկապես 1-ին և 2-րդ փուլերում, երբ ջրի և օրգանական նյութերի հեռացումն ամենաինտենսիվն է: Մամլվածքի թրծման կինետիկայի հետազոտությունները ցույց են տվել, որ նմուշների լայնական կտրվածքով կծկումներն ավելի մեծ են, քան բարձրության ուղղությամբ: Այս անիզոտրոպիայի պատճառն այն է, որ սեղմումն իրականացվում է մի ուղղությամբ:

Այնուհետև մամլված նմուշները թրծվել են բարձր ջերմաստիճանային վառարանում (նկ.7): Թրծման սկզբնական փուլում գազաթափանցելիությունը որոշակիորեն մեծանում է, որը պայմանավորված է հատիկների միջև գլանաձև խողովակների առաջացմամբ: Այդ փոփոխում ազատ մակերեսը նվազում է:



Նկ. 7. Թրծման կորերը

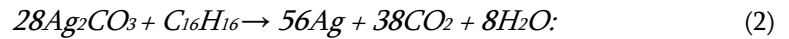
Թրծման հաջորդ փուլում կծկման հետևանքով խողովակների կտրվածքը կտրուկ փոքրանում է, միաժամանակ կտրուկ ընկնում է ազատ մակերևույթը: Նմուշների գազաթափանցելիության վերացումն ուղեկցվում է խոռոչների տարածական ցանցի քայքայումով, և առաջանում են մեկուսացված խոռոչներ: Այդ փուլին հաջորդում է թրծման եզրափակիչ փուլը: Ընդ որում, այս փուլում հարկավոր է ապահովել տաքացման շատ փոքր արագություն, որպեսզի թրծման գործընթացը կայանա միաժամանակ ամբողջ ծավալով, ինչպես նաև ստացվի հատիկների հավասարաչափ աճ: Մամլվածքները թրծվել են էլեկտրական վառարանում 700...850 °C ջերմաստիճանի պայմանում, 2 ժամ տևողությամբ: Հատկությունների ուսումնասիրման նպատակով նմուշի վրա նստեցվել են արծաթե կոնտակտներ: Նկ. 8-ում բերված են կերամիկական նմուշների նկարները:



Նկ. 8. Կերամիկական նմուշներ

Կերամիկական BFO նյութի էլեկտրաֆիզիկական հատկությունների ուսումնասիրման նպատակով թրծումից հետո ստացված նմուշները ենթարկվել են հղկման մինչև հաստության մոտավորապես 1 մմ արժեքը, որից հետո 800...850 °C ջերմաստիճանում նրանց վրա արծաթի մածուկի կիրառմամբ նստեցվել են օհմական կոնտակտներ: Արծաթեպատումն իրականացվել է դասական եղանակով: Արծաթի կարբոնատի (35...40 %) և պլաստիկարարի (65...60 %) խառնուրդը բարակ վրձնի միջոցով նստեցվել է նմուշների մակերեսին, որոնք նախապես մաքրվել և յուղազերծվել

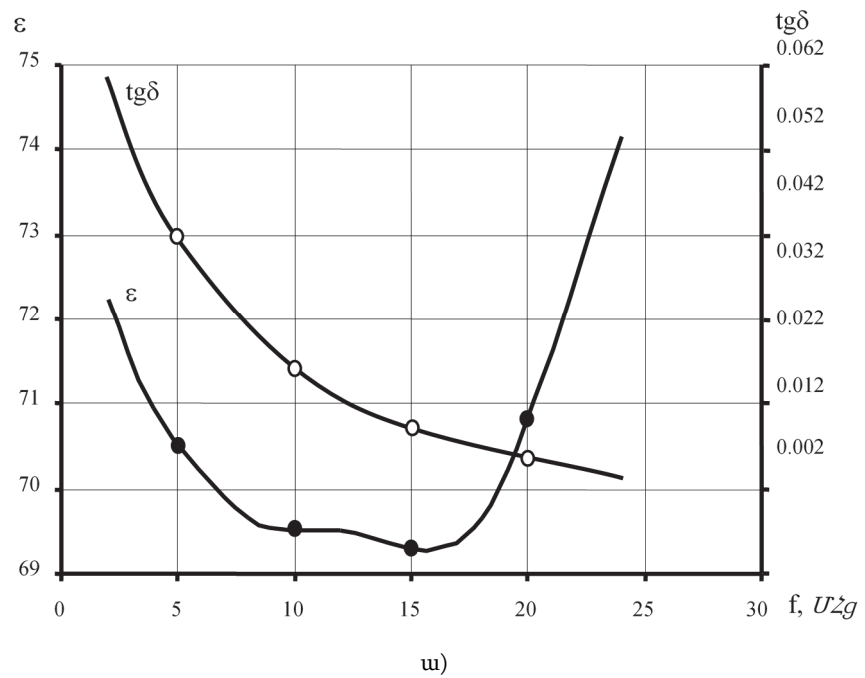
են: Թրծման առաջին փուլում ($200\dots400^{\circ}\text{C}$) այրվում է պլաստիկարարը, իսկ 2-րդ փուլում ($450\dots850^{\circ}\text{C}$) արծաթի կարբոնատը վերականգնվում է՝ վերածվելով մետաղական արծաթի: Արծաթի վերականգնումը կարելի է ներկայացնել հետևյալ քիմիական ռեակցիայով.

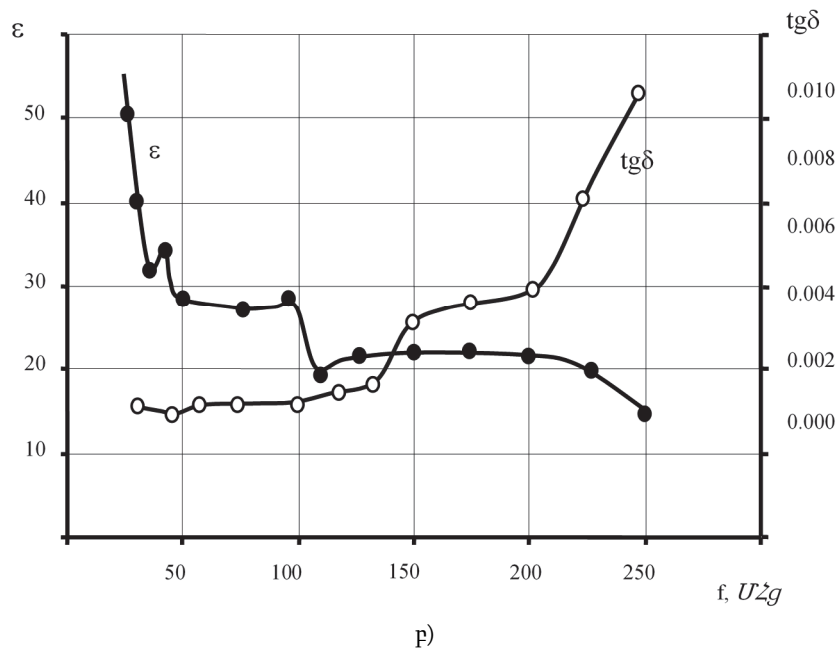


Արծաթե էլեկտրոդների հաստությունը թրծումից հետո կազմել է $30\dots40$ մկմ:

Կերամիկական նմուշների դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը (ε) և կորուստների անկյան տանգենսը ($\text{tg}\delta$) որոշվել են՝ էլնելով ունակության և բարորակության արժեքներից:

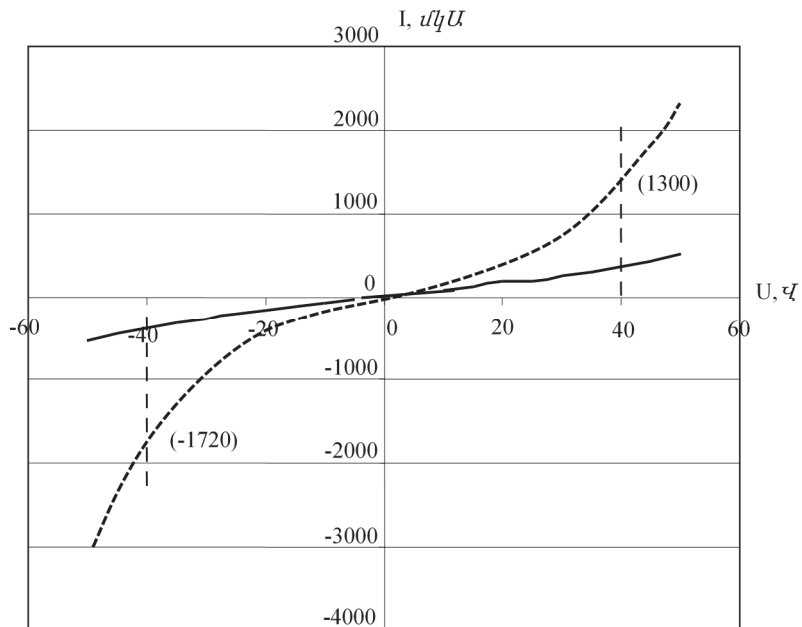
Էլեկտրական հատկությունների նկարագրությունը: Դիէլեկտրիկ թափանցելիության (ε) և կորուստների անկյան տանգենսի ($\text{tg}\delta$) չափումները կատարվել են TESLA BM560 սարքավորման միջոցով, ստացված արդյունքները բերված են նկ. 9-ում:





Նկ. 9. BiFeO_3 կերամիկական նմուշի դիէլեկտրիկ թափանցելիության (ϵ) և կորուստների անկյան տանգենսի ($\text{tg}\delta$) կախվածությունը հաճախությունից.
 ω – հաճախությունը մինչև 30 ՄՀg, p – հաճախությունը 25-ից մինչև 250 ՄՀg

Նմուշները տաքացվել են մինչև 200°C և պահվել մոտավորապես մեկ ժամ, այնուհետև կիրառվել է հաստատուն լարում, և նմուշները աստիճանաբար սառեցվել են, որից հետո ստացվել են դրանց ՎԱԲ-երը: Ինչպես երևում է ՎԱԲ-երից, նմուշներին կիրառված լարման բևեռականությունը փոխելիս նմուշները ցուցաբերում են տարբեր դիմադրություններ, ինչը խոսում է p և n տիպի լիցքակիրների տարածական վերաբաշխման մասին: Այսինքն՝ կարելի է ենթադրել, որ այս ճանապարհով հնարավոր է ստանալ կերամիկական p -ո անցում: Նմուշների ՎԱԲ-երը 0...50 Վ լարում միջակայքում մինչև տաքացնելը և տաքացնելուց հետո բերված են նկ. 10-ում:



Նկ. 10. ՎԱԲ-երը մինչև ջերմամշակումը (հոծ գիծ), ջերմամշակումից հետո (կետ-գիծ)

Եզրակացություն. Փորձերի արդյունքում պարզվել է, որ ելանյութերի բոցախառնուրդում/համակարգում ԻԲՄ սկզբնավորելու և պահպանելու համար անհրաժեշտ է k -ն վերցնել 0,32 (6% և ավելի երկաթի փոշի): Այդ արժեքից ցածր արժեքների դեպքում ԻԲՄ գործընթացը կամ չի սկզբնավորվում, կամ կարճ ժամանակ հետո այրման գործընթացը մարում է:

k -ի 0,73 արժեքից (14% և ավելի երկաթի փոշի) սկսած՝ այրման ջերմաստիճանը և ճակատի տարածման արագությունը սկսում են կտրուկ աճել՝ բովախառնուրդում ջերմահաղորդականության և վառվող ու հարակից հում շերտերի միջև ջերմային գրադիենտի աճով պայմանավորված:

Սինթեզված արգասիքների ռենտգենաֆազային վերլուծությամբ պարզվել է, որ ելանյութերի և միջանկյալ ֆազերի փոքր քանակությամբ ցանկալի ֆազով նպատակային նյութը սինթեզվում է, երբ բովախառնուրդի մեջ վառելիքի քանակը 9...12% է:

ՎԱԲ-երից երևում է, որ էլեկտրական դաշտում ջերմամշակած նմուշներին կիրառված լարման բևեռականությունը փոխելիս նմուշները ցուցաբերում են տարբեր դիմադրություններ, ինչը խոսում է p և n տիպի լիցքակիրների տարածական վերաբաշխման մասին:

Կերամիկական նմուշի դիէլեկտրիկ թափանցելիության (ε) և կորուստների անկյան տանգենսի ($\tan\delta$) հաճախությունից կախվածության ուսումնասիրությունը

ցույց է տալիս, որ հաճախության մինչև 250 ՄՀց միջակայքում ԻԲՄ-ով սինթեզված այս նյութերը համատեղելի են ինտեգրալ մեծ սխեմաների արտադրության հետ:

Աշխատանքն իրականացվել է ՀՀ ԿԳՄՄՆ բարձրագույն կրթության և գիտության կոմիտեի աջակցությամբ՝ «Միկրո- և նանո-էլեկտրոնիկա» (ՀԱՊՀ) և «Նորագույն նյութերի և միկրոսարքերի» (ՔԵՆԴԼ) բազային գիտահետազոտական լաբորատորիաներում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Dielectric phenomena of multiferroic oxides at acoustic- and radio-frequency / **J. Yang, W. Bai, Y. Zhang, C.G. Duan, J. Chu, X. Tang** // J Phys Condens Matter.- 2023, Aug.- 23;35(46). doi: 10.1088/1361-648X/acecf0
2. Magnetoelectric coupling in multiferroics probed by optical second harmonic generation / **S. Xu, J. Wang, P. Chen, K. Jin, C. Ma, S. Wu, & et al** // Nature Communications.- 2023.- Vol. 14, article number: 2274.
3. Electrical, magnetic and microwave absorption properties of multiferroic NiFe_2O_4 - BaTiO_3 nanocomposites / **D.S. Lam, N.N. Tung, D.D. Dung, B.X. Khuyen, & et al** // Materials Research Express.- 2022.-Vol. 9, Nr. 7. DOI 10.1088/2053-1591/ac7fe1
4. Multiferroic properties of BiFeO_3 - BaTiO_3 based ceramics / **T. Futakuchi, T. Kakuda and Y. Sakai** // Journal of the Ceramic Society of Japan.- 2014.- Vol. 122, issue 1426.- P.- 464-468. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.122.464>.
5. Properties of BiFeO_3 – BaTiO_3 ceramics in the morphotropic phase boundary: a role of crystal structure and structural parameters / **D.V. Karpinsky, M.V. Silibin, D.V. Zhiludkevich, S.I. Latushka, & et al** // Magnetic Journal of Magnetism and Magnetic Materials.- 2021.-Vol. 539, article 168409. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168409>.
6. Enhanced dielectric and multiferroic properties in BaTiO_3 doped $\text{Bi}_{0.85}\text{Nd}_{0.15}\text{Fe}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{O}_3$ ceramics / **H. Zhao, R. Yang, Y. Li, G. Liu, & et al** // Journal of Magnetism and Magnetic Materials.- 2020.-Vol. 494, article 165779. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165779>.
7. Ferroelectrically tunable magnetism in $\text{BiFeO}_3/\text{BaTiO}_3$ heterostructure revealed by the first-principles calculations / **W. Wang, W. Sun, G. Zhang, F. Ren, & et al** // Journal of Advanced Research.-2020.-Vol. 24.- P. 371-377. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.04.012>.
8. Enhanced ferroelectric, magnetic and magnetoelectric properties of multiferroic BiFeO_3 - BaTiO_3 - LaFeO_3 ceramics / **M. Zhang, X. Zhang, X. Qi, H. Zhu, & et al** // Ceramics International.-2018.-Vol. 44, issue 17.-P. 21269-21276. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.175>.
9. Ramírez, Control of Multiferroic properties in BiFeO_3 nanoparticles / **D. Carranza-Celis, A. Cardona-Rodríguez, J. Narváez, O. Moscoso-Londono, & et al** // Scientific Reports.-2019.- Vol. 9.-article 3182. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39517-3>.

10. The Multiferroic Properties of $\text{BiFeO}_3\text{--Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ Solid Solution Ceramics / **Z. Xu, L. Luo, M. He, K. Shen, & et al** // IEEE Transactions On Magnetism.- 2015.- Vol. 51, issue 11. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2438954>.
11. Enhanced Electric and Magnetic Properties of the Epitaxial $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})\text{TiO}_3/\text{BiFeO}_3$ Multiferroic Heterostructure / **Y. Chen, J. Miao, X. Zhang, F. Weng, & et al** // IEEE Transactions on Magnetism.- 2012.-Vol. 48, issue 11. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2200459>.
12. Ferroelectric and Magnetic Properties of Multiferroic BiFeO_3 -Based Composite Films / **H. Naganuma, T. Okubo, K. Kamishima, K. Kakizaki, & et al** // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.- 2008.- Vol. 55, issue 5. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2008.755>.
13. Pure perovskite $\text{BiFeO}_3\text{--BaTiO}_3$ ceramics prepared by reaction flash sintering of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3\text{--BaTiO}_3$ mixed powders / **A. Taibi, S. Chaguetmi, P.-E. Sanchez-Jimenez, A. Perejon, & et al** // Ceramics International.- 2021.- Vol. 47, issue 19.- P. 26947-26954. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.108>.
14. Synthesis and Characterization of $0.7\text{BiFeO}_3\text{--}0.3\text{BaTiO}_3$ Crystallites by the Hydrothermal Method / **T. Tong, J.G. Chen, J. Jian, D.R. Jin and J.R. Cheng** // IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF).- 2014. <https://doi.org/10.1109/ISAF.2014.6923014>.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 04.12.2023:

**Н.В. МАРТИРОСЯН, Д.С. МАРТИРОСЯН, М.А.Х. АРАГИ,
Т.В. ВАНДУНЦ, С.Г. АЙРАПЕТЯН, Р.А. КАЗАРЯН, А.С. ЕРЕМЯН
ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ФЕРРИТА ВИСМУТА,
ЛЕГИРОВАННОГО МАРГАНЦЕМ, И ИЗУЧЕНИЕ ИХ СВОЙСТВ**

Разработана технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза феррита висмута, легированного марганцем. Методом рентгенофазового анализа определены наилучшие условия для приготовления смеси исходных компонентов и синтеза. Разработаны технологические процессы получения керамических образцов и подготовки омических контактов. Исследованы частотные зависимости диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь и вольт-амперной характеристики.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, мультиферроик, керамика, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери.

**N.W. MARTIROSYAN, D.S. MARTIROSYAN, M.A.KH. ARAGHI,
T.V. VANDUNTS, S.G. HAYRAPETYAN, R.H. GHAZARYAN,
A.S. YEREMYAN**

**OBTAINING MANGANESE - DOPED BISMUTH FERRITE CERAMIC
SAMPLES AND STUDYING THEIR PROPERTIES**

A self-propagating high-temperature synthesis technology of manganese - doped bismuth ferrite has been developed. The best conditions for the preparation of the initial components mixture and synthesis are determined by X-ray phase analysis. The technological processes of obtaining ceramic samples and preparing ohmic contacts have been developed. Frequency dependence of dielectric permeability and loss angle tangent and volt-ampere characteristics are studied.

Keywords: ferroelectric, multiferroic, ceramics, self-propagating high-temperature synthesis, dielectric permeability, dielectric losses.

Ա.Մ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Դ.Գ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Ն.Ա. ՆԻԿՈՅԱՆ

**ԲԱԶՄԱՄԵՏԱՂ-ՍՈՒԼՖԻԴԱՅԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹԻՑ ՊԻՐՈ-
ՀԻԴՐՈՄԵՏԱԼՈՒՐԳԻԱԿԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ՊՂՆՁԻ, ՑԻՆԿԻ ԵՎ ԿԱՊԱՐԻ
ԿՈՐԶՈՒՄԸ**

Հետազոտված է Կապանի հանքահարստացնող ֆաբրիկայում արտադրված բազմամետաղ-սուլֆիդային խտանյութից պիրո-հիդրոմետալուրգիական եղանակով պղնձի, ցինկի և կապարի կորզման գործընթացը: Բազմամետաղ-սուլֆիդային խտանյութի վերամշակման համար ընտրվել է «խտանյութի սուլֆատացնող բովում – սուլֆատացված բովվածքի թույլ ծծմբաթթվային տարրալուծում» եղանակը: Ցույց է տրված, որ սուլֆատացված բովվածքի թույլ ծծմբաթթվային տարրալուծման լուծույթից պղինձը ընտրողական ձևով կորզվում է երկաթով ցեմենտացման եղանակով: Կապարը կորզվում է սոդախցուկի տարրալուծման լուծույթից երկաթի ցեմենտացման միջոցով: Երկաթ-ցինկային լուծույթից նատրիումի հիդրոօքսիդի առկայությամբ հիդրոլիզով երկաթի հիդրօքսիդն առանձնացվում է մայրակ-լուծույթից: Մաքրված ցինկ-սուլֆատային լուծույթից ցինկի կորզման համար երաշխավորվում է չլուծվող կապարային անոդներով էլեկտրակորզման եղանակը:

Առանցքային բառեր. Բազմամետաղ-սուլֆիդային խտանյութ, բովում, բովվածք, տարրալուծում, ցեմենտացում, հիդրոլիզ, էլեկտրակորզում:

Ներածություն: Հանքապետության ընդերքը հարուստ է բազմաթիվ մետաղական հանքանյութերով: Դրանց մեջ առանձնահատուկ տեղ են զբաղեցնում բազմամետաղային հանքանյութերը, որոնցում միաժամանակ կարող են պարունակվել տարբեր մետաղական միացություններ: Այդպիսի հանքանյութերի շարքն են դասվում Շահումյանի հանքավայրում [1, 2] արդյունահանվող հանքանյութերը, որոնք իրենց բնույթով բազմամետաղ-սուլֆիդային են: Հանքանյութերի հանքահարստացման գործընթացում ստացվում է բազմամետաղ-սուլֆիդային խտանյութ, որի հիմնական բաղադրիչը պղինձն է: Բացի պղնձից, խտանյութերում առկա են նաև զգալի քանակությամբ ցինկ և կապար, որոնք խտանյութերի իրացման ժամանակ գործնականում պարզապես կամ անտեսվում են, կամ էլ դրանք չեն կորզվում պղնձի ստացման պիրոմետալուրգիական գործընթացներում: Դրա հիմնական պատճառը նմանատիպ խտանյութերի համալիր վերամշակման տեխնոլոգիաների բացակայությունն է:

Հետազոտության նպատակն է Կապանի հանքահարստացնող ֆաբրիկայում արտադրվող բազմամետաղ-սուլֆիդային խտանյութի ցածրջերմաստիճանային

բովմամբ ստացվող սուլֆատային բովվածքի տարրալուծման սուլֆատ-թթվային լուծույթից ընտրողական ձևով կորզել ցինկը և կապարը:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Հետազոտվող բազմամետաղ-սուլֆիդային խտանյութից պիրո-հիդրոմետալուրգիական եղանակով պղնձի, ցինկի և կապարի կորզման մեթոդիկայի հիմքում դրված է «բազմամետաղ-սուլֆիդային խտանյութի սուլֆատացնող բովում – սուլֆատացված բովվածքի թույլ ծծմբաթթվային տարրալուծում» սկզբունքը, որը հնարավորություն է տալիս ապահովել խտանյութում առկա պղնձի, ցինկի, կապարի ու երկաթի կորզումը, ինչպես նաև ապահովում է շրջակա միջավայրի պահպանումը բովման ընթացքում գոյացող քիչ քանակությամբ արտանետվող ծծմբային գազերից:

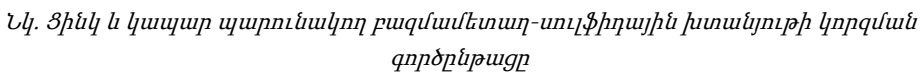
Բազմամետաղ-սուլֆիդային խտանյութի ցածրջերմաստիճանային բովմամբ ստացված բովվածքի ու միջանկյալ պինդ արգասիքների ֆազային բաղադրությունները հետազոտվել են ռենտգենակառուցվածքային վերլուծության եղանակով: Մետաղական խոնների կոնցենտրացիաները լուծույթներում չափվել են ատոմա-աբսորբցիոն սպեկտրասկոպիայի մեթոդով: Հիմնական և օժանդակ բաղադրիչների պարունակությունները պինդ արգասիքներում որոշվել են քիմիական և էմիսիոն-սպեկտրալ վերլուծության եղանակներով:

Հետազոտության արդյունքները: Ցինկ և կապար պարունակող բազմամետաղ-սուլֆիդային խտանյութի վերամշակման տեխնոլոգիական սխեմայով (նկ.) բազմամետաղ-սուլֆիդային խտանյութը ենթարկվում է ցածրջերմաստիճանային սուլֆատացնող բովման, որից ստացված սուլֆատացված բովվածքը թույլ ծծմբաթթվային լուծույթում տարրալուծման է ենթարկվում: Բովվածքի թույլ ծծմբաթթվային տարրալուծման ու դրա սորախցուկից կապարի ցեմենտացման և տարրալուծման միջոցով սուլֆատ-թթվային լուծույթից համապատասխան մեթոդներով կատարվում են պղնձի, երկաթի ու ցինկի կորզման գործընթացները:

Հետազոտվող բազմամետաղ-սուլֆիդային խտանյութի (54,8% CuFeS_2 , 25,1% FeS_2 , 6,3% ZnS , 5,2% PbS , 4,6% SiO_2 , 2,5% Al_2O_3 , 0,8% CaO , 0,7% MgO , 8,7 q/in Au և 98,2 q/in Ag) սուլֆատացնող բովման գործընթացի հետազոտության արդյունքներով որպես բազմամետաղ-սուլֆիդային խտանյութի սուլֆատացնող բովման օպտիմալ ջերմաստիճան է ընտրվել 570°C -ը: Այդ ջերմաստիճանում 60 $րոպե$ տևողությամբ, անընդհատ խառնման պայմաններում, սուլֆատացնող բովման արդյունքում ստացված բովվածքն իր բաղադրության բնույթով սուլֆատային է (CuSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, FeSO_4 , ZnSO_4 , PbSO_4):

Սուլֆատացված բովվածքի 2%-անոց ծծմբաթթվային տարրալուծման լուծույթում պղինձը, երկաթը և ցինկն առկա են իրենց սուլֆատների տեսքով (CuSO_4 , FeSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, ZnSO_4):

ներքոյ:



Կորզման համար:

տում» մեթոդի կիրառումը քիչ արդյունավետ է, մինչդեռ «ցեմենտացում» մեթոդի

կիրառմամբ երկաթի տաշեղներով պղնձի ցեմենտացման գործակիցը հասնում է 99,5 %, ինչը լիովին ընդունելի ցուցանիշ է: Էմիսիոն-սպեկտրային վերլուծության տվյալներով (աղ. 2) ստացված պղնձափոշին համապատասխանում է ստանդարտ նմուշներին [5]:

Աղյուսակ 1

Տարրալուծման մայրակ-լուծույթի իոնային բաղադրությունը

Իոնների կոնցենտրացիաները սուլֆատացված բովվածքի տարրալուծման լուծույթում (գ/լ)				
Cu ²⁺	Zn ²⁺	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Pb ²⁺
18,89	4,18	20,96	0,97	Չի հայտնաբ.*

* Ելանյութ-խտանյութի երրորդ (ըստ արժեքի) բաղադրիչը՝ կապարը, նախապես կորզվել է բովվածքի թթվային տարրալուծման ստրախցուկից:

Աղյուսակ 2

Ստացված պղնձափոշու էմիսիոն-սպեկտրային վերլուծության արդյունքները

Պղնձափոշու տեսակը	Cu ընդ., %	Խառնուրդների պարունակությունը, %						
		Sb	As	Fe	Pb	S	O	Zn
Փորձարարական	99,5	-	0,001	0,064	0,05	0,02 (SO ₄ ²⁻)	0,48	հետքեր
PMC-H ГОСТ 4960-75	99,5	0,005	0,003	0,060	0,05	0,01 (SO ₄ ²⁻)	0,50	-

Երկաթ-ցինկային լուծույթից երկաթի հիդրոլիզի արդյունքում ստացված երկաթի հիդրօքսիդը ուղղվում է դեպի երկաթի կորզում, իսկ խառնուրդներից մաքրված լուծույթից (հիմնականում ZnSO₄, ինչպես նաև H₂SO₄ և Na₂SO₄) ցինկի էլեկտրակորզումն իրականացվել է չլուծվող Pb-0,8% Ag անոդներով և ալյումինե կաթոդային հիմքերով էլեկտրոլիզային վաննայում (էլեկտրոլիտի ջերմաստիճանը՝ 40...420C, հոսանքի խտությունը՝ 550...600 Ա/մ², վաննայի լարումը՝ 3,2...3,3 Վ, ան-ընդհատ խառնում):

Վերլուծության արդյունքները (աղ. 3) ցույց են տալիս, որ ստացված էլեկտրոլիզային ցինկն իր մաքրությամբ համապատասխանում է IԳ0 մականիշի բարձրորակ ցինկին՝ ըստ ԳՕՍՏ 3640-94-ի [6]:

Աղյուսակ 3

Ցինկի կաթոդների էմիսիոն-սպեկտրային վերլուծության արդյունքները

Էլեկտրոլիզային ցինկի տեսակը	Zn, ընդ., %	Խառնուրդների պարունակությունը, %						
		Pb	Fe	Cu	Cd	Sn	As	Al
Ստացված ցինկի կաթոդները	99,975	0,011	0,007	0,001	0,001	0,001	0,0002	0,003
Ցինկ IԳ0 ГОСТ 3640-94	99,975	0,013	0,005	0,004	0,004	0,001	0,0005	0,005

Եզրակացություն: Պիրո-հիդրոմետալուրգիական եղանակով բազմամետաղ-սուլֆիդային խտանյութից ստացված սուլֆատացված բովվածքի տարրալուծման լուծույթից պղինձը ընտրողական ձևով արդյունավետ է կորզել երկաթով ցեմենտացման եղանակով: Ստացված պղնձափոշին իր մաքրությամբ համապատասխանում է ստանդարտ մակնիշներին՝ ըստ ԳՕՍՏ 4960-75-ի: Կապարը արդյունավետ է կորզել սորախցուկի տարրալուծման լուծույթից երկաթի ցեմենտացման միջոցով: Երկաթ-ցինկային լուծույթից նատրիումի հիդրոօքսիդի առկայությամբ հիդրոլիզով երկաթի հիդրօքսիդն առանձնացվում է մայրակ-լուծույթից: Մաքրված ցինկ-սուլֆատային լուծույթից ցինկի կորզման համար երաշխավորվում է չլուծվող կապարային անոդներով էլեկտրակորզման եղանակը: Էլեկտրակորզված մաքուր ցինկն իր մաքրությամբ չի զիջում ՍՏՍ ստանդարտ նմուշին՝ ըստ ԳՕՍՏ 3640-94-ի:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Ավագյան Հ.Ս.** Հայաստանի հանքահումքային ռեսուրսները. - Երևան: ՀՀ ԳԱԱ Գիտություն հրատարակչություն, 2004. - 432 էջ:
2. Минералы рудных формаций Армянской ССР / **И.Г. Магакян, Ш.О. Амирян, Р.Н. Зарьян и др.** - Т.1.- Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1984.- 306 с.
3. **Mark E. Schlesinger, Matthew J. King, Kathryn C. Sole, William G. Davenport.** Extractive Metallurgy of Copper.- Fifth Edition.- Elsevier Ltd, 2011.- 456 p.
4. **Смирнов И.И.** Физико-химические основы и технология получения порошков тяжелых цветных металлов.- Красноярск: Изд-во Красноярск. ун-та, 1984.-128 с.
5. **ГОСТ– 4960-75.** Порошок медный. Техн. условия.- М.: ИПК, Изд-во стандартов, 1998.-12 с.
6. **ГОСТ 3640-94.** Цинк. Марки.- М.: ИПК, Изд – во стандартов, 1994.- 6 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 21.11.2023:

А.М. ОГАНЕСЯН, Д.Г. ВАРДАНЯН, Н.А. НИКОЯН

ПИРОГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ СПОСОБ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕДИ, СВИНЦА И ЦИНКА ИЗ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СУЛЬФИДНОГО КОНЦЕНТРАТА

Исследован пирогидрометаллургический способ извлечения меди, цинка и свинца из полиметаллического сульфидного концентрата, получаемого на Капанской обогатительной фабрике. Для переработки полиметаллического сульфидного концентрата был выбран метод “сульфатированный обжиг концентрата - слабое серноокислотно-выщелачивание сульфатированного огарка”. Показано, что медь можно селективно извлечь из раствора выщелачивания сульфатированного огарка путем цементации железа,

свинец извлекают из раствора выщелачивания путем цементации железа, гидроксид железа отделяют от маточного раствора гидролизом из железо-цинкового раствора в присутствии гидроксида натрия. Для извлечения цинка из очищенного раствора сернокислого цинка обоснован метод электровосстановления с невыщелачивающимися свинцовыми анодами.

Ключевые слова: полиметаллический сульфидный концентрат, обжиг, огарок, выщелачивание, цементация, гидролиз, электроизвлечение.

A.M. HOVHANNISYAN, D.G. VARDANYAN, N.A. NIKOYAN

**THE EXTRACTION OF COPPER, LEAD, AND ZINC FROM
POLYMETALLIC SULFIDE CONCENTRATE BY THE PYRO-
HYDROMETALLURGICAL METHOD**

The process of pyro-hydrometallurgical extraction of copper, zinc and lead from polymetallic sulfide concentrate obtained at the Kapan enrichment plant has been studied. For processing polymetallic sulfide concentrate, the method of «sulfated roasting of the concentrate - weak sulfuric acid leaching of sulfated cinder» has been chosen. It is shown that copper can be selectively extracted from the leaching solution of sulfated cinder by cementation of iron. Lead is recovered from the leach solution by cementation of the iron. Iron hydroxide is separated from the mother liquor by hydrolysis from an iron-zinc solution in the presence of sodium hydroxide. To extract zinc from a purified solution of zinc sulfate, the method of electroreduction with non-leaching lead anodes has been justified.

Keywords: sulfide polymetallic concentrate, roasting, roasted concentrate, leaching, cementation, hydrolysis, electro - winning.

Տ.Ա. ԴԵՄԻՐՉՅԱՆ

**ՏԻՏԱՆԻ ԿԱՐԲԻԴԻ ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ՉԱՓԵՐԻ ԵՎ ՔԱՆԱԿԻ
ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ Al-Cu ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԱՄԱՁՈՒԼՎԱԾՔԻ
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԵՎ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎՐԱ**

Կատարվել է բարձր տեսակարար ամրությամբ Al-Cu-TiC համակարգի ալյումինային համաձուլվածքների ձուլման գործընթացի և կառուցվածքագոյացման մեխանիզմի վերլուծություն: Դիտարկվել են տիտանի կարբիդի՝ որպես լեգիրող կոմպոնենտի կիրառման առավելությունները և առանձնահատկությունները՝ նանոկառուցվածքային կոմպոզիտային նյութերի (ԿՆ) ստեղծման նպատակով: Ցույց են տրվել Al+5%Cu+TiC բաղադրությամբ հոմոգեն կառուցվածքով ԿՆ-երի ստացման փորձերի արդյունքները: Նկարագրվել է TiC նանոմասնիկների բաշխվածությունը մայրակի հալույթի մեջ: Հիմնավորվել են մայրակի մեջ տիտանի կարբիդի մասնիկների չափերի և հավելման հարաբերակցության օպտիմալ քանակները:

Առանցքային բառեր. տեսակարար ամրություն, ալյումինային համաձուլվածք, ամրանավորող ֆազ, տիտանի կարբիդ, մեխանիկական հատկություններ:

Ներածություն: Արդյունաբերության որոշ բնագավառներում էներգախնայողության և էներգաարդյունավետության խնդիրները լուծելու համար կարիք է առաջանում ստեղծելու նոր տեսակի սարքավորումներ, որոնք թեթև լինեն, օժտված մեծ շահագործողական բնութագրերով: Պողպատյա մեքենամասերի փոխարինումը դիմացկուն և թեթև մետաղներով համարվում է խիստ արդիական խնդիր, որը հնարավոր է իրականացնել բարձր ամրությամբ թեթև համաձուլվածքների օգտագործմամբ, այսինքն պողպատը փոխարինել բարձր տեսակարար ամրությամբ համաձուլվածքներով:

Տարբեր ոլորտներում օգտագործելու նպատակով վերջերս նկատվում է ալյումինային մայրակով կոմպոզիտային համաձուլվածքների օգտագործման կայուն միտում, որոնցից պատրաստված արտադրատեսակներն ունեն յուրահատուկ մեխանիկական հատկություններ և շահագործման բարձր բնութագրեր: Դրանք չեն զիջում նույնիսկ նմանատիպ պողպատյա արտադրատեսակներին: Հայտնի են ալյումինի հիմքով կոմպոզիտային նյութեր (ԿՆ), որոնք լեգիրված են TiC, SiC, Al₂O₃ և այլ նյութերով և օժտված են ավելի բարձր հատկություններով [1]:

Ելնելով ալյումինային մայրակի ամրացման մասնիկների բնույթից, ալյումինային ԿՆ-երը բաժանված են երեք խմբի՝ մետաղաթելքերով կամ թելքանման

բյուրեղներով լեզիրված, դիսպերս կարծր հատիկներով ամրացված և շերտավոր կառուցվածքով նյութեր:

Ուշագրավ են այն կոմպոզիտները, որոնք ունեն եվտեկտիկական փոխակերպություններ և ստացվում են եվտեկտիկական կառուցվածքների ուղղորդված բյուրեղացման արդյունքում [2, 3]: Տվյալ դեպքում եվտեկտիկական ձևավորում է միատեսակ կարգավորված կառուցվածք՝ համաձուլվածքի ողջ ծավալով:

Ամրավորող նյութի և ալյումինի մայրակի փոխազդեցությունը պետք է ուղեկցվի լավ կաշռականությամբ՝ ստեղծելով անցումային շերտ: Համեմատած Al_2O_3 -ի և SiC -ի հետ, TiC -ն ունի ավելի ցածր խտություն, ավելի բարձր կարծրություն և լավ փոխազդելու հատկություններ ալյումինի հետ: Այն նաև ունի գերազանց քիմիական և ջերմային կայունության:

Աշխատանքում որպես մայրակի նյութ վերցրվել է պղնձով լեզիրված ալյումինի համաձուլվածքը, իսկ ամրավորող մասնիկների ձևն ու հատիկների չափսերը ընտրվել են մադային անալիզով դասակարգումից հետո:

Ալյումինային հիմքը կոմպոզիտային նյութին տալիս է մի շարք շահագործողական հատկություններ, ինչպիսիք են ցածր խտությունը, մետաղի բարձր հոդնաձային ամրությունը, բարձր ջերմահաղորդակայունությունը, մաշակայունությունը, ջերմային ընդարձակման գործակիցը և այլն [4, 5]:

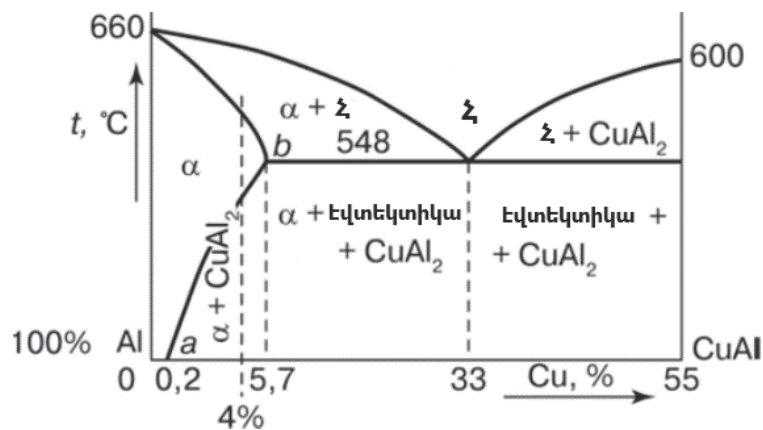
Ալյումինը, որն ընտրվել է որպես հետազոտվող Fe -ի մայրակ, ինքնին ունի որոշ սահմանափակումներ: Ամրության և պլաստիկության հատկությունները հակադարձ համեմատական են, այսինքն, երբ մեկի արժեքը փոխվում է, մյուսը կտրուկ նվազում է, որի արդյունքում փոքրանում է ձուլվածքների օգտագործման տիրույթը: Մայրակի նյութից բարձր ամրությամբ միացությունների ավելացումը կարող է վերացնել այս թերությունը: Տարբեր բաղադրիչներով նոր հմաձուլվածքի ստացումը ենթադրում է նոր կոմպոզիտային նյութի ստացում, որը գերազանցում է սկզբնական շահագործողական բնութագրերը [6]:

Ներկայումս մշակվում են տիտանի կարբիդով լեզիրված ալյումինի հիմքով Fe -եր, որոնք ունեն շատ բարձր կարծրություն, կոշտություն, տեսակարար ամրություն և ջերմակայունություն: Դրանք հիմնականում օգտագործվում են ներքին այրման շարժիչներում [7]: Սակայն անհրաժեշտ է հաշվի առնել և ուսումնասիրել շահագործման ընթացքում համաձուլվածքներում տեղի ունեցող ջերմային և քիմիական փոխազդեցությունները, որովհետև համաձայն [8] աշխատանքի՝ չի բացառվում, որ մետաղական արտադրատեսակները կրեն կառուցվածքային փոփոխություններ:

Հետազոտության համար առաջնահերթությունը տրված է կոռոզիադիմացկուն համաձուլվածքներին, որոնք լեզիրված են 5% պղնձով ($Al + 5\%Cu$ համակարգ): Դրանք բնութագրվում են ոչ միայն մեխանիկական բարձր հատկություններով

(ամրություն, կարծրություն, պլաստիկություն, հարվածային մածուցիկություն և եռակցվելիություն), այլն ամենակարևորը՝ շահագործման ցուցանիշների մեծացմամբ: Տեխնոլոգիական գործընթացների կատարելագործումը, ներառյալ բոլոր արտադրական գործողությունները, այդ թվում՝ հալումը, քիմիական բաղադրության ստուգումը, խառնումը, ձուլումը, սառեցման և բյուրեղացման պայմաններն ու ջերմային մշակումը մեծացնում են ձուլածո իրերի շահագործման որակը [9]:

Համաձայն Al-Cu համակարգի վիճակի դիագրամի, որը ներկայացված է նկ. 1-ում [10], էվտեկտիկայի կետը համապատասխանում է 33% պղնձի կոնցենտրացիային (սովորուսի գիծը 548°C), հետևաբար՝ բաշխման գործակիցը կարող է կիրառվել պղնձի կոնցենտրացիայի միջակայքում 0-ից 33%: CuAl_2 ֆազն ունի տետրագոնալ բյուրեղավանդակ, որի պարամետրերն են՝ $a=0,6066 \text{ նմ}$, $c=0,4874 \text{ նմ}$:



Նկ. 1. Al-Cu Համակարգի վիճակի դիագրամ [11]

Al_2Cu ֆազի մասնիկներն ունեն կլոր ձև և հավասարաչափ բաշխված են կառուցվածքում: Համաձուլվածքի ամրությունը հիմնականում կախված է մասնիկների միջին հեռավորությունից: Երբ պղինձը լուծվում է ալյումինի մեջ, ցանցի պարամետրը գծայնորեն նվազում է մինչև $0,4038 \text{ նմ}$ արժեքը, որը համապատասխանում է պղնձի առավելագույն լուծելիությանը. այն հավասար է 5,7%-ի:

Al_2Cu ֆազի խտությունը $4,34 \text{ գ/սմ}^3$ է: Պղնձի ավելացումն ալյումինի մեջ ունի մոդիֆիկացնող ազդեցություն, սակայն ձուլածո ալյումինի մակրոհատիկի մանրացման ազդեցությունը փոքր է: Ի լրումն վերը նշվածի՝ նշենք նաև, որ կախված ձուլվածքի հոմոգենացման ջերմաստիճանից, ինչպես նաև հետագա ձեռքարկման ընթացքում, պղինձը նպաստում է հատիկների դիսպերս կարծրացմանը [11]:

Շնորհիվ իր ուշագրավ հատկությունների՝ տիտանի կարբիդը (TiC) խոստումնալից կերամիկական նյութ է, որն ունի բարձր ամրություն և կարծրություն (9,5+ ըստ Մոսսի սանդղակի), ցածր խտություն ($2,52 \text{ գ/սմ}^3$), բարձր քիմիական

կայունություն, գերազանց ջերմակայունություն, ինչպես նաև՝ հղկման բարձր ունակություն: Իր բարձր կարծրության շնորհիվ TiC-ը կարող է այլընտրանք լինել SiC-ին և Al_2O_3 -ին՝ որպես այլումինե մայրակն ամրավորող նյութ, որտեղ մաշակայունությունը հիմնական պահանջն է: Այն նաև մեծ պահանջարկ ունի փոշեմետալուրգիայի բնագավառում:

Բարձր ճնշման տակ արտադրատեսակների ձուլումը թույլ է տալիս ստանալ գրեթե առանց ծակոտիների բարձրամուր արտադրանք: TiC-ի հետ համատեղ դիֆուզիոն գործընթացներն ընթանում են դանդաղ և խանգարում են ազատ ձուլմանը և խտացմանը: Մյուս կողմից՝ TiC-ն տարբեր ագրեսիվ միջավայրերի նկատմամբ շատ դիմացկուն է, քիմիապես կայուն և ունի ցածր տեսակարար կշիռ [12]:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Տեխնոլոգիայի իրականացման և հետազոտության ընթացքում իրականացվել են հետևյալ գործողությունները.

- էլեկտրական դիմադրության վառարանում հալեցվել են Al և Cu ձուլակտորները,

- զուգահեռաբար առնվազն 20 *քառ. սմ* 200...250°C ջերմաստիճանում տաքացվել են տիտանի կարբիդի մասնիկները,

- 850...950 °C ջերմաստիճանում տիտանի կարբիդի փոշին ներմուծվել է հալույթի մեջ,

- կատարվել է մեխանիկական խառնում. խառնիչի սայրի պտտման արագությունը եղել է 250...350 *պտույտ/քառ. սմ*,

- հալույթը սառեցվել է 10...25 *աստ/քառ. սմ* արագությամբ:

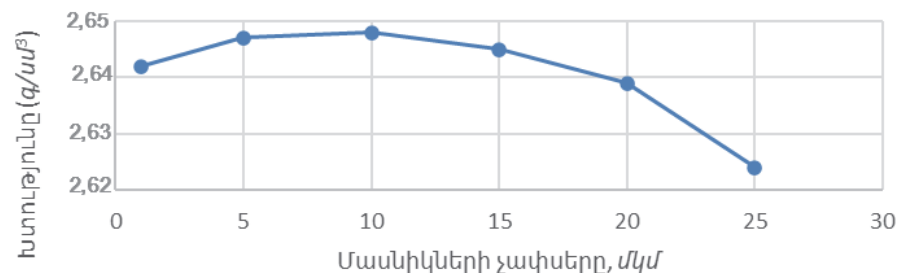
Արդյունքում ստացվել են բարձր մեխանիկական հատկություններով նմուշներ, երբ մայրակն ամրացնող մասնիկները բաշխված են կառուցվածքում հավասարապես:

Հետազոտության արդյունքները. Ուսումնասիրվել է տիտանի կարբիդի մասնիկի չափի ազդեցությունը խտության վրա: Որպես մայրակի նյութ օգտագործվել է Al+5%Cu համակարգի այլումինային համաձուլվածքը: Կոմպոզիտային համաձուլվածք ստանալու համար 5...20 *մկմ* մասնիկների միջին չափով տիտանի կարբիդը օգտագործվել է որպես մայրակի կմախք՝ բյուրեղացման հավասարաչափ բաշխված կենտրոններով (աղ. 1): Հալույթի մեջ տարբեր չափերի մասնիկները ներմուծվել են 5 *մկմ* միջակայքով (1...5, 5...10, 10...15, 15...20, 20...25): Հետազոտության ընթացքում ուսումնասիրվել են 1...25 *մկմ* միջակայքի չափ ունեցող մասնիկները: Որոշվել է այս չափերի մասնիկների ազդեցությունը հալույթի խտության և նախապատրաստվածքի վրա:

Տիտանի կարբիդի մասնիկների չափը և Al-Cu խառնուրդի խտության արժեքները

Մասնիկների չափը, մկմ	Խտությունը ($q/սմ^3$)
1	2,642
5	2,647
10	2,648
15	2,645
20	2,639
25	2,624

Նկ. 2-ում ցույց է տրված ստացված համաձուլվածքի խտության փոփոխության կախվածությունը TiC փոշու մասնիկների չափսերից: Կարելի է տեսնել, որ խտությունը մեծանում է յուրաքանչյուր 1-ից մինչև 10 մկմ մասնիկների չափսերի մեծացմանը զուգընթաց: Համաձուլվածքի խտությունը 5 մկմ չափսի տիտանի կարբիդի մասնիկների ներմուծման ժամանակ կազմում է 2,647 $q/սմ^3$, մինչդեռ հարաբերական խտությունը 10 մկմ մասնիկների ներմուծման ժամանակ կազմում է 2,648 $q/սմ^3$:



Նկ. 2. Տիտանի կարբիդի մասնիկի չափսի ազդեցությունը Al-Cu համաձուլվածքի խտության վրա

Այնուհետև երևում է, որ տիտանի կարբիդի մասնիկի չափսի 25 մկմ ներմուծման ժամանակ համաձուլվածքի խտությունը աստիճանաբար նվազում է՝ հասնելով նվազագույն արժեքի՝ 2,624 $q/սմ^3$: Ստացված արդյունքների հիման վրա, հալման միատեսակ խտություն ապահովելու համար, տիտանի կարբիդի մասնիկների չափսը ընտրվել է 5-ից 15 մկմ միջակայքում, քանի որ այդ չափսերը տալիս են խտության լավագույն արժեքները:

Ստացված արդյունքներից երևում է, որ համաձուլվածքի խտության վրա ազդում է տիտանի կարբիդի մասնիկների չափսի փոփոխությունը, և խտության լավագույն արժեքները ստացվել են տիտանի կարբիդի մասնիկների 5...15 մկմ միջակայքում:

Մայրակի միկրոծավալում մեխանիկական ուժերի ազդեցության տակ (մասնիկների լցում, տեղադրում, տիտանի կարբիդի ներմուծում սնուցիչի միջոցով) մասնիկների հարվածների և բախումների շնորհիվ, հնարավոր է միկրոճաքերի առաջացում: 1...5 մկմ չափսի մասնիկները, ցածր խտության պատճառով, որպես կանոն, վեր են բարձրանում հալույթի մակերես, ապա անցնում խարամի մեջ: Եվ հակառակը, երբ 20...25 մկմ մեծությամբ տիտանի կարբիդի մասնիկները ներմուծվում են հալույթի մեջ, ապա առաջացնում են անկանոն «սառը» ազլումերատներ, ինչը դժվարացնում է դրանց միատեսակ բաշխումը հալույթում [13, 14]: Նույնիսկ հալույթում խառնումից հետո, ի վերջո, խոշոր մասնիկները նստում են համաձուլվածքի հատակին:

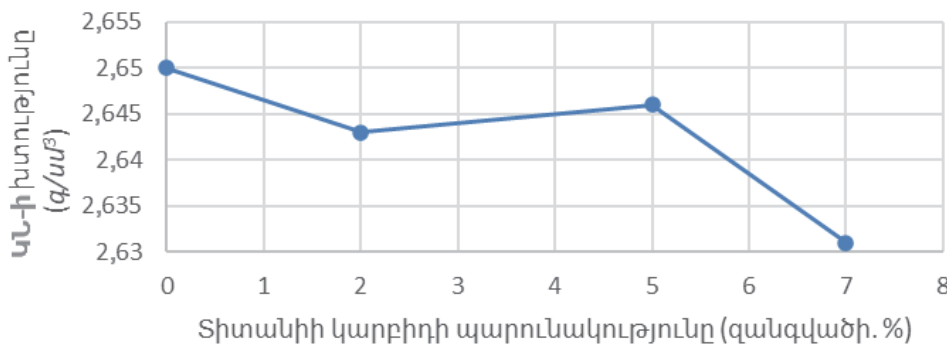
Հետազոտության հաջորդ փուլում ուսումնասիրվել է կարբիդային հավելումների քանակի ազդեցությունը մայրակային հալույթի խտության վրա:

Կոմպոզիտային համաձուլվածքի խտությունը չափվել է Արքիմեդի մեթոդով՝ օգտագործելով հետևյալ հավասարումը:

$$\rho_{MMC} = m / ((m - m_1) \times \rho_{H_2O}),$$

որտեղ ρ_{MMC} -ը Al-Cu-TiC կոմպոզիտի խտությունն է, m -ը՝ բաղադրյալ նմուշի զանգվածը օդում, m_1 -ը՝ նույն կոմպոզիտի զանգվածը ջրում, ρ_{H_2O} -ն՝ թորած ջրի խտությունը (293K-ում) 998 կգ/մ³:

Նկ. 3-ում ցույց է տրված TiC մասնիկների ներմուծումից առաջ և հետո խտության փոփոխությունը կոմպոզիտային համաձուլվածքում: Ըստ աղ. 2-ի տվյալների՝ երևում է, որ խտությունը 2,651-ից նվազել է մինչև 2,643, 2,646, 2,631 կգ/մ³:



Նկ. 3. Տիտանի կարբիդի քանակի (%) ազդեցությունը համաձուլվածքի խտության վրա

Քանի որ տիտանի կարբիդի խտությունը (2,5 կգ/մ³) փոքր է Al-5%Cu համաձուլվածքի խտությունից (2,651 կգ/մ³), ուստի Al-5%Cu-TiC կոմպոզիտների ընդհանուր խտությունը փոքրանում է:

Խտության արժեքները և տիտանի կարբիդի մասնիկների տոկոսը համաձուլվածքում

Տիտանի կարբիդ (քան. %)	ԿՆ խտությունը (g/cm^3)
0	2,65
2	2,643
5	2,646
7	2,631

Ստացված տվյալների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ կախված հալույթի մեջ տիտանի կարբիդի մասնիկների տոկոսից՝ խտության կայուն արժեքները գտնվում են 1,8-ից 5,5% միջակայքում: Ավելի ցածր պարունակության դեպքում Al-Cu հալույթի մակերեսին նկատվում է տիտանի կարբիդի մասնիկների տարանջատման բարձր մակարդակ, իսկ 6%-ից բարձր լինելու դեպքում համաձուլվածքի հատակում առաջանում են նստվածքներ:

Եզրակացություն: Al-Cu-TiC համակարգի կոմպոզիտային համաձուլվածքից բարձրորակ արտադրանք ստանալու համար կատարված փորձերի արդյունքում կարելի է անել հետևյալ եզրակացությունները.

1. Կոմպոզիտային համաձուլվածքում 1...25 *մկմ* չափսի տիտանի կարբիդի մասնիկները ներմուծելիս որոշվել է, որ միատեսակ խտություն ապահովելու համար դրա լավագույն արժեքները պետք է գտնվեն 5-ից մինչև 15 *մկմ* միջակայքում:

2. Տիտանի կարբիդի մասնիկների պարունակությունից կախված՝ հալույթի խտության փոփոխությունները ցույց են տալիս, որ դրա կայուն արժեքները ձևորեն բերվում 1,8-ից 5,5% միջակայքում: Ավելի ցածր պարունակության դեպքում Al-Cu հալույթի մակերեսին նկատվում է տիտանի կարբիդի մասնիկների տարանջատման բարձր մակարդակ, իսկ 6%-ից բարձր լինելու դեպքում համաձուլվածքի հատակում առաջանում են նստվածքներ:

Հետազոտությունները կատարվել են Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի «Նյութագիտություն և մետալուրգիա» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Վասիլյան Գ.Ա., Սաֆարյան Տ.Ն., Դեմիրչյան Տ.Ա., Աղբալյան Ա.Ս. Բարձր տեսակարար ամրությամբ Al-Cu-TiC համակարգի պլումինային դեֆորմացվող համաձուլվածքների ձուլման գործընթացի հետազոտումը // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.- Մաս 2.- Երևան: Ճարտարագետ, 2023.- էջ 434-445:
2. Алексеев М.О., Чистяков Е.Н., Купрюнин Д.Г. Броневые материалы. Современное состояние // Экспорт вооружений. – 2016. – № 2.

3. **Алаттар А.Л., Бажин В.Ю., Власов А.А.** Повышение механических свойств композиционных алюминиевых сплавов при вводе карбида бора // *iPolytech Journal*. – 2020. – 24 (3). – P. 663-671.
4. **Ni Y., Luo R.** Microstructure and Mechanical Properties of Carbon / Carbon Composites Infiltrated with Ti–6Al–4V Titanium Alloy // *Crystals*. – 2020. – Vol. 10 (1). – P. 29.
5. **Курганова Ю.А., Чернышова Т.А., Кобелева Л.И., Курганов С.В.** Эксплуатационные характеристики алюмоматричных дисперсно-упрочненных композиционных материалов и перспективы их использования на современном рынке конструкционных материалов // *Металлы*. – 2011. – №4. – С. 71-75.
6. **Андреева А.В.** Основы физикохимии и технологии композитов. – М.: Радиотехника, 2001. – 191 с.
7. **Belov N.A., Khvan A.V.** The ternary Al-Ce-Cu phase diagram in the Al-rich corner // *Acta Materialia*. – 2007. – Vol. 55. – P. 5473-5482.
8. **Ibrahim A., Mohamed F.A., Lavernia E.J.** Particulate reinforced metal matrix composites – a review // *Journal of materials science*. – 1991. – № 26. – P. 1137-1156.
9. **Луц А.Р.** Построение феноменологической модели воздействия рафинирующих флюсов на процесс получения наноструктурного композита Al-5%Cu-10%TiC методом СВС // *Современные материалы, техника и технологии*. – 2016. – № 3. – С. 63-67.
10. **Мондольфо Л.Ф.** Структура и свойства алюминиевых сплавов: Перевод с английского. – М.: Металлургия, 1979. – 483 с.
11. Synthesis of aluminum alloy 7075-graphite composites by milling processes and hot extrusion / **R. Deaquino-Lara, I. Estrada-Guel, G. Hinojosa-Ruiz, R. Flores-Campos, et al** // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2011. – Vol. 509. – P. S284-S289.
12. **Belov N.A., Eskin D.G., Aksenov A.A.** Multicomponent Phase Diagrams: Applications for Commercial Aluminum Alloys // *Elsevier*. – 2005. – P.414.
13. **Шамшин Д.Л.** Химия: Учеб. Пособие. – М.: Высш. школа, 1980. – 319 с.
14. **Kala H., Kala H., Mer K.K.S., Kumar S.A.** Review on Mechanical and tribological behaviors of stir cast aluminum matrix composites // *Procedia Material Science*. – 2014. – Vol. 6. – P. 1951–1960.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 07.12.2023:

Т.А. ДЕМИРЧЯН

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ И КОЛИЧЕСТВА КАРБИДА ТИТАНА НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL-CU

Проведен анализ процесса литья и механизма структурообразования алюминиевых сплавов системы Al-Cu-TiC с высокой удельной прочностью. Рассмотрены преимущества и особенности применения карбида титана в качестве легирующего компонента с целью создания наноразмерных структур композиционных материалов (КН). Показаны результаты экспериментов по получению КН с гомогенной структурой

Al+5% Cu+TiC. Описаны наночастицы TiC в материнском расплаве. Обоснованы оптимальные соотношения размеров и аддитивного соотношения частиц карбида титана в материнском сплаве.

Ключевые слова: удельная прочность, алюминиевый сплав, упрочняющая фаза, карбид титана, механические свойства.

T.A. DEMIRCHYAN

**THE INFLUENCE OF PARTICLE SIZES AND THE TITANIUM
CARBIDE QUANTITY ON THE PROPERTIES AND STRUCTURE OF
THE AL-CU SYSTEM ALLOYS**

An analysis of the casting process and structure - formation mechanism of aluminum alloys of the Al-Cu-TiC system with high specific strength is performed. The advantages and features of using titanium carbide as an alloying component in order to create nanoscale composite materials (CM) are considered. The results of experiments for the production of CM with a homogeneous structure of Al+5%Cu+ TiC are shown. TiC nanoparticles in the parent melt are described. optimal size ratios and additive ratios of titanium carbide particles in the parent alloy are substantiated.

Keywords: specific strength, aluminum alloy, strengthening phase, titanium carbide, mechanical properties.

Լ.Ա. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Վ.Վ. ՀՈՎԱԿԻՄՅԱՆ

**ԲԱՑԱՀԱՆՔԻ ԿՈՂԻ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ԲՆԱԿԱՆ ԼԵՌՆԱԼԱՆՋԻ
ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ԱՌԱՎԵԼԱԳՈՒՑՆ ԲԱՐՁՐՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ**

Բնական լեռնալանջով բեռնված «Զանգեզուրի ՊՄԿ» ՓԲԸ Քաջարանի բացահանքի հարավարևմտյան կողմի պայմաններում եռաչափ ֆիզիկական մոդելավորմամբ որոշվել է բացահանքի կողմի վերին եզրից տարածվող բնական լեռնալանջի առավելագույն բարձրությունը, որի սահմաններում գտնվող լեռնային ապարային զանգվածն ազդում է բացահանքի կողմի ապարների լարվածադեֆորմացիոն վիճակի վրա:

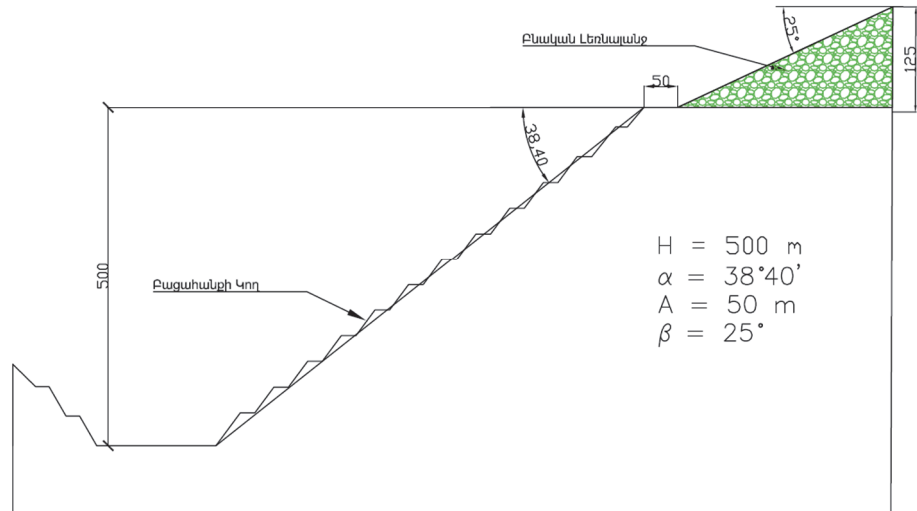
Խնդիրը լուծելու համար կիրառվել է մշակված եռաչափ մոդելավորման ստենդը՝ բաղկացած ստորին անշարժ և վերին շարժական պրիզմաներից: Ցույց է տրվել, որ դիտարկելով բացահանքի կողմը և դրանից վեր տարածվող բնական լեռնալանջը՝ որպես ապարային զանգվածի մեկ երկրամեխանիկական ամբողջություն, կայունության հաշվարկային ժամանակակից ծրագրով որոշվել է այդ երկրամեխանիկական ամբողջության հնարավոր սահքի մակերևույթը, որտեղ բացահանքի կողմը բնական լեռնալանջը հասնում է վերջինիս առավելագույն բարձրությունը բնորոշող մի կետում: Որոշվել է, որ բացահանքի վերին եզրից տարածվող լեռնալանջը իր ամբողջ բարձրությամբ չի ազդում բացահանքի ուսումնասիրվող կողմի ապարային զանգվածի լարվածադեֆորմացիոն վիճակի և կայունության վրա:

Առանցքային բառեր. բնական լեռնալանջ, լեռնային բացահանք, բացահանքի կողմ, մոդել, տենզոսովիչ, պրիզմա, լարվածադեֆորմացիոն դաշտ:

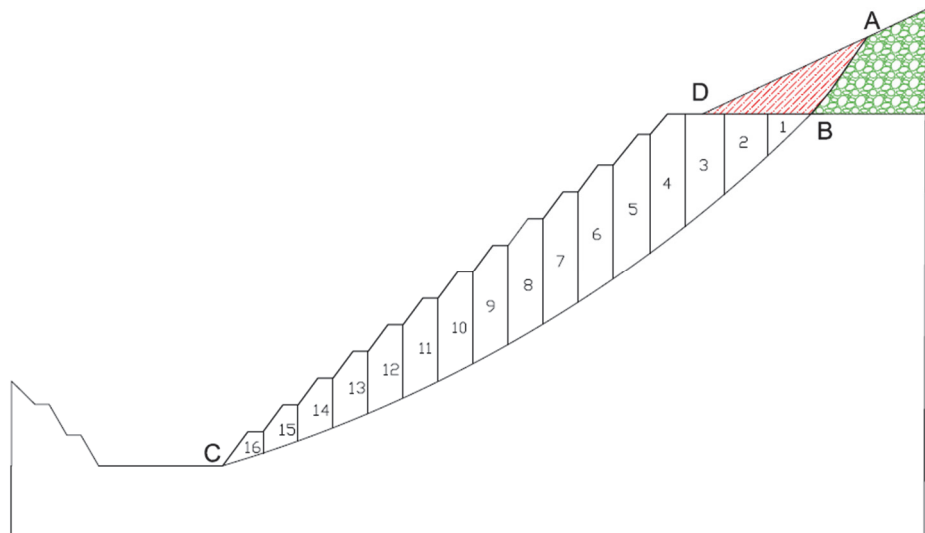
Ներածություն: Քաջարանի բացահանքի շուրջ 500 մ² բարձրությամբ հարավարևմտյան կողմի վերջին աստիճանի վերին եզրագծից 50 մ² հեռավորության վրա տարածվում է հորիզոնի նկատմամբ 25° թեքությամբ և 125 մ² ընդհանուր բարձրությամբ բնական լեռնալանջը, ինչը ցույց է տրված նկ. 1-ում:

Բացահանքի կողմը և դրանից վեր տարածվող բնական լեռնալանջը դիտարկելով որպես ապարային զանգվածի մեկ երկրամեխանիկական ամբողջություն, կայունության հաշվարկային Geostudio ծրագրով որոշվել է վերջինիս հնարավոր սահքի մակերևույթը, ինչը բնական լեռնալանջը հասնում է վերջինիս առավելագույն բարձրությունը բնորոշող մի A կետում: Հնարավոր ABC սահքի մակերևույթից երևում է, որ բնական լեռնալանջը (նկ. 2՝ կանաչ գույնով տեղամասը) իր ամբողջ բարձրությամբ չի ազդում բացահանքի մերկացած կողմի կայունության վրա:

Բացահանքի մերկացած կողի կայունության վրա ազդում է միայն բացահանքի CD կողի վրա «նստած» և նրա լարվածադեֆորմացված վիճակի վրա ազդող բնական լեռնալանջից առանձնացված ABD եռանկյուն հիմքով պրիզմայաձև զանգվածը: Չափերը, համաձայն մոդելային հետազոտությունների կատարման համար ընտրված 1:500 մասշտաբի, կազմում են համապատասխանաբար 90 և 165 մ[1]:



Նկ. 1. Քաջարանի բացահանքի հարավարևմտյան կողի վրա «նստած» բնական լեռնալանջի փաստացի տեղադիրքը և երկրաչափական պարամետրերը



Նկ. 2. Բացահանքի կողի և լեռնալանջի ապարային երկրամեխանիկական զանգվածի հնարավոր սահքի մակերևույթի տեղադիրքը

ABC սահքի մակերևույթի կառուցման համար օգտագործվել է թեքությունների կայունության հաշվարկային Geostudio ծրագրային փաթեթի Մորգենշտերն-Փրայսի ժամանակակից տեսությունը, ինչը բավարարում է ստատիկայի հավասարակշռության բոլոր պայմաններին, հաշվի առնելով նաև թեքությունների կայունության հաշվարկային տարրական բլոկների միջև գոյություն ունեցող փոխադեցության շոշափող ուժերը [2]:

Մեթոդիկայի հիմնավորումը: Համաձայն ֆիզիկական մոդելավորման համար ընտրված երկրաչափական 1:500 մասշտաբի՝ նկ. 2-ում ցույց տրված եռանկյուն պրիզմայի ABD հիմքի չափերը մոդելում կազմում են, համապատասխանաբար, $AB = 0,18$, իսկ $BD = 0,33$ մ [3, 4]:

Հաշվարկների կատարման պարզության համար մոդելում ընդունելով պրիզմայի ABD հիմքը որպես ուղղանկյուն եռանկյուն, վերջինիս մակերեսը կկազմի.

$$S_{ABD}^{մոդել} = 0,18 \times \frac{0,33}{2} = 0,0297 \text{ մ}^2: \quad (1)$$

Մոդելում ABD եռանկյուն հիմքով և 1 մ բարձրությամբ պրիզմայի զանգվածը կլինի՝

$$V_{ABD}^{մոդել} = S_{ABD}^{մոդել} \times \gamma_{մոդել} \times l, \quad (2)$$

որտեղ $\gamma_{մոդել}$ – մոդելում ընտրված համարժեք նյութի ծավալային զանգվածն է, հավասար 1700 կգ/մ^3 [2, 3], l – մոդելում լեռնալանջի ABD եռանկյուն հիմքով պրիզմայի բարձրությունը, մ:

Բացահանքի կողի վրա ազդող բնական լեռնալանջի զանգվածը մոդելում ընդունելով որպես համարժեք նյութ, կլինի՝

$$V_{ABD}^{մոդել} = 0,0297 \times 1700 \times 1 = 50.5 \text{ կգ}: \quad (3)$$

Հետազոտության արդյունքները: Լեռնային բացահանքի կողի լարվածադեֆորմացիոն վիճակի վրա կողի վերին եզրից տարածվող բնական լեռնալանջի ազդեցության ուսումնասիրման ծավալային ֆիզիկական մոդելային հետազոտություններում բացահանքի հարավարևմտյան կողի վրա ազդող բնական լեռնալանջի զանգվածի (3) արտահայտությամբ որոշված համարժեք նյութի քանակով բեռնվում է եռաչափ մոդելի վերին շարժական հիմնակմախքը:

Բացի Քաջարանի լեռնային բացահանքի հարավարևմտյան կողի վերջին աստիճանից վեր տարածվող բնական լեռնալանջի տարածման գոյություն ունեցող փաստացի երկրաչափական պայմաններից, մոդելավորման աշխատանքներում դիտարկվել են նաև լեռնալանջի տարածման տարբեր սցենարներ [4]: Փաստացի և դիտարկվող սցենարների համար բացահանքի կողի համարժեք նյութում մոդելային հետազոտություններով լարվածությունների գրանցման համար կատարվող աշխատանքների հերթականությունը հետևյալն է:

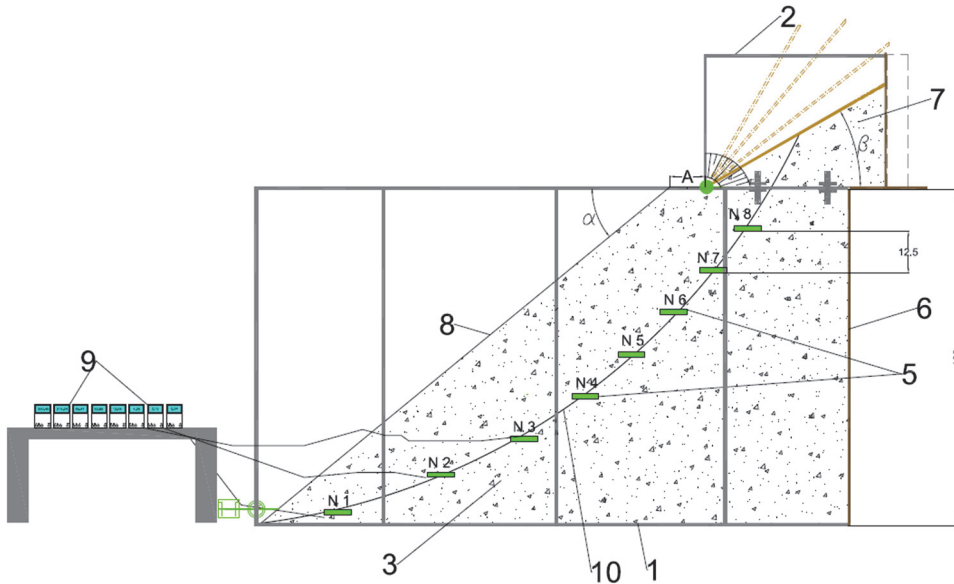
Եռաչափ ֆիզիկական մոդելային ստենդի ստորին անշարժ հիմնականախթում (1) համարժեք նյութից կառուցվում է բացահանքի հետազոտվող կողի մոդելը (8), ինչը ցույց է տրված նկ. 3-ի վրա և դրա վրա տեղադրվում է վերին շարժական պրիզման (2): Վերջինիս մեջ լցվում են բնական լեռնալանջի տարածման տարբեր երկրաչափական պարամետրերով սցենարների համար (3) արտահայտությամբ որոշված համարժեք նյութի զանգվածները (7): Յուրաքանչյուր սցենարի պայմանների դեպքում որպես մեկ երկրամեխանիկական մարմին ընդունված հետազոտվող կողի և լեռնալանջի հնարավոր փլուզման մակերևույթի երկայնքով (10) մոդելի ստորին հիմնականախթի (1) համարժեք նյութում (3) 12,5 սմ բարձրությամբ տեղադրվում են №1-8 տենզոսվիչները (5), ինչը ցույց է տրված նկ. 3-ում [3]: Վերևում նկարագրված մեթոդով դիտարկված բնական լեռնալանջի տարածման սցենարների համար ֆիզիկական մոդելավորման հետազոտություններով բացահանքի կողի մոդելային թեքությունում (8) տվիչներով գրանցվում են ստորին անշարժ և վերին շարժական պրիզմաներում լցված համարժեք նյութերի զանգվածներից առաջացող լարվածությունները:

Բացահանքի կողի վերին եզրից տարածվող տարբեր երկրաչափական պարամետրերով բնական լեռնալանջից բացահանքի կողի ապարներում լարվածադեֆորմացիոն վիճակի մոդելային հետազոտություններով ուսումնասիրման արդյունքները բերված են աղ. 1-ում:

Աղյուսակ 1

Մոդելային հետազոտությունների արդյունքները

Սցենարներ	Բացահանքի կողի վերին նիշից հաշված՝ լեռնալանջի տարածման հեռավորությունը, A, սմ	Լեռնալանջի թեքությունը՝ հորիզոնի նկատմամբ, <i>սստ.</i>	Լեռնալանջի դիտարկված հնարավոր բարձրությունը բացահանքում, սմ	Լեռնալանջի կողի վրա ազդող զանգվածը մոդելում, կգ	Լեռնալանջի՝ ազդեցության առավելագույն բարձրությունը մոդելում, սմ	Լեռնալանջի բացարձակ բարձրությունը մոդելում, սմ
1	0	10	56	23,0	7,3	9,9
2	25	15	72	29,6	10,6	14,4
3	50	20	97	43,2	15,4	19,4
4	75	25	125	50,5	18,0	25,0
5	10	30	155	64,5	23,0	31,0
6	150	35	188	80,2	28,6	37,6
7	150	38,4	212	93,1	33,2	42,4
8	150	45	268	121,8	43,4	53,6
9	150	50	318	159,8	57,0	63,6



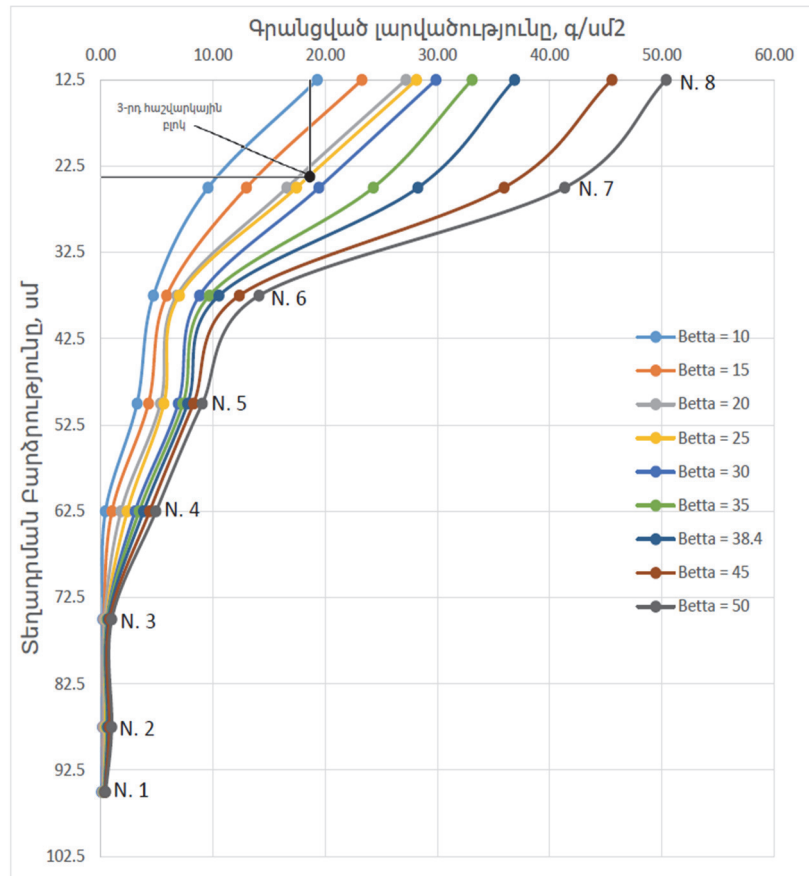
Նկ. 3. Բացահանքի կողի մոդելում սահքի մակերևութի երկայնքով տենզոտվիչների տեղադրման սխեման

Վերը նշված պայմանների դեպքում բացահանքի հարավարևմտյան կողի կայունության մոդելային հետազոտություններում մոդելի ստորին հիմնակմախքում $h = 12,5, 25, 37,5, 50, 62,5, 75, 87,5$ և 100 սմ խորություններում համարժեք նյութի մեջ տեղադրված տվիչներով կատարվել է մոդելի վերին հիմնակմախքում ձևավորված բնական լեռնալանջի զանգվածի ազդեցությունից մոդելում տեղադրված տվիչներով ուղղաձիգ լարվածությունների արժեքների գրանցում:

Նկ. 4-ում բերված են Քաջարանի բացահանքի հարավարևմտյան կողի վերին եզրից 50 սմ հեռավորությունից տարածվող բնական լեռնալանջի տարածման փաստացի և հորիզոնի նկատմամբ տարբեր թեքություններով անկյունների դեպքում ծավալային ֆիզիկական մոդելավորումից ստացված արդյունքները: Վերջիններս որոշվել են մոդելում տարբեր մակարդակների վրա տվիչներով գրանցված լարվածությունների արժեքների հիման վրա:

Մոդելի ստորին հիմնակմախքում տեղադրված տվիչներով գրանցված լարվածությունները σ_u որոշվում են տվիչների կողմից գրանցված մոդելի ստորին հիմնակմախքում բացահանքի կողի և վերին շարժական պրիզմայում լեռնալանջի համարժեք նյութերի զանգվածների գումարային արժեքների և բացահանքի կողի համարժեք նյութի զանգվածների տարբերության $(P_{h.p.} + P_{l.e.n.} - P_{h.p.})$ և տվիչների մակերեսի (S) հարաբերությունից [1].

$$\sigma_u = \frac{P_{h.p.} + P_{l.e.n.} - P_{h.p.}}{S} :$$



Նկ. 4. Քաջարանի բացահանքի հարավ-արևմտյան կողմի վերին նիշից 50 մ հեռավորությունից տարածվող բնական լեռնալանջի փաստացի թեքության և տարբեր անկյունների դեպքում սվիչներով գրանցված լարվածությունների բաշխվածությունը

Կատարված եռաչափ ֆիզիկական մոդելային հետազոտությունների հիման վրա բնական ABD լեռնալանջի ազդեցությունից Քաջարանի բացահանքի հարավ-արևմտյան կողմի կայունության որոշման համար մեր կողմից մշակված է նոր մեթոդ: Վերջինիս համաձայն՝ կողմի և փլուզման հարթության միջև պարփակված և հայտնի հաշվարկային մեթոդների կիրառման դեպքում բացահանքի կողմի տարրական բլոկների բաժանված զանգվածներին, ըստ խորության, գումարվում են ծավալային ֆիզիկական մոդելավորումից ստացված հետազոտությունների արդյունքները, որոնք հաշվի են առնում կողմի վերին նիշից տարածվող բնական լեռնալանջի ազդեցությունը [4]:

Աղ. 2-ում բերված են Քաջարանի բացահանքի հարավարևմտյան կողմի վերին եզրագծից 50 մ հեռավորությունից տարածվող և 25° թեքությամբ բնական

լեռնալանջի կայունության հաշվարկային պարամետրերը՝ համաձայն մշակված նոր մեթոդիկայի [4]:

Աղ. 2-ից երևում է, որ բացահանքի վերին եզրից տարածվող բնական լեռնալանջը միջկողային լեռնային ապարային զանգվածի վրա առաջացնում է լրացուցիչ բեռնվածքներ, և հետևաբար՝ հաշվարկային տարրական մի շարք բլոկներում ավելացնում է վերջիններիս զանգվածը: Ֆիզիկական մոդելավորումից ստացված տվյալների հիման վրա ցույց է տրվել, որ Քաջարանի բացահանքի հարավարևմտյան կողմի վրա բնական լեռնալանջի ազդեցությունը գործում է մինչև բացահանքի կողմի 240 մ խորությունը:

Աղյուսակ 2

Քաջարանի բացահանքի հարավարևմտյան կողմի վերին եզրագծից 50 մ հեռավորությունից տարածվող և 25⁰ թեքությամբ բնական լեռնալանջի կայունության հաշվարկային պարամետրերը

Բլոկի համարը	Բլոկի լայնությունը, a , $մ$	Բլոկի բարձրությունը, h , $մ$	Ծավալային զանգվածը, $Υ$, $տ/մ^3$	Բլոկի զանգվածը, P , $հազ. տ$	Բլոկի հիմքի թեքման անկյունը, $φ$, $սստ.$	$\sin φ$	Բլոկի հիմքում սահքի տանող ուժը, $T_{սահ.}$, $հազ. տ$	$\cos φ$	Բլոկի հիմքում սահքի պահող ուժը, N , $հազ. տ$
1	68,85	30,41	2,31	4,84 ^{+16²37}	45	0,70	3,39	0,70	3,39
2	54,95	87,4	2,31	11,09 ^{+12.75}	42	0,67	7,43	0,74	8,21
3	55,81	139,75	2,31	18,02 ^{+8.54}	40	0,64	11,53	0,76	13,69
4	49,54	179,16	2,31	20,50 ^{+2.96}	38	0,61	12,51	0,79	16,20
5	52,59	181,19	2,31	22,01 ^{+2.76}	36	0,58	12,77	0,81	17,83
6	49,95	176,92	2,31	20,41 ^{+2.29}	34	0,56	11,43	0,83	16,94
7	49,64	171,01	2,31	19,61 ^{+1.54}	32	0,53	10,39	0,85	16,67
8	49,71	163,19	2,31	18,74 ^{+0.92}	31	0,51	9,56	0,86	16,12
9	49,83	153,49	2,31	17,67 ⁺⁰	29	0,48	8,48	0,87	15,37
10	49,61	141,86	2,31	16,26 ⁺⁰	27	0,45	7,32	0,89	14,47
11	49,76	128,62	2,31	14,78 ⁺⁰	26	0,44	6,51	0,90	13,31
12	49,68	113,58	2,31	13,03 ⁺⁰	24	0,40	5,21	0,91	11,86
13	49,73	96,94	2,31	11,14 ⁺⁰	23	0,39	4,34	0,92	10,25
14	49,91	78,65	2,31	9,07 ⁺⁰	21	0,35	3,17	0,93	8,43
15	49,7	58,6	2,31	6,73 ⁺⁰	19	0,32	2,15	0,95	6,39
16	57,39	37,23	2,31	4,94 ⁺⁰	18	0,30	1,48	0,95	4,69

Եզրակացություններ.

1. Մշակվել է բացահանքի ապարային զանգվածի լարվածադեֆորմացիոն վիճակի վրա ազդող բացահանքի կողի վերին եզրից տարածվող բնական լեռնալանջի առավելագույն բարձրության որոշման եղանակ՝ բացահանքի կողը և դրանից վեր տարածվող բնական լեռնալանջը դիտարկելով որպես ապարային զանգվածի երկրամեխանիկական մեկ ամբողջություն:

2. Մշակվել է տվյալների բանկ, որը հնարավորություն է տալիս լեռնալանջի տարբեր թեքությունների դեպքում համարժեք նյութում տեղադրված տվիչներով որոշել մոդելի ստորին հիմնականախքում լարվածությունների արժեքները: Տվիչների վրա միայն բնական լեռնալանջի ազդեցությունից լարվածությունները որոշելու համար մոդելի ստորին անշարժ հիմնականախքում և շարժական վերին պրիզմայում լցված համարժեք նյութի գումարային զանգվածից հանվում է ստորին հիմնականախքում լցված համարժեք նյութի զանգվածը՝ այն բաժանելով տվիչի մակերեսի վրա:

3. Ծավալային ֆիզիկական մոդելավորմամբ «Զանգեզուրի ՊՄԿ» ՓԲԸ Քաջարանի հարավարևմտյան կողի բարձրությամբ որոշվել են այն սահմանները, որտեղ լեռնալանջի ապարային զանգվածն ազդում է բացահանքի կողի ապարների լարվածադեֆորմացված վիճակի վրա: Ազդեցության սահմանները որոշվել են բացահանքի հարավարևմտյան կողի վերին նիշից վեր տարածվող լեռնալանջի տարբեր թեքություններով անկյունների և կողի վերին աստիճանից մինչև լեռնալանջի սկիզբը եղած հեռավորության դեպքում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Հովակիմյան Վ.Վ.** Լեռնային բացահանքի տեկտոնական խզումներով թուլացած կողի կայունության երկրամեխանիկական հիմնավորումը. Սեղմագիր տ.գ.թ. ստենախոսության- Երևան. - 2023.- 25 էջ:
2. **Stacey T.R.** Stability of Rock Slopes In Mining and Civil Engineering Situations / CSIR Report ME 1202.- South Africa, 1973.- 217 p.
3. **Манукян Л.А., Баласанян Л.С.** Модельные исследования влияния размеров кусков пород и влажности на характеристики движения горной массы при перепуске по породоскатам//Сборник статей по материалам LII Международной н-т конференции “Инновационные подходы в современной науке”.- 2019.- 16 (52).- С. 38-41.
4. **Մանուկյան Լ.Ա., Հովակիմյան Վ.Վ.** Բնական լեռնալանջով բեռնված լեռնային բացահանքի կողում լարվածությունների գրանցման ֆիզիկական եռաչափ մոդելավորման ստենդի մշակումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխ. գիտ. սերիա.- Երևան, 2022. - Հ. LXXV, N 2.- Էջ. 230-238:

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 27.12.2023:

Л.А. МАНУКЯН, В.В. ОВАКИМЯН

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ ВЛИЯНИЯ
ЕСТЕСТВЕННОГО СКЛОНА ГОРЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТА
НАГОРНОГО КАРЬЕРА**

В условиях юго-западного борта Каджаранского карьера ЗАО “Зангезурский ММК”, нагруженного естественным склоном горы, трехосным физическим моделированием определена максимальная высота естественного склона горы, простирающегося от верхней бровки борта карьера, в пределах которого масса горных пород влияет на напряженно-деформированное состояние борта карьера.

С целью решения поставленной задачи использован трехмерный модельный стенд, состоящий из нижней неподвижной и верхней подвижной призм. На основе проведенных исследований, принимая борт карьера и простирающийся от верхней его бровки естественный склон как одно геомеханическое целое, с помощью современной расчетной программы расчета устойчивости определена возможная поверхность скольжения борта, пересекающая естественный склон в точке, характеризующей его максимальную высоту. Показано, что простирающийся от верхней бровки борта карьера естественный склон со своей полной высотой не влияет на напряженно-деформированное состояние и устойчивость исследованного борта карьера.

Ключевые слова: естественный склон, нагорный карьер, борт карьера, модель, тензодатчик, призма, напряженно-деформированное поле.

L.A. MANUKYAN, V.V. NOVAKIMYAN

**DETERMINING THE MAXIMUM HEIGHT OF IMPACT OF THE
NATURAL MOUNTAIN SLOPE ON THE STABILITY OF THE OPEN-PIT
WALL**

By implementing 3D physical modeling investigations, the maximum height of the non-exposed mountain slope extending over the last bench of the open-pit overall slope in loading conditions, as an example of the South-West wall of the Qajaran open-pit mine “Zangezur MMC” CJSC is considered, in which the extended rock masses affect the stress-strain state of the inter-wall rock mass.

The problem is solved by using the constructed 3D physical modeling stand consists of lower immobile and upper moveable prisms. By considering the open-pit wall and the non-exposed mountain rock mass as one geomechanical environment, assessing the critical slip surface by using the well-known stability analysis software, the maximum height of the mountain slope is determined. It is shown that the natural mountain slope, extending above the last bench of the open-pit wall does not impact on the stress-strain field, and hence the stability, of the inter-wall rock mass of its overall height.

Keywords: natural mountain slope, open-pit mine, open-pit wall, model, strain-gauge, stress-strain field.

Ա.Թ. ԲԱՂԴԱՍԱՐՅԱՆ, Ս.Վ. ՄԱՍՅԱՆ

**«ՊԱՇԱՐՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ԱՌԱՎԵԼԱԳՈՒՅՆ ԽՈՐՈՒԹՅՈՒՆ»
ԿՈՆԴԻՑԻԱՅԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԻ ՀԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄԸ ՊՂՆՁԱՍՈԼԻԲԴԵՆԱՅԻՆ
ՇՏՈԿՎԵՐԿԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՎԱՅՐԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ**

Ներկայում շահագործվող պղնձամոլիբդենային հանքավայրի պայմանների դեպքում իրականացվել է պաշարների հաշվարկման առավելագույն խորության հիմնավորումը: Պաշարների հաշվարկման առավելագույն խորությունը այդ պաշարների յուրացման համար ստեղծվող բացահանքի օպտիմալ խորությունն է, որը որոշվում է մակաբացման սահմանային և եզրագծային գործակիցների հավասարության պայմանից: Վերջիններիս հաշվարկված արժեքների համեմատությամբ որոշվել է պաշարների հաշվարկման առավելագույն խորությունը:

Առանցքային բառեր. հանքավայր, բացահանք, մակաբացման սահմանային գործակից, բացահանքի օպտիմալ խորություն:

Ներածություն: Հայտնի է, որ հանքավայրերի տնտեսական ներուժը մեծապես կախված է դրանցում հանքաքարի ու օգտակար բաղադրիչների հաշվեկշռային պաշարների քանակից և որակից: Իր հերթին, հաշվեկշռային պաշարների քանակը մեծապես կախված է դրանց հաշվարկման համար կիրառվող կոնդիցիաների պարամետրերից, մասնավորապես՝ «պաշարների հաշվարկման առավելագույն խորություն» կոնդիցիայի պարամետրից: Հաշվեկշռային պաշարների որակը որոշվում է դրանցում օգտակար բաղադրիչների տեսակներով և պարունակություններով ու կախված է կոնդիցիաների պարամետրեր հանդիսացող պարունակությունների սահմանաքանակներից (օգտակար բաղադրիչի եզրագծային, նվազագույն արդյունաբերական պարունակությունները, նվազագույն պարունակությունը հատույթում և նվազագույն պարունակությունը հանքային մարմնի տարածման միջակայքում): Միննույն ժամանակ, մետաղական հանքավայրերի հաշվեկշռային պաշարների հաշվարկման և դրանց շահագործման նախագծերի մշակման ժամանակ շատ հաճախ անտեսվում է «պաշարների հաշվարկման առավելագույն խորություն» կոնդիցիայի պարամետրը կամ հաշվարկվում է սխալ մեթոդաբանության կիրառմամբ: Հետևաբար, վերջինիս հիմնավորման խնդիրը արդիական է:

Սույն հետազոտության նպատակն է պոնձամոլիդենային շտոկվերկային հանքավայրի պայմաններում հիմնավորել «պաշարների հաշվարկման առավելագույն խորություն» կոնդիցիայի պարամետրը՝ մակաբացման սահմանային և եզրագծային գործակիցների հավասարության պայմանի հիման վրա:

Խնդրի դրվածքը և հետազոտության մեթոդիկան: Խնդիրը պարունակությունների սահմանաքանակների կիրառմամբ հանքային մարմնի եզրագծման և ստացված եզրագծերում՝ մակաբացման սահմանային ու եզրագծային գործակիցների հավասարեցմամբ պաշարների հաշվարկման սահմանային խորության որոշումն է:

Պաշարների հաշվարկման առավելագույն խորությունը այդ պաշարների յուրացման համար ստեղծվող բացահանքի օպտիմալ խորությունն է (H_o , u), որը որոշվում է մակաբացման սահմանային (K_u) և եզրագծային (K_e) գործակիցների հավասարության պայմանից [1, 2].

$$K_u = K_e: \quad (1)$$

Մակաբացման սահմանային գործակիցը որոշվում է երկու դեպքի համար [2, 3].

1) երբ հանքավայրի մշակումը տնտեսապես նպատակահարմար է միայն բաց եղանակով,

2) երբ հանքավայրի մշակումը տնտեսապես նպատակահարմար է բաց-ստորգետնյա համակցված եղանակով:

Սույն հետազոտությունում դիտարկվող պոնձամոլիդենային հանքավայրի մշակումը տնտեսապես նպատակահարմար է միայն բաց եղանակով, ուստի այստեղ կդիտարկվի միայն 1-ին դեպքը:

Երբ հանքավայրի մշակումը տնտեսապես նպատակահարմար է միայն բաց եղանակով, մակաբացման սահմանային գործակիցը (K_u , u/u_n) որոշվում է հետևյալ բանաձևով [3].

$$K_u = \alpha_{u,u} b_1 - b_2, \quad (2)$$

որտեղ $\alpha_{u,u}$ – ն բացահանքի սահմանային խորության վրա օգտակար բաղադրիչի պարունակությունն է, $\%(q/u)$.

$$b_1 = \frac{Q_{ju} K_n}{(b - \theta) \sigma'_{u,h,lg}}, b_2 = \frac{Q_{ju} \theta}{(b - \theta) \sigma'_{u,h,lg}} + \frac{\sigma'_{u,ul}}{\sigma'_{u,h,lg}},$$

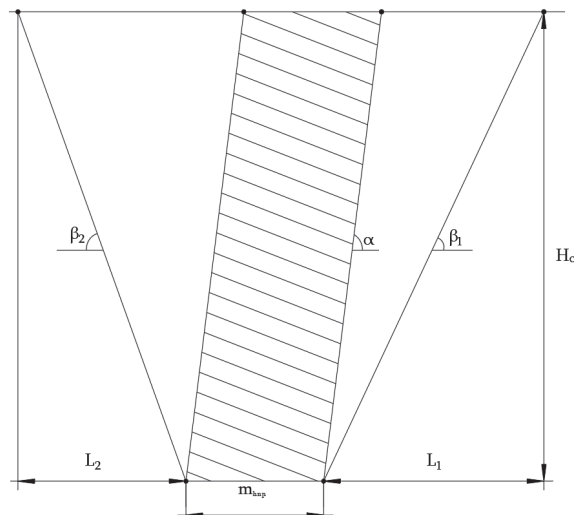
որտեղ Q_{ju} -ն խտանյութի գինն է, q_{ju}/u_n ($\$/u$), K_n -ն՝ արդյունահանման ժամանակ հանքաքարի որակի փոփոխման գործակիցը, u/h u/h u/h , b – ն՝ տվյալ տեսակի հանքաքարերի հարստացման դեպքում հարստապոչերում օգտակար բաղադրիչի

պարունակության որոշման բանաձևում հաստատուն գործակիցը, $\% (q/տ)$, θ – ն՝ հարստապոչերում օգտակար բաղադրիչի պարունակությունը, $\% (q/տ)$, $\sigma'_{ս.հ.լց}$ – ն՝ մակաբացման ապարների հեռացման և լցակույտառաջացման ծախսերի համամասնական մասը, $դրամ/տ (\$/տ)$, $\sigma'_{ս.լ}$ – ն՝ հանքաքարի արդյունահանման և վերամշակման ծախսերի (առանց մակաբացման ծախսերի) համամասնական մասը, $դրամ/տ (\$/տ)$:

Մակաբացման եզրագծային գործակիցը երկրի մակերևույթի հարթ ռելիեֆի և երկրաբաձգված հանքամարմնի մշակման դեպքում (նկ. 1) որոշվում է հետևյալ գծային հարաբերությամբ [4].

$$K_t = \frac{H_o(ctg\beta_1 + ctg\beta_2)}{m_{hnp}}, \quad (3)$$

որտեղ H_o -ն բացահանքի օպտիմալ խորությունն է, $մ$, β_1 -ը և β_2 -ը՝ հանքամարմնի պառկած և կախված կողերի կողմից բացահանքի կողերի թեքման անկյունները, $աստիճան$, m_{hnp} -ը՝ հանքամարմնի հորիզոնական հզորությունը, $մ$:



Նկ. 1. Մակաբացման եզրագծային գործակիցի որոշման սխեման հարթ ռելիեֆի և երկրաբաձգված հանքամարմնի մշակման դեպքում

(3) բանաձևից որոշելով H_o -ի մեծությունը և հաշվի առնելով (1) պայմանը, կստանանք բացահանքի օպտիմալ խորության որոշման հետևյալ բանաձևը.

$$H_o = \frac{K_t m_{hnp}}{ctg\beta_1 + ctg\beta_2}:$$

Հետազոտության արդյունքները: Հետազոտություններն իրականացվել են ներկայում շահագործվող պղնձամոլիբդենային հանքավայրի պայմանների հաշ-

վառմամբ, որը ներկայացված է մեկ հանքային մարմնով՝ շտոկվերկով, որտեղ առկա են համեմատաբար աղքատ պղինձ-մոլիբդենային հանքաքարեր՝ պղնձի 0,5 %-ից ցածր և մոլիբդենի մինչև 0,03 % պարունակություններով [5, 6]:

Հանքային մարմինը հստակ արտահայտված երկրաբանական սահմաններ չունի և սահմանագծվում է եզրագծային պարունակությամբ: Այդ պարամետրի փոփոխությունը, բնականաբար, հանգեցնում է օգտակար հանքակուտակի սահմանների համապատասխան փոփոխության: Ընդհանուր առմամբ հանքային մարմինը հատակագծում ունի էլիպսոիդի ձև, ձգված միջօրեականի ուղղությամբ 1,5 կմ, իսկ հորիզոնական հզորությունը հասնում է 300,0 մ-ի: Հետախուզման խորությունը կազմում է ավելի քան 600...650 մ: Դրա ձևաբանությունը կանխորոշվում է սպիտակավուն պորֆիրանման գրանոդիորիտների շտոկի և պարփակող գրանոսիենիտների արտահայտմային գոտու եզրաձևով, այդ պատճառով շտոկվերկի ծավալային գծապատկերը կենտրոնական մասում ունի սալանման ձև և բնորոշվում է արևմտյան անկումով: Շտոկվերկը ներկայացված է նրբերակացանավոր հանքայնացմամբ: Նրբերակների հզորությունը տատանվում է մի քանի միլիմետրերից մինչև 2,0...3,0 մմ, հազվադեպ՝ 5,0...6,0 մմ: Խալկոպիրիտի, առավել ևս՝ մոլիբդենիտի միամիներալային նրբերակները հազվադեպ են հանդիպում:

Շտոկվերկային հանքայնացման ընդհանուր ֆոնին շատ հազվադեպ են հանդիպում եզակի հանքերակներ՝ մինչև 0,3...0,4 մ հզորությամբ ու 15...20 մ տարածմամբ:

Բացի ցաներից, լայնորեն զարգացած են մոլիբդենիտի, այսպես կոչված, «քսվածքները» և խալկոպիրիտի տրորված փոշենման կուտակումները բարակ փառերի տեսքով՝ ճեղքերի տարակողմնորոշված հարթությունների վրա:

Տիպական ցանցային տեքստուրա են կազմում անհանք քվարցային նրբերակները, որոնք աչքի են ընկնում համեմատաբար լայն տարածվածությամբ:

Հանքայնացումը համեմատաբար հավասարաչափ է. պղնձի և մոլիբդենի պարունակությունների փոփոխականության գործակիցներն ըստ տարածման կազմում են համապատասխանաբար 65...75% և 75...80%, իսկ տարածմանը խաչադիր ուղղությամբ՝ 50...65% և 60...75%:

Հանքայնացման ուղղաձիգ գոտիականությունը պարզորոշ չի արտահայտված, և առանձին տեղամասերում դրսևորվում է ըստ խորության պղնձի պարունակության հարաբերական նվազմամբ ու մոլիբդենի պարունակության հարաբերական աճով:

Հանքայնացման տեղայնացմանը նպաստող գործոններից որոշակի դեր ունեն կառուցվածքային տարրերը:

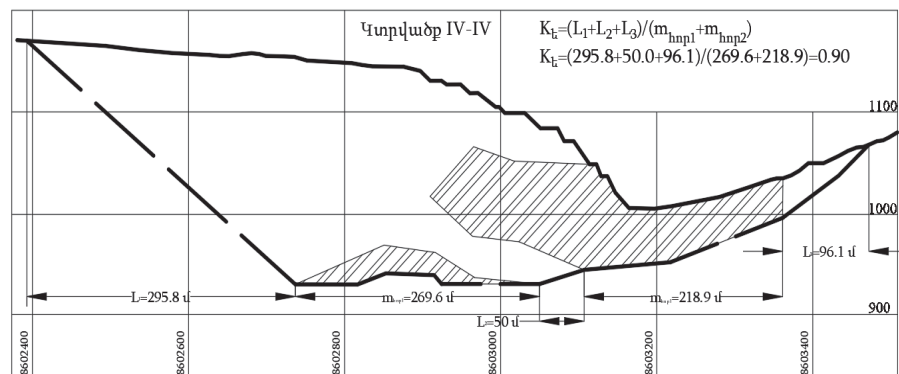
Հանքավայրը՝ ըստ երկրաբանական կառուցվածքի բարդության և «Պինդ օգտակար հանածոների հանքավայրերի պաշարների և կանխատեսումային ռեսուրսների դասակարգման» [7]՝ վերագրվում է 2-րդ խմբին:

Հանքային մարմնի արդյունաբերական եզրագծերը անցկացվել են հիմնավորված եզրագծային պարունակության, ինչպես նաև պաշարների հաշվարկում ներառվող դատարկ ապարների և ոչ կոնդիցիոն հանքաքարերի առավելագույն թույլատրելի միջակայքերի երկարության կիրառմամբ: Հանքաքարի պաշարների եզրագծումն իրականացվել է պղնձի ու մոլիբդենի պարունակությունների՝ ստորև բերվող փոխլրացնող շարքերի կիրառմամբ:

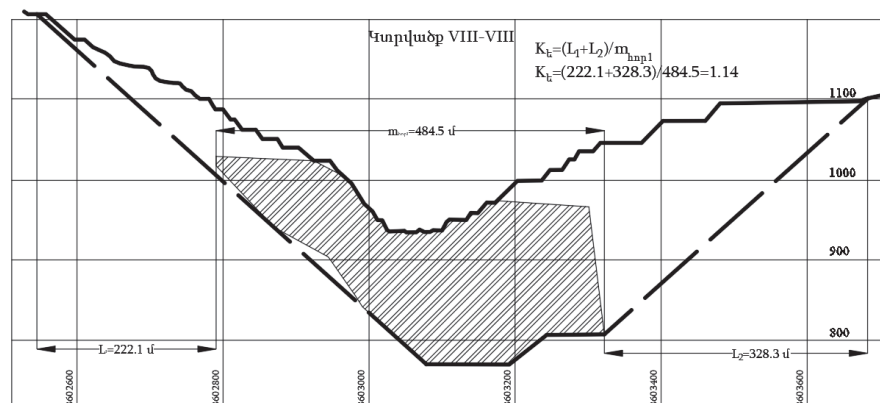
$\alpha^{Cu}, \%$	0,218	0,200	0,180	0,160	0,140	0,120	0,100	0,080	0,060	0,000
$\alpha^{Mo}, \%$	0,0	0,0084	0,0140	0,0196	0,0252	0,0308	0,0364	0,0419	0,0475	0,0498

Ինչպես երևում է փոխլրացնող շարքերի տվյալներից, եզրագծային պարունակությունն ըստ պղնձի կազմել է 0,218 %, իսկ ըստ մոլիբդենի՝ 0,0498 %:

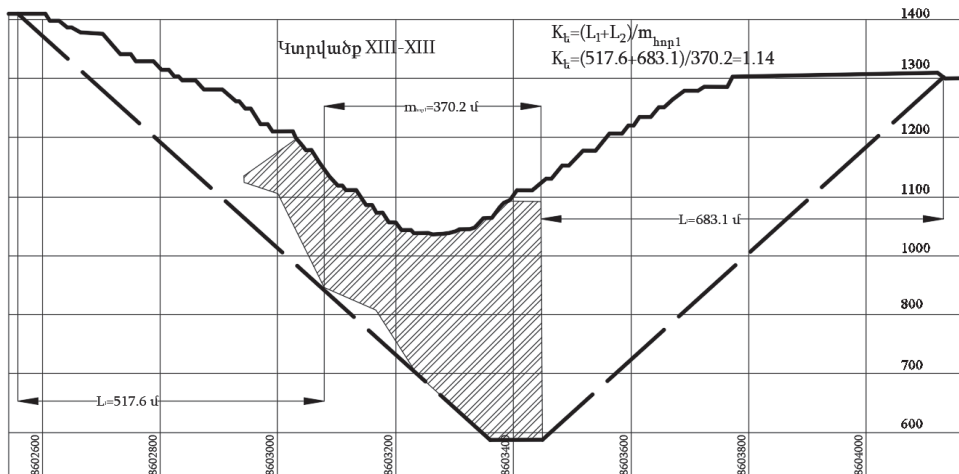
Պաշարների եզրագծումից հետո 19 հետախուզագծի վրա կառուցվել են հանքամարմնի լայնական կտրվածքները, որոնցից ամենաբնութագրականների սխեմատիկական պատկերները բերված են նկ. 2-ում:



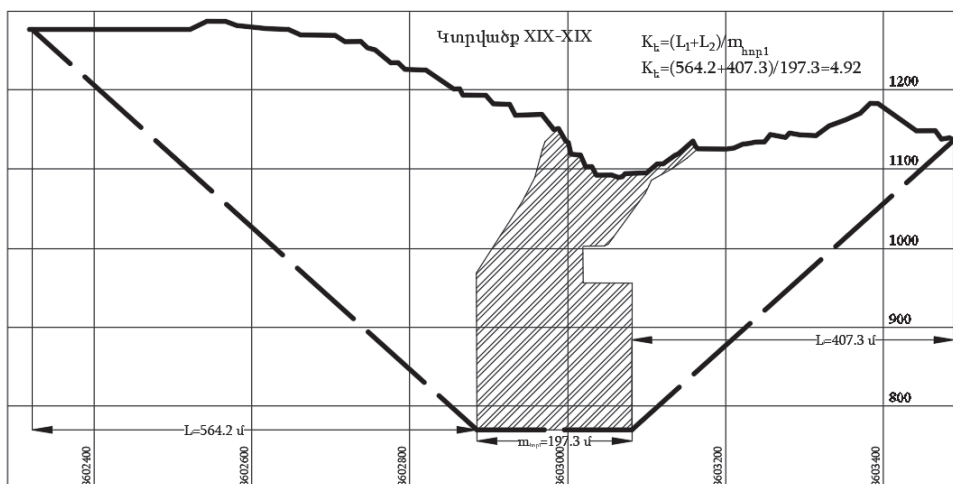
ա)



բ)



զ)



ը)

Նկ. 2. Պղնձամուլիբդենային հանքավայրի պայմաններում մակաբացման եզրագծային գործակցի որոշման սխեմատիկական պատկերը՝ ըստ հետախուզագծերի վրա կառուցված եզրագծերի.

 հանքային մարմնի եզրագծերը,
  բացահանքի եզրագծերը,
  երկրի մակերևույթի եզրագծերը,
 8603000 կոորդինատային ցանց՝ ARM WGS 84 համակարգով

Մակաբացման եզրագծային գործակցի միջին մեծության հաշվարկման արդյունքները՝ ըստ հետախուզագծերի վրա կառուցված կտրվածքների, ամփոփված են աղ. 1-ում:

Աղյուսակ 1

Մակաբացման եզրագծային գործակցի միջին մեծության հաշվարկը՝ ըստ
հետախուզագծերի վրա կառուցված կտրվածքների

Հ/հ	Կտրվածքը	Մակաբացման եզրագծային գործակցի մեծությունը, մ/մ
1	II-II	0,6
2	III-III	0,73
3	IV-IV	0,90
4	V-V	0,24
5	VI-VI	1,32
6	VII-VII	1,62
7	VIII-VIII	1,14
8	IX-IX	1,58
9	X-X	2,46
10	XI-XI	1,15
11	XII-XII	6,10
12	XIII-XIII	3,24
13	XIV- XIV	6,27
14	XV- XV	5,70
15	XVI- XVI	5,21
16	XVII-XVII	5,53
17	XVIII-XVIII	13,66
18	XIX-XIX	4,92
19	XX-XX	5,86

Մակաբացման սահմանային գործակցի մեծության հաշվարկման արդյունքները բերված են աղ. 2-ում:

Աղյուսակ 2

Մակաբացման սահմանային գործակցի հաշվարկման արդյունքները

№	Ցուցանիշների անվանումները	Չափ. միավ.	Ցուցանիշները՝ ըստ բաղադրիչների		
			Cu	Mo	Cu _{ապ}
1	2	3	4	5	6
1	Պարունակությունը մարվող հանքաքարում, α	%	0,353	0,0183	0,415
2	Պարունակությունը վերամշակվող հանքաքարում, α_v	%	0,322	0,0166	0,378
3	Պարունակությունը հարստացման պոչանքներում, θ	%	0,089	0,0055	0,1055

Աղյուսակ 2-ի շարունակությունը

1	2	3	4	5	6
4	Պարունակությունը խտանյութերում, β	%	23,81	48,51	27,3
5	Խտանյութի ելքը, γ	մ/հալ. մաս	0,00981	0,00023	0,01003
6	Խտանյութի գինը, Φ	\$/տ	1077,5	8144,9	1237,7
7	Մոլիբդենի փոխարկման գործակիցը, K_{ϕ}	մ/հալ. մաս	-	-	3,40
8	Հանքաքարի արդյունահանման ծախսերը (առանց մակաբացման ծախսերի), Σ_w	\$/տ	2,6		
9	Մակաբացման ապարների հեռացման ու լցակույտառաջացման ծախսերը, $\Sigma_{d.h.g}$	\$/տ	1,1		
10	Հանքաքարի հարստացման ծախսերը, Σ_l	\$/տ	5,0		
11	Մակաբացման սահմանային գործակիցը, K_w	տ/տ	4,51	-4,15	6,27

Համադրելով աղ. 1-ի և աղ. 2-ի տվյալները, տեսնում ենք, որ հաշվարկված մակաբացման սահմանային գործակցի մեծությունը՝ 6.27 տ/տ, համապատասխանում է XIV - XIV կտրվածքում ստացված մակաբացման եզրագծային գործակցի մեծությանը, այսինքն այստեղ տեղի է ունենում (1) պայմանը՝ $K_w = K_{kz}$:

Եզրակացություն: Շտոկվերկային երկարաձգված հանքային մարմնով ներկայացված պղնձամոլիբդենային հանքավայրի պայմաններում XIV- XIV կտրվածքին համապատասխանող բացահանքի խորությունը բացահանքի օպտիմալ խորությունն է կամ պաշարների հաշվարկման առավելագույն խորությունը, ըստ որի դիտարկվող պղնձամոլիբդենային հանքավայրի պաշարների յուրացումը տնտեսապես նպատակահարմար է իրականացնել մինչև 530 մ բացարձակ նիշ ունեցող հորիզոնը, չնայած այն հանգամանքին, որ դրանից ներքև գտնվող որոշ հաշվարկային բլոկներ կարող էին համարվել հաշվեկշռային՝ ըստ պարունակությունների սահմանաքանակների մեծությունների:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Агабян Ю.А.** Теория и практика оптимального освоения недр.- М.: Недра, 1994.- 176 с.
2. **Агабян Ю.А.** Общая теория оптимального освоения недр (твердые полезные ископаемые).- Saarbrücken (Германия): Palmarium Academic Publishing, 2015.- 288 с.

3. Աղաբալյան Յու.Ա., Հովյաննիսյան Ա.Հ., Բաղդասարյան Ա.Թ. Պինդ օգտակար հանածոների հանքավայրերի արդյունաբերական գնահատում և մշակման պարամետրերի օպտիմալացում: Դասագիրք / ՀԱՊՀ.-Եր.: Ճարտարագետ, 2017.- 260 էջ:
4. Арсентьев А.И. Определение производительности и границ карьеров.- М.: Недра, 1970.- 319 с.
5. Асланян А.Т. Региональная геология Армении.- Ереван: Айпетрат, 1958.- 431с.
6. Геология СССР. Том XLIII. Армянская ССР. Геологическое описание.- М.: Недра, 1970.- 464с.
7. Պինդ օգտակար հանածոների հանքավայրերի պաշարների և կանխատեսումային ռեսուրսների դասակարգում (հաստատված է ՀՀ կառավարության 14.03.2013թ. № 274-Ն որոշմամբ) // ՀՀ պաշտոնական տեղեկագիր. – 10.04.2013. - № 19(959):

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 27.12.2023:

А.Т. БАГДАСАРЯН, С.В. МАМЯН

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА КОНДИЦИИ “МАКСИМАЛЬНАЯ ГЛУБИНА ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ” В УСЛОВИЯХ ШТОКВЕРКОВОГО МЕДНО-МОЛИБДЕНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Для условий эксплуатируемого медно-молибденового месторождения обоснована максимальная глубина подсчета запасов. Предельной глубиной для подсчета запасов является оптимальная глубина карьера, создаваемого для эксплуатации этих запасов, которая определяется условием равенства граничного и контурного коэффициентов вскрыши. Путем сравнения расчетных значений последних определена максимальная глубина подсчета запасов.

Ключевые слова: месторождение, карьер, граничный коэффициент вскрыши, оптимальная глубина карьера.

A.T. BAGHDASARYAN, S.V. MAMYAN

JUSTIFICATION OF THE CONDITION PARAMETER “MAXIMUM DEPTH OF RESERVE CALCULATION” UNDER THE CONDITIONS OF COPPER-MOLYBDENUM DEPOSIT

For the conditions of the exploited copper-molybdenum deposit, the maximum depth for calculating reserves is justified. The maximum depth for calculating reserves is the optimal depth of the quarry created for the exploitation of these reserves, which is determined by the condition of equality of the boundary and contour stripping ratios. By comparing the calculated values of the latter, the maximum depth for calculating reserves is determined.

Keywords: deposit, quarry, limiting stripping ratio, optimal quarry depth.

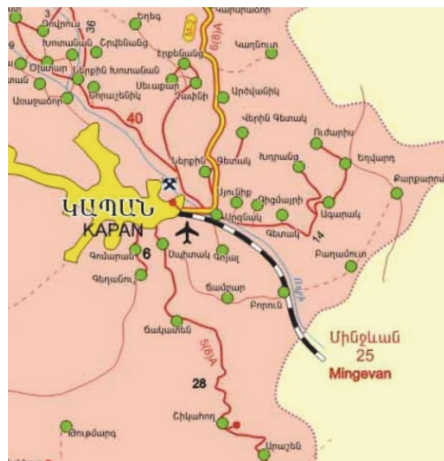
Հ.Ա. ԱՐՄԱՂԱՆՅԱՆ

ՇԱՀՈՒՄՅԱՆԻ ՈՍԿԻ-ԲԱԶՄԱՄԵՏԱՂԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՎԱՅՐԻ ՍՏՈՐԳԵՏՆՅԱ ՄՇԱԿՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ներկայումս ստորգետնյա հանքում կիրառվում են մշակման երկու՝ վարընթաց և վերընթաց կարգով ենթահարկային շտրեկներից հանքաքարի պոկմամբ և դատարկ ապարներով հանությամբ տարածության լցափակմամբ մշակման համակարգերը: Ստորգետնյա հանքում կիրառվող հանքաքարի արդյունահանման տեխնոլոգիաների արդյունավետության բարձրացման համար առաջարկվում են տարբերակներ: Այդ առաջարկներն ուղղված են հանքաքարի աղքատացման նվազեցմանը և կորուստների կրճատմանը:

Առանցքային բառեր. հանքաքար, հանքային մարմին, մշակման համակարգ, ենթահարկ, հարկ:

Ներածություն: Շահումյանի ոսկի-բազմամետաղային հանքավայրը գտնվում է Հայաստանի Հանրապետության Սյունիքի մարզում՝ Խոտհարքասար-Առաջածոր լեռան հարավարևելյան վերջավորությունում, և տեղադրված է Ողջի գետի ու նրա ձախ վտակ Աճանանի միջև (նկ. 1) [1-3]:



Նկ. 1. Շահումյանի ոսկի-բազմամետաղային հանքավայրի շրջանի ակնարկային քարտեզը

Ձևաբանորեն Շահումյանի հանքավայրի հանքային մարմինները ներկայացված են հանքերակներով և հանքերակային (միներալացած) գոտիներով:

Հանքային մարմինների տարածումը, որպես կանոն, մերձլայնական է (260...300°), մեծ մասամբ դեպի հարավ 70...80° անկմամբ:

Հանքամարմինների ձևաչափական պարամետրերն են. ըստ տարածման երկարությունները տատանվում են մի քանի տասնյակ մետրից մինչև 600 մ, իսկ ուղղաձիգ տարածվածությունը՝ 150...450 մ:

Շահումյանի ստորգետնյա հանքի տարեկան արտադրողականությունը սահմանվել է 600 հազ. տ/տարի չափով:

Համաձայն 1983թ. շահագործման նախագծի՝ հանքավայրը սկսել է շահագործվել երկու մշակման համակարգով.

1. Հանքամարմինների մինչև 3 մ հզորության դեպքում պահեստից հանքաքարի պայթանցային լիցքերով պոկմամբ:

2. Ենթահարկերից վերընթաց և վարընթաց հովհարաձև հորատանցքային լիցքերով հանքաքարի պոկմամբ և դաշտային շտրեկից մուտքային փորվածքներով հանքաքարի առբերմամբ:

Մինչև 2005թ. կիրառվել է հիմնականում երկրորդ մշակման համակարգը, որը բնութագրվել է արտաչափների բարձր ելքով, առաջնային և երկրորդային աղքատացման բարձր ցուցանիշներով և աշխատանքի ցածր արտադրողականությամբ:

Հետագայում ընդերքօգտագործման իրավունքը ձեռք բերած «Դինո Գոլդ Մայնինգ Քամփանի» ՓԲԸ-ն վերը նշված թերությունների պատճառով հրաժարվել է այդ մշակման համակարգից, իսկ պահեստավորումով համակարգից՝ նաև ապարների տնայնդեղիության հսկման և հանքաքարի անվտանգ առբերման պատճառով:

Ներկայումս ստորգետնյա հանքում կիրառվում է մշակման երկու համակարգ.

- 1-ին՝ վարընթաց կարգով ենթահարկային շտրեկներից հանքաքարի պոկմամբ և դատարկ ապարներով հանությային տարածության լցափակմամբ (նկ. 2),

- 2-րդ՝ վերընթաց կարգով ենթահարկային շտրեկներից հանքաքարի պոկմամբ և դատարկ ապարներով հանությային տարածության լցափակմամբ (նկ. 3):

Ստորև բերվում է վերոնշյալ մշակման համակարգերի հակիրճ նկարագրությունը:

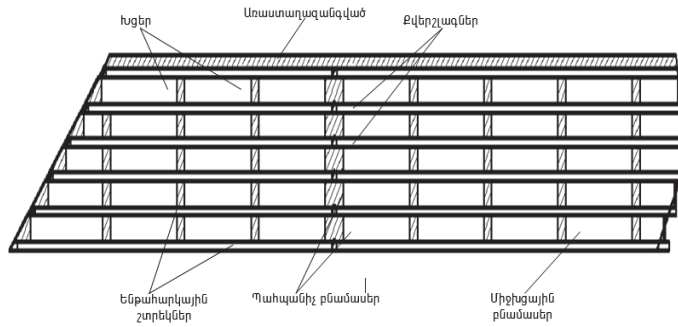
1-ին մշակման համակարգի հիմնական առավելություններն են.

- ✓ աշխատանքների իրականացման մեքենայացման լայն հնարավորությունները,

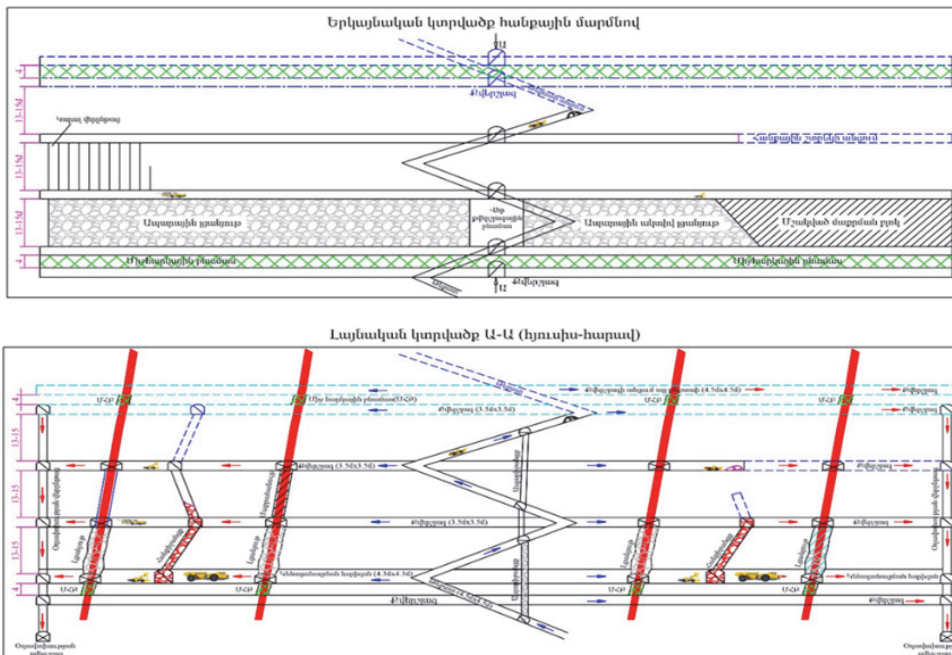
- ✓ աշխատանքների իրականացման անվտանգության համեմատաբար ցածր ռիսկերը, քանի որ հորատողը գործընթացն իրականացնում է ամրակապված, կառավարելի առաստաղի պաշտպանության տակ,

- ✓ լեռնային զանգվածի առբերումն իրականացվում է ինքնագնաց տեխնիկայով:

1-ին մշակման համակարգի հիմնական թերությունը հանքաքարի գերադ-
քատացումն է:



Նկ. 2. Մշակման համակարգը՝ վարընթաց կարգով ենթահարկային շտրեններից հանքաքարի պոկմամբ և դատարկ ապարներով հանության տարածության լցափակմամբ



Նկ. 3. Մշակման համակարգը՝ վերընթաց կարգով ենթահարկային շտրեններից հանքա-
քարի պոկմամբ և դատարկ ապարներով հանության տարածության լցափակմամբ

2-րդ մշակման համակարգի հիմնական առավելությունները նույնական են 1-ին մշակման համակարգի հետ՝ ավելացրած հանության ճեղքի լայնության և երկրորդային աղքատացման նվազեցումը:

Խնդրի դրվածքը: Արդի գիտատեխնիկական առաջընթացի պայմաններում, անկասկած, չափազանց կարևորելով հատկապես հանքաքարի մաքրահանման տեխնոլոգիական գործընթացների մեքենայացման աստիճանի բարձրացման խնդիրը, այն, սակայն, չի կարող անվերապահորեն դիտվել որպես փոքր հզորությամբ հանքամարմինների մշակման համակարգերի կատարելագործման առաջնային նշանակությամբ միջոցառում: Վերջինս, հանքախորշում բանվորի աշխատանքի արտադրողականության բարձրացման շնորհիվ, ուղղված լինելով հանքաքարի արդյունահանման ինքնարժեքի կրճատմանը, չի կարող պատասխանել ընդերքից օգտակար հանածոյի կորզման որակաքանակական ցուցանիշների բարելավմանն առնչվող հարցերին:

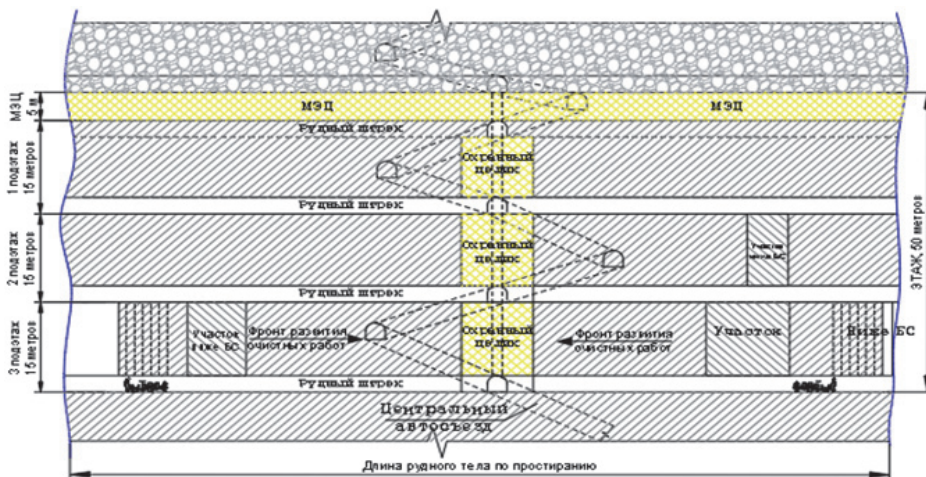
Այդ իմաստով գերիշխող դեր ունի մաքրման տարածության լայնությունը, որի նվազագույն մեծությունն ընդունվում է՝ ելնելով զանգվածից հանքաքարի պոկման և բացթողման, ինչպես նաև մաքրման տարածությունում լեռնային սարքավորումների տեղավորման և ամրակապի տեղադրման պայմանից: Ուստի, որքան մեծ է մաքրման տարածության լայնությունը, այնքան բարձր են հանքաքարի հանույթի տեխնոլոգիական գործընթացների իրականացման, այդ թվում՝ նաև լեռնային մեքենաների, սարքավորումների և մեքենայացված համալիրների օգտագործման համար հարմարավետ պայմաններ ստեղծելու անհրաժեշտությամբ թելադրված հանքախորշային բանվորների աշխատանքի արտադրողականությունն ու մշակման ինտենսիվությունը և հակառակը:

Անկախ հանքամարմնի հզորությունից՝ մաքրման տարածության լայնության մեծացումը, ի հաշիվ կողային ապարների պոկման, հանգեցնում է արդյունահանման ժամանակ հանքաքարի որակի փոփոխման գործակցի փոքրացմանը, որի հարուցած տնտեսական վնասը որոշակի պայմաններում, աշխատանքի արտադրողականության բարձրացմամբ պայմանավորված, կարող է գերազանցել հանքաքարի արդյունահանման կրճատվող ծախսերը [4]: Իսկ եթե մաքրման տարածության լայնության մեծացումը պայմանավորված է հանքամարմնի հզորության աճով, ապա հնարավորություն է առաջանում՝ լավացնելու ոչ միայն աշխատանքային պայմանները, այլ նաև հանքաքարի արդյունահանման որակական ցուցանիշները: Հետևաբար, հանքաքարի մաքրահանման աշխատանքների մեքենայացման աստիճանի բարձրացման խնդիրը, որպես մշակման համակարգի կատարելագործման գերակա ուղղություն, կարելի է միանշանակ ընդունելի համարել հանքամարմնի համեմատաբար մեծ հզորության պայմաններում:

Հետազոտության արդյունքները: Ստորգետնյա հանքում կիրառվող հանքաքարի արդյունահանման տեխնոլոգիաների արդյունավետության բարձրացման համար առաջարկվում են.

1. Վարընթաց կարգով ենթահարկային շտրեկներից հանքաքարի պոկմամբ և դատարկ ապարներով հանութային տարածության լցափակմամբ մշակման համակարգի դեպքում առաջարկվում է շահագործական հարկի ողջ բարձրությամբ թեքատի անցկացում, որի ընթացքում իրականացվում են վերին և միջին ենթահարկերում նախապատրաստական աշխատանքներ՝ ենթահարկային շտրեկների անցկացում:

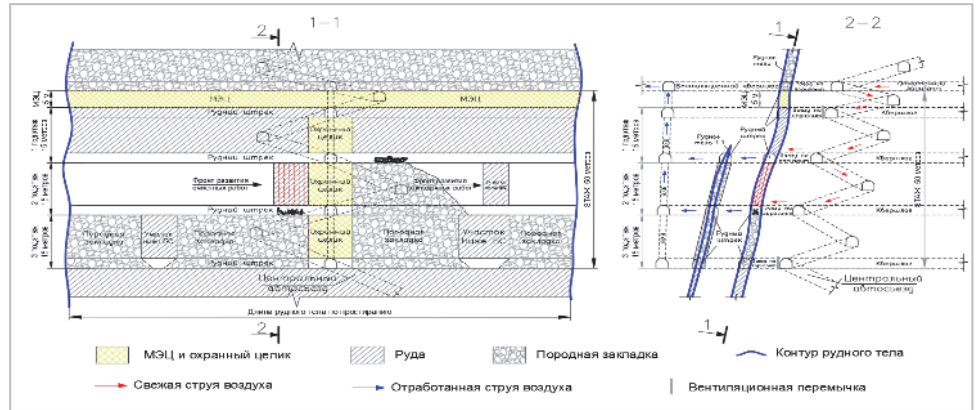
Նկ. 4-ում ներկայացված է վարընթաց կարգով ենթահարկային շտրեկներից հանքաքարի պոկմամբ և դատարկ ապարներով հանութային տարածության լցափակմամբ մշակման համակարգի դեպքում 1-ին՝ ստորին ենթահարկում հանքաքարի հանույթի հորատապայթեցման գործընթացը:



Նկ. 4. Վարընթաց կարգով ենթահարկային շտրեկներից հանքաքարի պոկմամբ և դատարկ ապարներով հանութային տարածության լցափակմամբ մշակման համակարգի դեպքում 1-ին ենթահարկում հանքաքարի հանույթի հորատապայթեցման գործընթացը

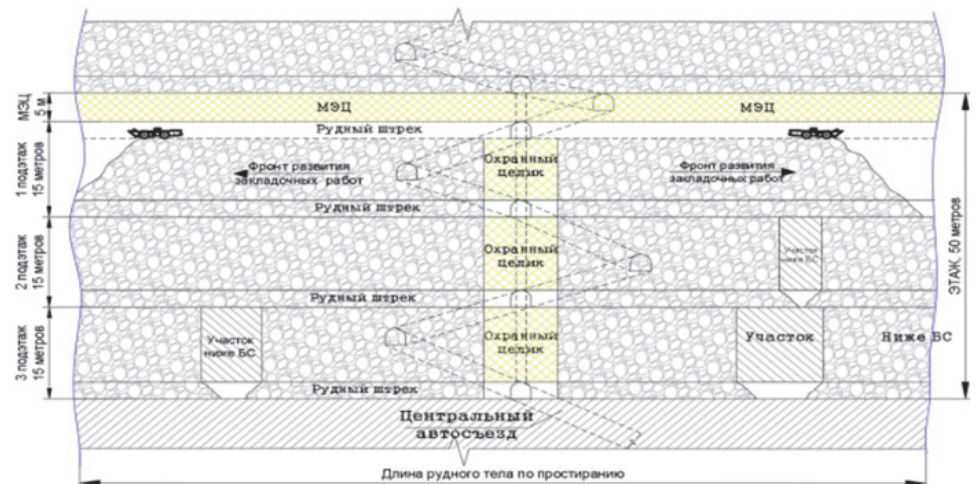
Այնուհետև՝ ստորին ենթահարկի հանքաքարի մաքրահանման աշխատանքներից հետո, միջին ենթահարկից ապարբարձիչ մեքենայով կատարում են դատարկ ապարներով հանութային տարածության հետադարձ լցափակում՝ պահպանելով անվտանգության կանոնները:

Նկ. 5-ում ներկայացված է վարընթաց կարգով ենթահարկային շտրեկներից հանքաքարի պոկմամբ և դատարկ ապարներով հանութային տարածության լցափակմամբ մշակման համակարգի դեպքում 2-րդ՝ միջին ենթահարկում հանքաքարի հանույթի հորատապայթեցման գործընթացը:



Նկ. 5. Վարընթաց կարգով ենթահարկային շտրեկներից հանքաքարի պոկմամբ և դատարկ ապարներով հանության տարածության լցափակմամբ մշակման համակարգի դեպքում 2-րդ ենթահարկում հանքաքարի հանույթի հորատապայթեցման գործընթացը

Վերևի ենթահարկը ամբողջովին մշակելուց հետո կատարվում է վերջին ենթահարկի հետադարձ լցափակում (նկ. 6), այդպիսով ներքևից վերև ամբողջովին լցափակելով շահագործական հարկը:



Նկ. 6. Վարընթաց կարգով ենթահարկային շտրեկներից հանքաքարի պոկմամբ և դատարկ ապարներով հանության տարածության լցափակմամբ մշակման համակարգի դեպքում վերջին փուլի գծապատկերը

Առաջարկության առավելությունները.

- ընդհանուր մերկացման մակերեսի փոքրացման հաշվին լեռնային աշխատանքների անվտանգության բարելավում,

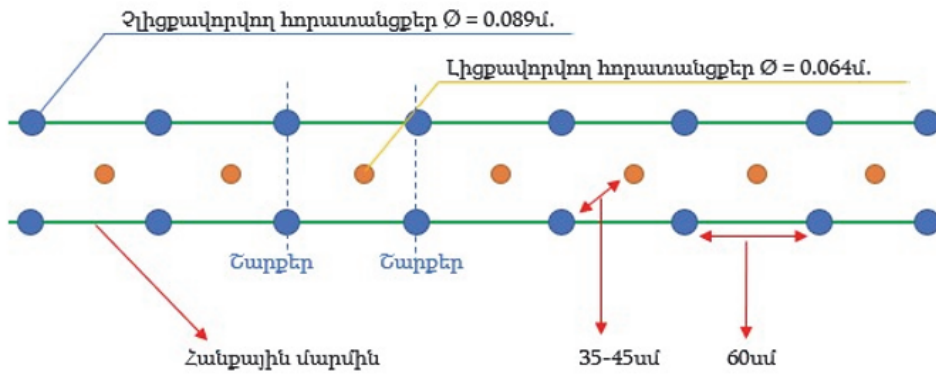


Նկ. 8. Ենթահարկային շտրեկներով՝ հանքաքարի ճեղքային հանությամբ մշակման համակարգի առաջարկվող տարբերակի դեպքում հանության ճեղքի պատկերը

3. Կիրառվող մշակման համակարգի արդյունավետության բարձրացմանն ուղղված փոքր հզորությամբ հանքային մարմինների հանքաքարի հանույթի հորատապայթեցման նոր սխեմա, որի նպատակը հանքաքարի աղքատացման ցուցանիշի և կորուստների նվազեցումն է:

Սխեմայի կիրառման համար ընտրվել է չափազանց բարակ՝ 0,2...0,6 մ հզորությամբ հանքերակը:

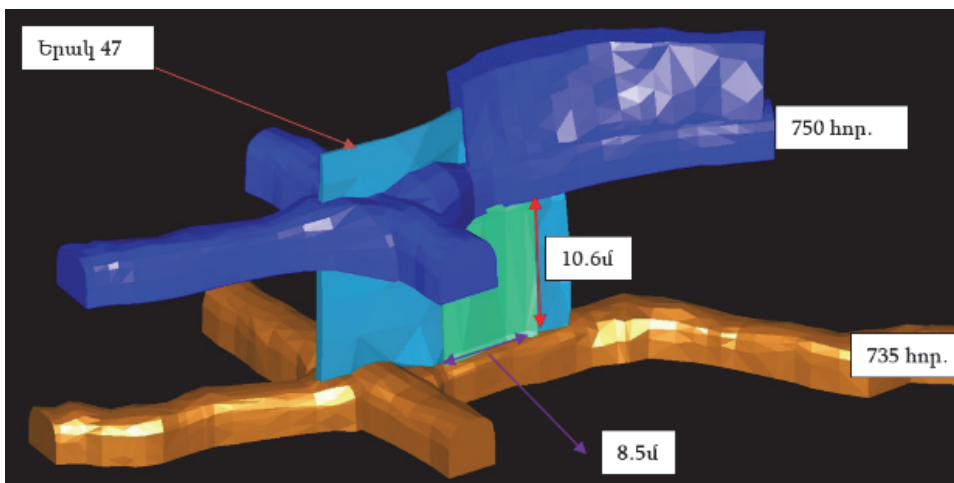
Առաջարկվում է հորատապայթեցման հետևյալ սխեման (նկ. 9), որը բավականին կնվազեցնի հանության ճեղքի նվազագույն լայնությունը:



Նկ. 9. Հորատապայթեցման առաջարկվող սխեման

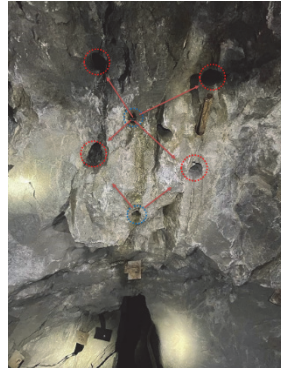
Հանության տեղամասի չափերը (նկ. 10).

- հանքային մարմնի միջին հզորությունը՝ 0,48 *ւ*,
- երկարությունը՝ 8,5 *ւ*,
- բարձրությունը՝ 10,6 *ւ*,
- հանության ճեղքի լայնությունը՝ 1 *ւ*:



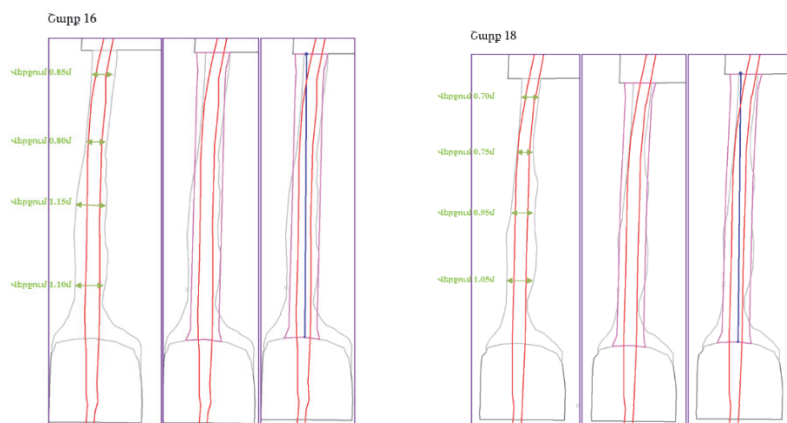
Նկ. 10. Հանության տեղամասի պատկերը

Նկ. 11-ում պատկերված է 64 և 89 *մ* տրամագծով հորատանցքերի դասավորության սխեման:



Նկ. 11. Հորատանցքերի դասավորության սխեման

Նկ. 12-ում ներկայացված են պայթեցման աշխատանքների ավարտից հետո մի քանի կտրվածքներ:



Նկ. 12. Հանությային ճեղքի գծապատկերը պայթեցումից հետո

Փորձը կարող ենք համարել հաջողված տվյալ տեղամասի դեպքում, սակայն հիմնավոր և վերջնական եզրահանգման համար անհրաժեշտ է սխեման կիրառել հանքավայրի տարբեր կառուցվածքներ և լեռնատեխնիկական իրավիճակ ունեցող տեղամասերում՝ դրա արդյունավետության գնահատականի համար: Հաշվի առնելով հանքավայրի բարդ երկրաբանաինժեներական կառուցվածքը, առաջարկվում է տվյալ սխեման կիրառել առնվազն 5 տարբեր տեղամասերում, որոնց վերլուծության արդյունքում հնարավոր կլինի հաշվարկել դրա ծախսատարությունը և տալ գնահատական՝ հետագա կիրառման համար:

Եզրակացություն: Ներկայացված առաջարկները, որոնք ուղղված են կիրառվող մշակման համակարգի արդյունավետության բարձրացմանը, կարող են հանգեցնել հանքաքարի աղքատացման ցուցանիշի նվազեցմանը և կորուստների կրճատմանը՝ նշանակալիորեն փոքրացնելով հանքաճեղքերի կողային ապարների փլուզման ռիսկն ու ընդհանուր մերկացման մակերեսը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Оганесян А.Г., Агабалян Ю.А. (мл.)** Зависимость качественно-количественных показателей запасов руды от технологии подземной добычи // Вестник государственного инженерного университета Армении. – Ереван, 2015. – N1. – С. 99–107.
2. **Հովհաննիսյան Ա.Հ., Ալավերդյան Հ.Հ., Տեփանոսյան Գ.Հ.,** Շահումյանի ոսկի-բազմամետաղային հանքավայրի բացման եղանակի հիմնավորումը // ՀՊՃՀ Լրաբեր. գիտական հոդվածների ժողովածու. – Երևան, 2012. – Մաս 2.-էջ 640-644:
3. **Սովսիսյան Ա.Հ.** Շահումյանի ոսկի-բազմամետաղային հանքավայրում հանքաքարի արդյունահանման տեխնոլոգիական պարամետրերի ուղղորդում // ՀՀ ԳԱԱ և ՀՊՃՀ Տեղեկագիր, Տեխնիկական գիտությունների սերիա. – Երևան, 2006.-հատոր LIX, N 2.- էջ 324-329:
4. **Աղաբալյան Յու.Ա., Հովհաննիսյան Ա.Հ., Սուրադյան Հ.Խ.** Երակային հանքավայրերի յուրացման արդյունավետության բարձրացման հիմնական ուղիները // Էկանոմիկա. – Երևան, 1996. – N.10-12. – էջ 25-29:

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 28.12.2023:

Г.А. АРМАГАНЯН

АНАЛИЗ СИСТЕМ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ ШАУМЯНСКОГО ЗОЛОТОПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В настоящее время в подземном руднике применяются две системы разработки – системы разработки путем отбойки руды из подэтажных штреков в порядке убывания и возрастания и завала выемочного пространства пустой породой. С целью повышения эффективности применяемых в подземном руднике технологий добычи руды предлагаются варианты, которые детально представлены в статье. Данные предложения приведут к обеднению руды и сокращению потерь.

Ключевые слова: руда, рудное тело, система разработки, подэтаж, этаж.

Н.Ա. ԱՐՄԱԳԱՆՅԱՆ

ANALYSIS OF THE UNDERGROUND MINING SYSTEMS OF THE SHAHUMYAN GOLD-POLYMETAL DEPOSIT

Currently, two mining systems are used in the underground mine: a mining system by breaking ore from sublevel drifts through rises and inclines and backfilling methods. In order to increase the efficiency of the applied ore mining technologies in the underground mine, options are proposed, which are presented in the article in detail. These suggestions will help decrease ore losses and depletion.

Keywords: ore, ore body, mining system, sublevel, level.

Պ.Ս. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Ա.Ս. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ս.Զ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ՏՐԻՍՏՈՐԱՅԻՆ ՓՈԽԱԿԵՐՊԻՉԻՆ ԻՆՂՈՒԿՏՈՐԻ ՄԻԱՑՄԱՆ
ԱՎՏՈՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐԱՅԻՆ ՄԵԹՈԴ

Դիտարկված է ինվերտորի պարամետրերի ճշգրիտ համաձայնեցման հարցը՝ բեռի պարամետրերի հետ փոխակերպիչի ամենաբարձր ելքային հզորություն ստանալու նպատակով, ապահովելով նրա անհրաժեշտ կայունությունը: Պատրաստվածքի շառավղային ուղղությամբ ջերմաստիճանի անթույլատրելի բարձր անկումներից խուսափելու համար ինդուկտորների տեսակարար հզորությունը սահմանափակվում է, ինչի արդյունքում պարզվում է, որ նպատակահարմար է դրանք պատրաստել 500...750 Վ և բարձր լարման համար: Բացի այդ, բեռի ռեակտիվ հզորության կոմպենսացիայի համար վառարանային բարձր հաճախականության կոնդենսատորներն արտադրվում են 375-ից 1000 Վ անվանական լարմամբ, հետևաբար՝ ինդուկտորի միացումը ինվերտորին՝ իջեցված ելքային լարումով, պետք է իրականացվի ավտոտրանսֆորմատորային սխեմայով: Այս հոդվածում հաշվարկները պարզեցնելու համար ենթադրվում է, որ ինդուկտորի երկարությամբ հզորության գործակիցն ունի որոշակի հաստատուն միջինացված արժեք և կախված չէ ինդուկտորի երկայնքով ջերմաստիճանային դաշտի բաշխումից: Ելնելով այս ենթադրությունից, բեռի ակտիվ դիմադրության կախվածությունը ինդուկտորի գալարների քանակից կարող է ներկայացվել գծային ֆունկցիայի տեսքով տրանսֆորմացիայի տարբեր գործակիցների դեպքում: Ինվերտորի պարամետրերը բեռնվածքի շղթայի պարամետրերին համապատասխանեցնելիս անհրաժեշտ է ոչ միայն ապահովել լրիվ կոմպենսացիա, այլև ընտրել կոնտուրի համարժեք ակտիվ դիմադրության արժեքը այնպես, որ ինվերտորը զարգացնի առավելագույն հզորություն, և այդ դեպքում տրիստորների կառավարելիությունը վերականգնելու համար նախատեսված ժամանակը պետք է մնա թույլատրելի սահմաններում: Ուստի, բեռնվածքի կոնտուրի համարժեք ակտիվ դիմադրության արժեքի գնահատումը տրանսֆորմացիայի տարբեր գործակիցների դեպքում դառնում է անհրաժեշտություն:

Առանցքային բառեր. ինդուկցիոն տաքացում, ինդուկտոր, հաճախականության փոխակերպիչ, ելքային հզորություն, ռեակտիվ հզորություն, վառարանային բարձր հաճախային կոնդենսատոր:

Ներածություն: Հաճախականության տիրիստորային փոխակերպիչները իբրև ինդուկցիոն տաքացուցիչների սնման աղբյուրներ օգտագործելու դեպքում փոխակերպիչի բեռը ներկայանում է որպես մետաղով լցված ինդուկտոր: Այդպիսի բեռի դեպքում հզորության գործակիցը բավականին ցածր է և կազմում է 0,15...0,25 [1]:

Այն մեծացնելու համար օգտագործվում են ունակային կոմպենսացիայի տարբեր մեթոդներ:

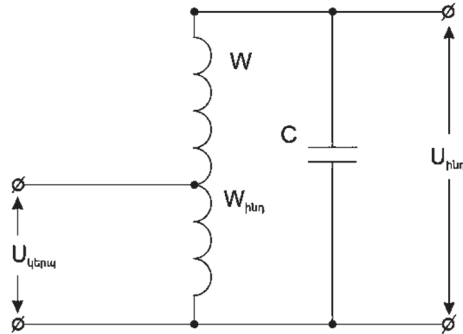
Տիրիստորային փոխակերպչի հուսալի աշխատանքի համար անհրաժեշտ պայմաններից մեկը ինվերտորի պարամետրերի ճիշտ համալսնեցնումն է բեռի պարամետրերի հետ, որպեսզի արդյունքում ստացվի փոխակերպչի ամենաբարձր ելքային հզորությունը:

Հանդիպակաց-գուգահեռ դիոդներով կամրջակային ինվերտորում, կրկնապատկելով ելքային լարման հաճախականության մեծությունը, որի դեպքում ապահովվում է ինվերտորի աշխատանքի կայունությունը, ելքային լարումը մոտավորապես կազմում է հաստատուն հոսանքի սնման աղբյուրի լարման կեսը [2,3]: Այսպիսի փոխակերպիչը, անմիջապես 380 Վ լարման եռաֆազ հոսանքի ցանցից սնման ժամանակ օգտագործելով եռաֆազ ուղղիչ՝ կատարված կամրջակային սխեմայով, և դիտարկվող տեսակի ինվերտորի ելքային լարումը, հաշվի առնելով կայունության անհրաժեշտ պահուստը, կազմում է 260...270 Վ:

Ջերմաստիճանի անթույլատրելի բարձր անկումներից խուսափելու համար շառավղային ուղղությամբ ինդուկտորների տեսակարար հզորությունը սահմանափակվում է, ինչի արդյունքում պարզվում է, որ նպատակահարմար է դրանք պատրաստել 500...750 Վ և բարձր լարման դեպքում: Բացի այդ, բեռի ռեակտիվ հզորության կոմպենսացիայի համար վառարանային բարձր հաճախականությամբ կոնդենսատորներն արտադրվում են 375-ից 1000 Վ անվանական լարմամբ, հետևաբար՝ ինդուկտորի միացումը ինվերտորին՝ իջեցված ելքային լարումով, նպատակահարմար է ավտոտրանսֆորմատորային սխեմայով:

Խնդրի դրվածքը և հետազոտության մեթոդները: Դիտարկվում են ինվերտորը բեռի կոնտուրի հետ համադրելու հարցերը ավտոտրանսֆորմատորային սխեմայով ինդուկտորը միացնելու ժամանակ, երբ դրա սնումը կատարվում է հանդիպակաց-գուգահեռ դիոդներով հաջորդական տիրիստորային ինվերտորից: Նման փոխակերպչի սխեման և դրա աշխատանքի սկզբունքը բերված են [4]-ում:

Ավտոտրանսֆորմատորային սխեմայով միացման դեպքում կոմպենսացնող ունակությունը միացված է ամբողջ ինդուկտորին գուգահեռ, իսկ ինվերտորին միացված է դրա գալարների միայն մի մասը (նկ. 1): Այսպիսի միացումը հնարավորություն է տալիս բարձրացնել լարումը ինդուկտորի վրա և կոնդենսատորային մարտկոցներում մինչև անհրաժեշտ մակարդակ ինվերտորի ելքում իջեցված լարման ժամանակ, օգտագործելով հաջորդական կոմպենսացիայի սկզբունքը գուգահեռի հետ համատեղ:



Նկ.1. Ինդուկտորի ավտոտրանսֆորմատորային միացման սկզբունքային սխեման

Հարկ է նշել, որ ինդուկտորի ավտոտրանսֆորմատորային միացումը օգտագործվում է այն դեպքում, երբ տիրիստորային կերպափոխիչներն օգտագործվում են որպես սնման աղբյուրներ, և տրանսֆորմացիայի գործակցի հետևանքով լարումը սովորաբար մոտ է գուգահեռ կոմպենսացիայի լրիվ հնարավորության օգտագործմանը:

Ինդուկցիոն տաքացուցիչը հանդիպակաց-գուգահեռ դիոդներով հաճախականության տիրիստորային կրկնապատկիչից սնելիս, որոնք ուղղիչի միջոցով միացված են 380 Վ ցանցին՝ ինդուկտորի վրա 500...750 Վ լարում ստանալու համար, տրանսֆորմացիայի գործակիցը պետք է գտնվի 1/2-ից 1/3 սահմանում, որի արդյունքում գերակշռող դառնում է հաջորդական կոմպենսացիան [5]:

Որպես տրանսֆորմացիայի գործակից պետք է հասկանալ ինդուկտորի, որին միացված է ինվերտորը, $W_{հնդ}$ -ի գալարների թվի հարաբերությունը, որին միացված է ինվերտորը, W ինդուկտորի գալարների ընդհանուր թվին.

$$n = \frac{W_{հնդ}}{W}. \quad (1)$$

Տրանսֆորմացիայի գործակցի ցածր արժեքը էական ազդեցություն ունի բեռնվածքի կոնտուրի վարքի և, հետևաբար, ամբողջ փոխակերպչի աշխատանքի ռեժիմի վրա, ուստի առաջանում է ինդուկտորի միացման ավտոտրանսֆորմատորային սխեմայի հատուկ ուսումնասիրության անհրաժեշտություն:

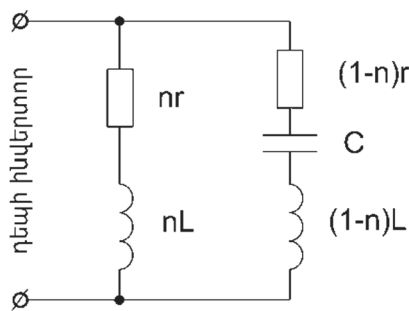
Փոխակերպչի աշխատանքի նորմալ ռեժիմի ընթացքում բեռնվածքի տատանողական կոնտուրում լարման կորը և ինվերտորի ելքային հոսանքի կորն ունեն բարձր հարմոնիկների պարունակության ցածր տոկոս: Հետագա հաշվարկներում ընդունված է ենթադրել, որ հոսանքի և լարման կորերը սինուսոիդային են, ինչը հնարավորություն է տալիս կատարել բեռնվածքի կոնտուրի սխեմայի վերլուծություն ընդհանուր խնդրի լուծման համար, որը դիտարկվում է սինուսոիդային հոսանքի շղթաների տեսության մեջ:

Ելնելով [6]-ում բերված դրույթներից՝ ընդունում ենք ինդուկտոր-մետաղ համակարգի ինդուկտիվության կախվածությունը գալարների քանակից որպես գծային:

Ինդուկտորում տեղի ունեցող գործընթացների վերլուծությունը, հաշվի առնելով բեռի ակտիվ դիմադրության ոչ գծային կախվածությունը ինդուկտորի երկարությունից, էական դժվարություն է ներկայացնում:

Հաշվարկները պարզեցնելու համար ենթադրվում է, որ ինդուկտորի երկարությամբ հզորության գործակիցն ունի որոշակի հաստատուն միջինացված արժեք և կախված չէ ինդուկտորի երկայնքով ջերմաստիճանային դաշտի բաշխումից: Ելնելով այս ենթադրությունից՝ բեռի ակտիվ դիմադրության կախվածությունը ինդուկտորի գալարների քանակից կարող է ներկայացվել որպես գծային ֆունկցիա տրանսֆորմացիայի տարբեր գործակիցների դեպքում:

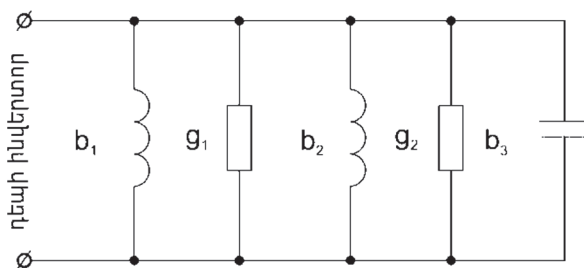
Բեռնվածքի կոնտուրի հաշվարկային սխեման ներկայացված է նկ. 2-ում:



Նկ. 2. Բեռնվածքի կոնտուրի հաշվարկային սխեման

Պայմանավորվենք՝ բեռնվածքի կոնտուրի ճյուղը, որը կազմված է nL ինդուկտիվությունից և nr ակտիվ դիմադրությունից, անվանել ինդուկտիվ, իսկ դրան զուգահեռ ճյուղը, որը պարունակում է C կոմպենսացնող ունակություն և ինդուկտորի մնացած մասը, անվանել ունակային:

Նկ. 2-ում բերված սխեման փոխարինենք դրան համարժեք սխեմայով՝ բոլոր տարրերի զուգահեռ միացմամբ (նկ. 3):



Նկ. 3. Բեռի կոնտուրի համարժեք սխեման

Նկ. 3 համարժեք սխեմայի զուգահեռ ճյուղերի հաղորդականություններն արտահայտվում են հետևյալ բանաձևերով.

$$g_1 = \frac{nr}{(nr)^2 + (\omega nL)^2}, \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{\omega nL}{(nr)^2 + (\omega nL)^2}, \quad (2a)$$

$$g_2 = \frac{r(1-n)}{[r(1-n)]^2 + \left[\omega L(1-n) - \frac{1}{\omega c}\right]^2}, \quad (3)$$

որտեղ L – ը ինդուկտորի համարժեք դիմադրությունն է՝ հաշվի առնելով գալարների միջև մագնիսական կապը, r – ը՝ ինդուկտոր-մետաղ համակարգի ընդհանուր ակտիվ դիմադրությունը, C – ն՝ կոմպենսացնող ունակությունը, n – ը՝ տրանսֆորմացիայի գործակիցը, որը որոշվում է (1) բանաձևով.

$$b_2 = \frac{\omega(1-n)L}{[r(1-n)]^2 + \left[\omega L(1-n) - \frac{1}{\omega c}\right]^2}, \quad (4)$$

$$b_3 = \frac{\frac{1}{\omega c}}{[r(1-n)]^2 + \left[\omega L(1-n) - \frac{1}{\omega c}\right]^2}, \quad (5)$$

որտեղ g_1 և b_1 – ը բեռի կոնտուրի ինդուկտիվ ճյուղի համարժեք ակտիվ և ռեակտիվ հաղորդականություններն են, g_2 , b_2 (b_3 – ը՝ բեռի կոնտուրի ունակային ճյուղի համարժեք ակտիվ և ռեակտիվ հաղորդականությունները, ω – ն՝ կերպափոխման անկյունային հաճախությունը:

Սխեմայում ընդհանուր ռեզոնանսի պայմանն ունի հետևյալ տեսքը

$$b_1 + b_2 - b_3 = 0: \quad (6)$$

(6) հավասարումից, հաշվի առնելով (2), (2a), (4) և (5), կարելի է որոշել ընդհանուր ռեզոնանսային կոնտուրի ապահովման համար կոմպենսացնող ունակության մեծությունը

$$C^2 \omega^2 L(1-n)(r^2 + \omega^2 L^2) - C[2\omega^2 L^2 + n(r^2 - \omega^2 L^2)] + L = 0 \quad (7)$$

Պետք է նշել, որ կոմպենսացնող ունակությունն ունի երկու արժեք՝ C_1 և C_2 , որոնք բավարարում են բեռի կոնտուրի ընդհանուր ռեզոնանսի պայմանը.

$$C_{1,2} = \frac{2\omega^2 L^2 + n(r^2 - \omega^2 L^2) \pm \sqrt{[2\omega^2 L^2 + n(r^2 - \omega^2 L^2)]^2 - 4\omega^2 L^2(1-n)(r^2 + \omega^2 L^2)}}{2\omega^2 L(1-n)(r^2 + \omega^2 L^2)}: \quad (8)$$

Հաշվի առնելով, որ՝

$$r = \frac{\omega L}{tg\varphi_r}, \quad (8a)$$

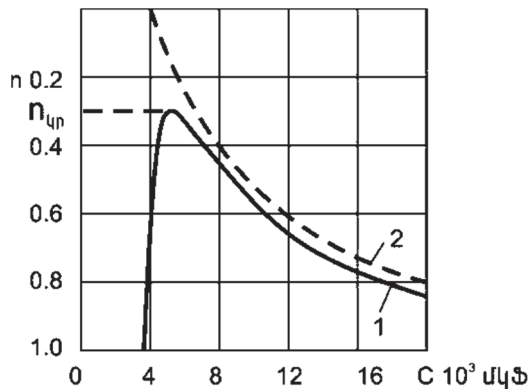
(8) հավասարումը կարելի է գրել հետևյալ տեսքով.

$$C_{1,2} = \frac{2tg^2\varphi_F + n(1-tg^2\varphi_F) \pm \sqrt{[2tg^2\varphi_F + n(1-tg^2\varphi_F)]^2 + 4tg^2\varphi_F(1-n)(1+tg^2\varphi_F)}}{2\omega^2 L(1-n)(1+tg^2\varphi_F)} : \quad (9)$$

Նկ.2-ում բերված սխեմայի ունակային ճյուղում կարող է տեղի ունենալ նաև լարման ռեզոնանս հետևյալ պայմանի դեպքում՝

$$C_3 = \frac{1}{\omega^2(1-n)L} \quad (10)$$

Նկ.4-ում բերված են C_1 , C_2 և C_3 կոմպենսացվող ունակությունները՝ կախված n գործակցից, որոնք կառուցված են ըստ (9) և (10) հավասարումների, երբ $\cos\varphi_F = 0,2$: Կորեր կառուցելիս որպես բազիսային մեծություն ընդունվում է 1 մկՀն ինդուկտիվությունը: Կոմպենսացնող ունակության արժեքը որոշվում է գրաֆիկից ստացված արժեքը բաժանելով բեռի ինդուկտիվության արժեքի վրա՝ արտահայտված մկՀն - ով:



Նկ. 4. Կոմպենսացվող ունակությունների կախվածությունը տրանսֆորմացիայի գործակցից n լրիվ կոմպենսացման (1 կորը) և ունակային ճյուղի հաջորդական ռեզոնանսի դեպքում (2 կորը)

1 կորի ուսումնասիրությունից, որը համապատասխանում է (9) արտահայտությանը, երևում է, որ գրաֆիկի որոշակի տիրույթում բեռնվածքի կոնստուրի ռեզոնանսային ունակությունը երկարժեք ֆունկցիա է n գործակցից: Հետևաբար, հնարավոր է ապահովել լրիվ կոմպենսացիա կոմպենսացնող ունակության երկու տարբեր արժեքների դեպքում: $n = n_{\text{кр}}$ -ի համար (7) հավասարումն ունի հավասար իրական արմատներ, իսկ $C = F_1(n)$ ֆունկցիան միարժեք է: Եթե $n < n_{\text{кр}}$, ապա հավասարման արմատները կեղծ են, ինչը վկայում է լրիվ ռեզոնանս ապահովող ունակության ընտրության անհնարինության մասին:

Հետազոտության արդյունքները: Դիտարկենք (7) հավասարման իրական և կեղծ արմատների դեպքերը: Նկ. 4-ում 1 և 2 կորերի փոխադարձ դիրքը ցույց է տալիս (10) բանաձևով որոշված ունակության և (7) հավասարման երկրորդ արմատի արժեքների մոտ լինելը:

(7) հավասարման երկու արմատներից մեծ արժեքին համապատասխանում է հաջորդական կոմպենսացիայի գերակշռությունը: Այս դեպքում կոնտուրի ունակային ճյուղն աշխատում է լարման ռեզոնանսին մոտ ռեժիմում, բայց առաջ ընկած հզորության գործակցով, որը բավարար է կոնտուրի ինդուկտիվ ճյուղի հոսանքի ռեակտիվ բաղադրիչը կոմպենսացնելու համար: Այս ռեժիմում ինդուկտորի ունակային ճյուղով հոսող հոսանքը զգալիորեն ավելի մեծ է, քան ինդուկտիվության ճյուղում հոսանքը, ինչի հետևանքով ինդուկտորի ինդուկտիվության ճյուղը քիչ է օգտագործվում:

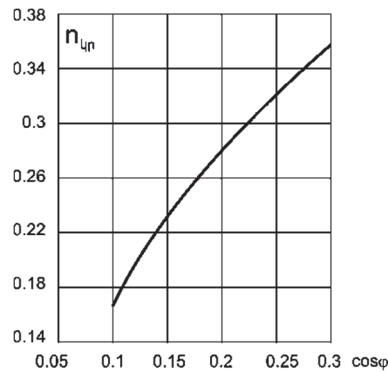
(7) հավասարման երկրորդ արմատներով որոշվող կոմպենսացնող ունակության արժեքների դեպքում ունակային ճյուղի լրիվ հոսանքը կարող է զգալիորեն փոքր լինել, քանի որ այժմ դրա աշխատանքի ռեժիմը հեռու է հաջորդական ռեզոնանսից, բայց այդ ճյուղի առաջ ընկած հզորության գործակիցը նվազում է այնքան, որ հոսանքի ունակային բաղադրիչը պահպանում է նախկին մեծությունը և մնում հավասար մյուս ճյուղում հոսանքի ինդուկտիվ բաղադրիչին: Աշխատանքի այս ռեժիմում գերակշռում է զուգահեռ կոմպենսացիան, և ինդուկտորի ինդուկտիվ ու ունակային ճյուղերում հոսանքները մեծությամբ մոտ են:

ո գործակցի նվազումը հանգեցնում է ինդուկտիվ ճյուղում հոսանքի ռեակտիվ բաղադրիչի աճին: Բեռի լրիվ կոմպենսացիայի պայմանը կատարելու համար անհրաժեշտ է, որ կոնտուրի հոսանքի ունակային բաղադրիչը նույնպես մեծանա: Իսկ երբ $n = n_{կր}$, ապա այս դեպքում լրիվ կոմպենսացիայի համար անհրաժեշտ է հոսանքի առավելագույն հնարավոր ունակային բաղադրիչ: Սրան համապատասխանում է ունակային ճյուղի միայն մեկ որոշակի հզորության գործակից: Դրա մեծությունը 0,7 է: Այստեղից բխում է արմատի եզակիությունը $n = n_{կր}$ -ի դեպքում:

ո գործակցի հետագա նվազումով ինդուկտիվ ճյուղի հոսանքի ռեակտիվ բաղադրիչը դառնում է այնքան մեծ, որ նույնիսկ մյուս ճյուղի հոսանքի ունակային բաղադրիչի առավելագույն հնարավոր արժեքը մնում է ավելի փոքր, քան դա անհրաժեշտ է տվյալ n -ի համար՝ ըստ լրիվ կոմպենսացիայի պայմանի: Հետևաբար, ապահովել բեռի կոնտուրի լրիվ ռեզոնանս $n < n_{կր}$ -ի դեպքում անհնար է ցանկացած կոմպենսացնող հզորության պայմանում [7]:

$n_{կր}$ -ի արժեքը կախված է բեռի հզորության գործակցից: Նկ. 5-ից երևում է, որ $\cos\varphi_F$ -ի 0,1-ից 0,3 աճի հետ աճում է նաև $n_{կր}$ կրիտիկական գործակիցը: Սա բացատրվում է նրանով, որ $\cos\varphi_F$ -ի աճը համարժեք է բեռի կոնտուրի երկու

ճյուղերում լրացուցիչ ակտիվ դիմադրություններ ներմուծելուն, ինչն էլ ենթադրում է այս ճյուղերում հոսանքի նվազում:



Նկ. 5. Տրանսֆորմացիայի $n_{\text{սբ}}$ կրիտիկական գործակցի կախվածությունը բեռի $\cos \varphi$ -ի հզորության գործակցից

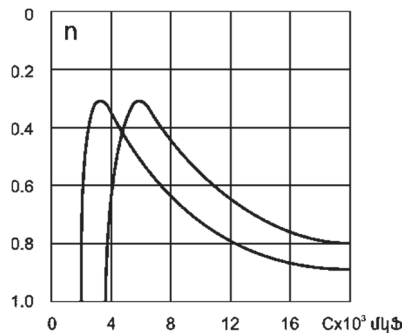
Երբ բեռի հզորության գործակցը փոխվում է 0,1-ից մինչև 0,3, ունակային ճյուղում հոսանքի նվազման աստիճանն ավելի բարձր է, քան ինդուկտիվ ճյուղում: Եթե, օրինակ, $\cos \varphi_{\text{բ}} = 0,1$ -ի դեպքում $n_{\text{սբ}}$ գործակցը 0,17 է (նկ. 5), ապա $\cos \varphi_{\text{բ}} = 0,2$ -ի դեպքում արդեն հնարավոր չէ իրականացնել լրիվ կոմպենսացիա $n = 0,17$ գործակցով՝ ունակային ճյուղերում հոսանքի փոքր արժեքի պատճառով:

Հարկավոր է կոնստուրի ճյուղերում հավասարակշռել հոսանքները, որպեսզի լինի լրիվ կոմպենսացիա. այս դեպքում անհնար է n գործակցի առանց մեծացման մինչև $n_{\text{լր}} = 0,28$ արժեքը:

Այսպիսով, $\cos \varphi_{\text{բ}}$ -ի 0,1-ից 0,3 միջակայքում աճի դեպքում $C = F_1(n)$ կորի գագաթը, որը համապատասխանում է տրանսֆորմացիայի $n_{\text{լր}}$ կրիտիկական գործակցին, տեղաշարժվում է օրդինատների առանցքից աջ:

Ինչպես երևում է նկ. 4-ից, կոր 1-ը կոորդինատային հարթությունը բաժանում է երկու մասի՝ ներքին (I) և արտաքին (II): I մասում կա գերկոմպենսացիա, իսկ II մասում՝ բեռի ռեակտիվ հզորության թերկոմպենսացիա:

Նկ. 6-ում ներկայացված են $C = F_1(n)$ կախվածության կորերը, որոնք կառուցված են $\cos \varphi_{\text{բ}} = 0,2$ -ի դեպքում երկու տարբեր փոխակերպված հաճախականությունների համար՝ 2500 և 3000 Հց: Դիտարկենք փոխակերպված հաճախականության փոփոխման ազդեցության առանձնահատկությունը բեռի կոնստուրի վարքի վրա:



Նկ. 6. Կոմպենսացնող ունակության արժեքների կախվածությունը տրանսֆորմացիայի գործակցից 2500 Հg (կոր 1) և 3000 Հg (կոր 2) հաճախականությունների պայմանի դեպքում

Եթե, օրինակ, ընդունենք $n=0,6$ գործակցիցը, և իրականացնենք կոմպենսացիա C_1 ունակության դեպքում, որը համապատասխանում է (7) հավասարման մեծ արմատին, ապա անփոփոխ պահելով բեռի կոնտուրի բոլոր պարամետրերը, որոնք կարգավորված են 2500 Հg հաճախականությամբ ռեզոնանսում, հաճախականության բարձրացումը մինչև 3000 Հg, դիտարկվող դեպքում հանգեցնում է բեռի թերկոմպենսացիայի: Եթե 2500 Հg հաճախականությամբ լրիվ կոմպենսացիայի պայմանն ապահովված է (7) հավասարման փոքր արմատով, ապա բեռի կոնտուրի արձագանքը հաճախականության նմանատիպ փոփոխությանը կլինի ճիշտ հակառակը:

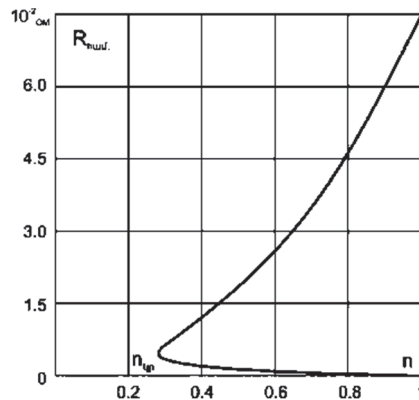
Այսպիսով, բեռնի կոնտուրը, որը կարգաբերված է տվյալ փոխակերպված հաճախականությամբ ռեզոնանսի համար, կարող է բոլորովին այլ կերպ արձագանքել այս հաճախականության նույն փոփոխությանը, կախված նրանից, թե (7) հավասարման արմատներից որն է համապատասխանում ռեզոնանսի համար կոմպենսացնող ունակության ընտրված արժեքին [8]:

Ինվերտորի պարամետրերը բեռի կոնտուրի պարամետրերին համապատասխանեցնելիս անհրաժեշտ է ոչ միայն ապահովել լրիվ կոմպենսացիա, այլև ընտրել կոնտուրի համարժեք ակտիվ դիմադրության արժեքն այնպես, որպեսզի ինվերտորը տա ամենամեծ հզորությունը, և այս դեպքում տիրիստորների կառավարելիությունը վերականգնելու համար նախատեսված ժամանակը պետք է մնա թույլատրելիի սահմաններում: Հետևաբար, բեռի կոնտուրի համարժեք ակտիվ դիմադրության մեծությունը գնահատելը տրանսֆորմացիայի տարբեր գործակցիների դեպքում դառնում է անհրաժեշտ:

Օգտագործելով (2), (2ա) (3) և (8ա) հավասարումները կոնտուրի լրիվ ակտիվ դիմադրության պայմանի և լրիվ կոմպենսացիայի պայմանի համարժեք կոնտուրի համարժեք ակտիվ դիմադրության կախվածությունը կարող է արտահայտվել բանաձևով.

$$R_3 = \frac{n\omega L(1-n) \left[1 + tg^2\varphi_p \left(1 - \frac{2}{(1-n)\omega^2 LC_{1,2}} + \frac{1}{\omega^4 L^2 (1-n)^2 C_{1,2}^2} \right) \right] (1 + tg^2\varphi_p)}{tg\varphi_p \left\{ (1-n) \left[1 + tg^2\varphi_p \left(1 - \frac{2}{(1-n)\omega^2 LC_{1,2}} + \frac{1}{\omega^4 L^2 (1-n)^2 C_{1,2}^2} \right) \right] + n(1 + tg^2\varphi_p) \right\}}$$

որտեղ $C_{1,2}$ -ը համապատասխանաբար (7) հավասարման արմատներն են: $\cos\varphi_p = 0,2$ -ի համար $R_3 = F_3(n)$ կախվածության կորը բերված է նկ.7-ում: Գրաֆիկից երևում է, որ $R_3 = F_3(n)$ ֆունկցիան նույնպես երկարժեք է $n_{կր} < n < 1$ միջակայքում: (7) հավասարման արմատների փոքր արժեքներին համապատասխանում են բեռի կոնտուրի համարժեք ակտիվ դիմադրության մեծ արժեքներ և հակառակը: Հետևաբար, տրանսֆորմացիայի միևնույն գործակցի դեպքում նշված դիմադրությունները ռեզոնանսի դիտարկվող երկու դեպքերում կարող են էապես տարբերվել միմյանցից:



Նկ.7. Բեռի կոնտուրի համարժեք ակտիվ դիմադրության կախվածությունը տրանսֆորմացիայի գործակցից $\cos\varphi_p = 0,2$ -ի և լրիվ կոմպենսացիայի պայմանի դեպքում

Կատարված վերլուծությունը ցույց տվեց, որ բեռի ավտոտրանսֆորմատորային միացման դեպքում բեռի կոնտուրի ռեզոնանսն ապահովելու հնարավորությունը գոյություն ունի միայն տրանսֆորմացիայի գործակցի փոփոխման որոշակի միջակայքում: Այդ միջակայքի լայնությունը կախված է $\cos\varphi_p$ -ից:

Ինչպես հայտնի է [8], հակադարձ դիողներով հաջորդական ինվերտորն իր ելքային բնութագրերով մոտ է հոսանքի աղբյուրին:

Բեռի կոնտուրի օգտագործումը՝ պակաս համարժեք ակտիվ դիմադրությունով, քան այն, որի համար հաշվարկված է ինվերտորը, հանգեցնում է տրված ելքային հզորության ստացման անհնարինությանը: Հետևաբար, նույնիսկ ռեզոնանսի առկայության, բայց կոմպենսացնող ունակության սխալ ընտրության դեպքում բեռի կոնտուրի ինդուկտիվ ճյուղը կարող է անօգուտ լինել դրա՝ լարման ռեզոնանսին մոտ ռեժիմով աշխատող ունակային ճյուղի շունտավորման պատճառով:

Եզրակացություն: Լրիվ կոմպենսացիա ապահովելու և ինվերտորի անվանական էլքային հզորություն ստանալու համար պետք է ընտրել (7) հավասարման առաջին (փոքր) արմատով որոշվող կոմպենսացնող ունակության մեծությունը:

Բեռի ավտոտրանսֆորմատորային միացումով տիրիստորային ինվերտորների փորձնական ուսումնասիրությունները և շահագործման փորձը, որոնց համար օգտագործվել են ինդուկտորներ մետաղների հալման համար, հաստատում են եզրակացությունները, որոնք շարադրված են սույն աշխատանքում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А., Бамунер А.В.** Установки индукционного нагрева / Под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
2. **Электротехнические установки и их источники питания: Учебное пособие для вузов по спец. “Промышленная электроника” / Сост. В.И. Бар.** – Тольятти: ТГУ, 2002. – 98 с.
3. **Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М.** Основы преобразовательной техники. – М.: Высшая школа, 1980. – 424 с.
4. **Электротехнологические установки и их источники питания.** – Тольятти, 2002. – 105 с.
5. **Евтюкова И.П., Кацевич Л.С., Некрасова Н.М., Свенчанский А.Д.** Электротехнологические промышленные установки / Под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.
6. **Валиуллина З., Зинин Ю.** Исследование тиристорных преобразователей частоты для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. - М., 09.08.2009, <http://www.power-e.ru/316.php>
7. **Рама Р.С.** Основы силовой электроники / Пер. с англ. В.В. Масалова– М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
8. **Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок / Е.И. Беркович, Иоффе Ю.С. и др.** – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 206 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 19.10.2023

П.С. МАНУКЯН, А.М. АРУТЮНЯН, С.Д. САРГСЯН

АВТОТРАНСФОРМАТОРНЫЙ МЕТОД ПОДКЛЮЧЕНИЯ ИНДУКТОРА К ТИРИСТОРНОМУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЮ

Рассмотрен вопрос правильного согласования параметров инвертора с параметрами нагрузки с целью получения наибольшей выходной мощности преобразователя при необходимом запасе его устойчивости. Во избежание недопустимо высоких перепадов температуры в радиальном направлении заготовок удельная мощность индукторов ограничивается, в результате чего оказывается целесообразным выполнять их на напряжение 500...750 В и выше. Кроме того, печные высокочастотные конденсаторы для компенсации реактивной мощности нагрузки выпускаются с номинальным напряжением от 375 до 1000 В, поэтому подключение индуктора к инвертору с пониженным выходным напряжением приходится осуществлять по автотрансформаторной схеме. С целью упрощения расчетов в настоящей работе принято допущение, что коэффициент мощности по длине индуктора имеет некоторое постоянное усредненное значение и не зависит от распределения температурного поля вдоль индуктора. Исходя из такого допущения, зависимость активного сопротивления нагрузки от числа витков индуктора может быть представлена в виде линейной функции при различных коэффициентах трансформации. При согласовании параметров инвертора с параметрами нагрузочного контура необходимо не только обеспечить полную компенсацию, но и подобрать величину эквивалентного активного сопротивления контура таким образом, чтобы инвертор отдавал наибольшую мощность, и при этом время, предоставляемое на восстановление управляемости тиристоров, должно оставаться в допустимых пределах. Поэтому оценка величины эквивалентного активного сопротивления нагрузочного контура при различных коэффициентах трансформации является необходимой.

Ключевые слова: индукционный нагрев, индуктор, преобразователь частоты, выходная мощность, реактивная мощность, печные высокочастотные конденсаторы.

P.S. MANUKYAN, A.M. HARUTYUNYAN, S.D. SARGSYAN

THE AUTOTRANSFORMER METHOD OF CONNECTING THE INDUCTOR TO THE THYRISTOR CONVERTER

The issue of the correct coordination of the inverter parameters with the load parameters in order to obtain the highest output power of the converter at the necessary margin of its stability is considered. In order to avoid impermissibly high temperature drops in the radial direction of the workpieces, the specific power of inductors is limited, as a result of which it is expedient to perform them for a voltage of 500 ... 750 V and higher. In addition, high-frequency furnace capacitors for compensating the reactive power of the load are produced with a rated voltage from 375 to 1000 V, so the connection of the inductor to the inverter with a reduced output voltage has to be carried out according to the autotransformer circuit. In order to simplify the calculations, it is assumed that the power

factor along the length of the inductor has a certain constant averaged value and does not depend on the distribution of the temperature field along the inductor. Based on this assumption, the dependence of the active resistance of the load on the number of turns of the inductor can be presented as a linear function for various transformation ratios. When matching the parameters of the inverter with the parameters of the load circuit, it is necessary not only to ensure full compensation, but also to select the value of the equivalent active resistance of the circuit in such a way that the inverter give the most power, and at the same time, the time provided for restoring the controllability of the thyristors must remain within acceptable limits. Therefore, the estimation of the value of the equivalent active resistance of the load circuit at various transformation ratios is necessary.

Keywords: induction heating, inductor, frequency converter, voltage, output power, reactive power, high-frequency furnace capacitors.

D.S. KARAMYAN, G.A. KIRAKOSYAN

KEYWORD-BIASED SPEECH RECOGNITION: A COMPARATIVE STUDY

The ability to recognize unknown or rare words, such as technical terms and names, is crucial for speech recognition technology to accurately comprehend conversations in context. Nonetheless, current end-to-end speech recognition models often have difficulty in recognizing words that are rarely or never seen during training. This paper examines the effectiveness of different keyword biasing methods, as well as their modifications outlined in previous studies, which do not require any modifications to the ASR model.

Keywords: speech recognition, keywords, contextual biasing.

Introduction. Recent years have witnessed a remarkable advancement in the performance of End-to-End (E2E) automatic speech recognition (ASR) systems with the help of deep learning. Attention-based Encoder and Decoder (AED) [1, 2], Connectionist Temporal Classification (CTC) [3] and Recurrent Neural Network Transducers (RNN-T) [4] have played a significant role in this advancement. However, these systems face difficulties in recognition unknown or uncommon words such as person names, location names or technical terminologies that are rarely or never seen during training. The recently introduced *Whisper Large* [2] model is proficient at recognizing terms, names and other commonly used keywords due to its training on vast amounts of data. Nevertheless, using this model in embedded AI applications that require fast inference and have limited memory resources may not be practical. Aside from the computational aspect, it cannot recognize novel words that were not part of the training set. This problem is not only limited to ASR technology, but also applies to humans as it is difficult to understand a conversation full of unknown words. These words often play a significant role in understanding the overall conversation despite their low frequency of occurrence.

Keyword biasing (also known as *contextual ASR* or *contextual biasing*) is a family of methods of guiding an ASR system towards a specified list of keywords and phrases provided along with the audio to be transcribed. Previous research on contextual ASR can be categorized into *deep biasing* [5-8] and *shallow fusion* [9-11] approaches. While deep biasing methods modify ASR training to incorporate

keyword lists as a secondary input to the ASR model, shallow fusion utilizes keyword lists during decoding to bias the output. This paper will mainly focus on shallow fusion techniques that can be effortlessly integrated into an existing ASR model without the need for retraining, particularly in situations where target domain data is scarce or retraining is not feasible.

On-the-fly (OTF) rescoring [9], is, probably, the most frequently used contextual biasing approach in ASR. Initially, this method was used in hybrid ASR models wherein a new weighted finite state transducer (WFST) is combined with the ASR model's WFST representing bias terms. The weights assigned to the bias terms are dynamically modified during inference, hence the name "on the fly". Another contextual biasing implementation is CTC prefix beam search with OTF rescoring [10, 11]. This involves generating several potential translations *beams* while performing beam search and assigning higher scores to the translations that include bias terms. Several papers [10, 12] explore modifications of this technique. In particular, [10] demonstrates the importance of cost subtraction when a false prefix occurs, while [12] suggests an adaptive boosting method that assigns a smaller boosting score to tokens that have relatively lower acoustic confidence. A line of research [11, 13-15] generates alternative spellings for each bias term and then integrates them into the decoding process. In particular, work in [11], proposed a novel method that can predict how ASR may inaccurately recognize the term and subsequently replace it with the correct spelling.

In this paper, we conduct a comparative analysis of various decoding strategies, including CTC prefix beam search with keyword biasing [10], and modifications proposed in literature, including cost subtraction [10], adaptive boosting [12], and alternate spelling prediction [11], in comparison to baseline strategies such as greedy decoding, vanilla beam search, and beam search with language model (LM) [16]. Furthermore, we evaluate the effectiveness of biasing methods on three different datasets with varying biasing lists, demonstrating their benefits and drawbacks. We also analyze the methods' effectiveness on rare and out-of-vocabulary (OOV) keyword groups.

Beam Search Decoding. The main component of an end-to-end automatic speech recognition system is the acoustic model, which is responsible for converting acoustic signals into a sequence of characters or tokens. When trained from a large amount of labelled speech data, the acoustic model can learn to produce readable transcriptions. However, errors often arise on words that rarely or never appear in the training dataset. In practice, this is hard to avoid: training from enough speech data to *hear* all of the words or language constructions we might need to know is impractical [17]. Therefore, many ASR systems employ an

external LM because these models can be easily trained on huge unlabeled text corpora. The LM is used in fusion with beam search decoding to find the best translation candidates. During the decoding phase multiple alternative token sequences or *beams* are generated which are then scored using the acoustic and language models to select the most likely translation sequence. More formally, given the output of the acoustic model for a given audio signal X , we perform a search to find the sequence of tokens $c_1, c_2, \dots$ that is most probable according to both the acoustic model output and the language model. Specifically, we aim to find a sequence of tokens C that maximizes the combined objective:

$$Q(C) = \log(P(C|X)) + \alpha \log(P_{lm}(C)) + \beta \text{length}(C),$$

where $P(C|X)$ here is a likelihood of token sequence C estimated by the acoustic model and $P_{lm}(C)$ is the one estimated by the LM. $\text{length}(C)$ is a function that returns the length of the sequence C . Parameter α specifies the amount of importance to place on the language model, and β is a penalty term to consider the sequence length in the scores. Larger α means more importance on the LM and less importance on the acoustic model. Negative values for beta will give penalty to longer sequences and make the decoder to prefer shorter predictions, while positive values would result in longer candidates. The objective is maximized using a prefix beam search algorithm proposed by [16].

Prefix Trie. To bias the decoding algorithm towards particular keywords, we first create a prefix tree (trie) for a given list of keywords. A prefix trie is a data structure that allows an efficient search for a specific prefix within a set of keywords. Later, we will use constructed prefix trie in beam search decoding. Fig. shows an example of a prefix trie for a keyword set *palo, paulo, pete*. Each node in the trie has an associated token which can be either a character or a word piece. The first node represents the *root node*, and the colored nodes are *leaf nodes*. The edges of the tree are weighted and indicate the importance of the token as it extends the path within the tree. It is important to note that the outgoing edge from the root node has a weight of 0, indicating that the first token in the keyword will not be taken into account during the decoding process. To simplify a problem, we limit our analysis to single-word keywords, even though keywords can be made up of more than one word.

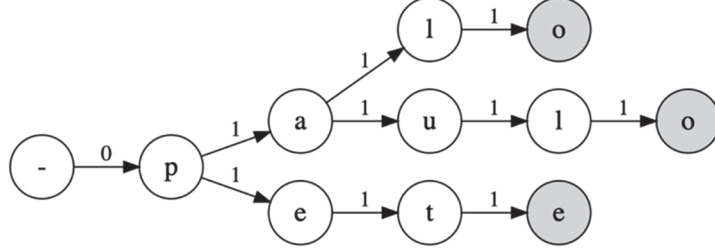


Fig.1. Prefix trie when a biasing list consists of {"palo", "paulo", "pete"}

Keyword-Biased Beam Search. Once a prefix trie of keywords $\mathcal{K}$ is constructed, we can decode the acoustic model output with keyword-biased beam search algorithm. While performing a beam search, the decoding algorithm favours the given keywords if the input speech is pronounced similarly to the given keywords.

To give more importance to the tokens that lead to the next node in the keyword trie, we modify the scoring function $Q(C)$ by adding an extra term:

$$Q_{biased}(C) = Q(C) + \gamma T(C),$$

where γ controls the strength of boosting algorithm and $T(C)$ is a keyword boosting score for beam candidate C :

$$T(C) = \begin{cases} 1, & \text{if } lastWord(C) \in \mathcal{K}, \\ 0, & \text{if } lastWord(C) \notin \mathcal{K}. \end{cases}$$

Here, $lastWord(C)$ is a function that returns the last word of candidate beam C . A high value of γ may lead to overboost (boosting a word as a keyword even if it is not actually presented in speech) and a low value may result in nothing but a vanilla beam search. Moreover, if the prefix consists of only one token, the boosting score is not applied. This is because boosting keywords from the beginning may also lead to overboosting, as one-token prefixes are quite common in candidate beams, particularly when there are a large number of keywords.

Adaptive boosting. To reduce false positives and limit the overboosting effect, an adaptive boosting method is proposed in [12]. More specifically, the proposed method assigns a smaller boosting score to tokens that have relatively lower acoustic confidence, thereby reducing the likelihood of false positives. Let $\hat{y}(t, k)$ denote the log-probability distribution by the acoustic model at time t with k representing the token index. The boosting score for each token at time step t is determined dynamically by its difference in log-probability with the most probable token:

$$\delta(t, k) = \sqrt{\max_k \{\hat{y}(t, k)\} - \hat{y}(t, k)},$$

$$T(C) = \begin{cases} \sigma(\delta(t, k)), & \text{if } \text{lastWord}(C) \in \mathcal{K}, \\ 0, & \text{if } \text{lastWord}(C) \notin \mathcal{K}, \end{cases}$$

where $\sigma(x) = 2/(1 + e^x)$ represents a scaled inverse sigmoid function.

Cost subtraction. Work [10] proposes a simple technique to address situations where a false prefix occurs. When the prefix on $\mathcal{K}$ is about to break because the next token does not continue the prefix, we have to subtract the accumulated value up to the current node. For example, consider Fig. 1 and let the current prefix path be *pau* and the upcoming token be *e*. In this case, the accumulated boosting score assigned to the prefix *pau* needs to be subtracted from the overall score because the word *paue* is no longer a prefix on $\mathcal{K}$.

Alternate Spelling Prediction. Work [11] presents a novel alternate spelling prediction (ASP) model which can enhance the effectiveness of a keyword-biased beam search algorithm. The ASP model is a text-to-text, transformer-based, encoder-decoder model. It aims to predict how the ASR system might inaccurately recognize a given keyword or term. For example, if the input is the name “Krisp”, the ASP model should predict “Crisp” because that is how the ASR system will recognize the term. Using this ASP model, we can also add weight to token sequences associated with the alternate terms the model suggests. These sequences can then be replaced by the original keywords in the ASR output.

We followed the training and inference procedures as described in the original paper. The ASP model’s training data is derived from ASR audio-text paired data. First, we run ASR on audio files to obtain the corresponding text outputs. The outputs are then aligned with reference texts, and incorrectly recognized word pairs are extracted and filtered to exclude insertion or deletion errors and only include non-stopword errors. In contrast to the original paper, we also remove error pairs where reference and predicted words are not phonetically similar to maintain the quality of the data. To align predicted and reference texts, we used an open-source tool called *fstalign*¹.

Evaluation Datasets. *Earnings21 benchmark.* For evaluation we use a publicly accessible Earnings21 dataset [18]. The Earnings21 dataset is a 39-hour corpus of earnings calls containing entity-dense speech from the financial sector. The discussions in these recordings contain industry-specific terminology including the names of companies, products and executives. Moreover, the benchmark comes

¹ <https://github.com/revdotcom/fstalign>

with two predefined keyword lists - *oracle* and *distractor*. The *oracle* list includes terms and phrases found in the Earnings21 reference transcripts, while the *distractor* list includes all biasing terms from the oracle list along with other company names and renowned CEOs that are not present in the Earnings21 dataset. As we limit our analysis to single-word terms, we excluded phrases from both lists reducing their sizes to 272 and 434, respectively.

Meetings dataset. We also evaluated on an in-house Meetings dataset, consisting of 13 meeting recordings with each recording spanning an average of 2169 seconds (7.8 hours in total). The reference transcripts contain a diverse array of terms and names, which are challenging for the ASR system to recognize, like people's names (such as Caruana, Hovhannes), locations (such as Jamaica, Artsakh), companies and software applications (such as Plantronics, Bloomberg, Discord, Figma). We extracted a list of 178 terms from the reference transcripts.

Podcasts dataset. In order to tune the hyperparameters used in the decoding phase, we gathered the second dataset comprising 22 audio recordings. The total duration of the recordings is 10.5 hours and they encompass conversational discourse involving multiple speakers. We collected a biasing list of 128 terms from the reference texts. A hyperparameter search was conducted on this dataset to find the optimal values of α , β and γ parameters for keyword-biased beam search decoding. The best result was achieved for $\alpha = 0.3$, $\beta = 0.95$, $\gamma = 2.4$.

Evaluation Metrics. In line with previous works, we report the Word Error Rate (WER) for all experiments which indicates the percentage of words that were incorrectly predicted. Because the number of keywords is quite small when compared to the size of the text corpus, it's possible that effective methods for recognizing these keywords may not have a significant impact on the WER. For that reason, in addition to WER, we report precision, recall and F1-score on keywords. These metrics are more useful in determining how well the ASR system recognizes the terms from the user's perspective. We aim to improve recall without sacrificing precision and WER.

In addition, we calculate these metrics for three different groups of biasing keywords: *All Words*, which includes every non-stopword word that appears in the biasing list; *Rare words*, defined as those that appear less than 150 times in the ASR training data; and *OOV words*, which are words that do not occur in the ASR training data.

Automatic Speech Recognition Model. Our ASR model is based on a non-autoregressive variant of Conformer-CTC architecture [19] which effectively combines convolutional and transformer blocks to model both local and global dependencies of an audio sequence. We use a medium-size pre-trained Conformer

checkpoint² that was made available by Nvidia. We further fine-tune the model on an in-house dataset with around 75,000 hours of English speech. The model generates a probability distribution across subword units with a vocabulary size of 128. We use a subword language model [20] for the LM fusion in beam search decoding. We train the language model on the text part of the ASR training dataset. To provide a comparative analysis, we also report the results of the open-source OpenAI Whisper models [2], which were trained on a massive amount of multilingual speech dataset (680,000 hours).

Alternate Spelling Prediction Model. To train the alternate spelling prediction model, we used roughly 1.15 million word pairs that were mistakenly recognized by an ASR system. Furthermore, we removed error pairs in which the phonetic forms of the reference and predicted words had an edit distance greater than 50%. We used the grapheme-to-phoneme (G2P) library³ to convert words to the corresponding phoneme sequence.

Similar to [11], our ASP model is also based on a transformer encoder-decoder framework. It has two layers in both the encoder and decoder with two attention heads per layer and 400 units per layer resulting in a total of 6.5 million parameters. However, unlike the original paper, the input and the output subword tokenization is the same as the tokenization used for the ASR model.

At inference time we use beam search to produce a 5-best list of alternate spellings for each keyword. We then filter these alternates to remove bad alternates that are likely to introduce false-positive errors. There are two types of alternates that need to be filtered out - poor matches and common words. We remove the poor matches if the log-likelihood of the hypothesized alternate is lower than the best one by the threshold of 1.0. For common words we filter out any suggested alternate that appeared more than a 1000 number of times in the ASR training data or belongs to the list of top 10,000 frequently used English words⁴.

To test the accuracy of the ASP model, we measure the BLEU score [21] between the word pieces of the reference and predicted alternates. Fig.2 shows the results of the ASP model on the test set. For comparison, we present the baseline score for an identity system that keeps the input word unchanged. In addition, we report the score obtained by a refined ASP model using beam search. Fig. 3 illustrates examples of alternates that the ASP model produces.

²https://catalog.ngc.nvidia.com/orgs/nvidia/teams/nemo/models/stt_en_conformer_etc_medium

³ <https://github.com/Kyubyong/g2p>

⁴ <https://github.com/arstgit/high-frequency-vocabulary/blob/master/10k.txt>

Model	BLEU
Identity	0.48
Vanilla ASP	0.6
ASP with beam search	0.605

Fig. 2. Performance of the ASP model with and without beam search in comparison to the identity baseline

Keyword	Top1	Top2	Top3
Keywords seen during training			
hashimoto	hashimoto	hashimoto	hashamato
jupyter	jupiter*	jupitor*	jupitter*
kotlin	cotlin	cotlan*	codlin*
pulumi	pulumi	polumi	poulumi
Keywords unseen during training			
farnoosh	farnosh	farnush	farnash
doernenburg	dornenburg	doernenberg	doernenburg
odersky	oderski	odersky	odderski

Fig. 3. Top three alternates generated by the ASP model with * denoting alternates that were filtered out due to low confidence or being a common word

Results

Baseline methods. Table displays the results obtained by applying keyword-biasing methods along with a comparison to the baseline methods that do not employ any biasing techniques. As shown in Table 1, both greedy decoding and vanilla beam search perform poorly at identifying keywords. This is because the acoustic model alone cannot recognize *OOV* and *Rare* words, which were either absent or infrequent during training. In comparison to the vanilla beam search, LM fusion yields significant improvements in both WER and F1 scores across all three datasets. This is because the LM helps to rectify misspelled keywords as illustrated in Table 2.

Table 1

Performance comparison of keyword-biasing methods with relation to baseline methods. The first section showcases the scores of Whisper Large and Small models. The second section displays the baseline scores generated using three decoding techniques: Greedy, Beam Search, and Beam Search with LM fusion, without any keyword-biasing. Lastly, the third section demonstrates the results obtained from implementing different biasing algorithms

	Podcast				Meetings				Earnings21 - oracle			
	R↑	P↑	F1↑	WER↓	R↑	P↑	F1↑	WER↓	R↑	P↑	F1↑	WER↓
Whisper Large	79.36	97.53	87.51	7.81	62.39	97.46	76.08	9.28	85.61	92.43	88.89	9.72
Whisper Small	73.34	96.72	83.42	7.17	55.64	97.02	70.72	9.36	80.23	91.89	85.66	9.83
Greedy decoding	47.03	92.41	62.34	7.65	39.74	96.27	56.26	12.19	70.38	90.80	79.30	14.25
Beam search (width=16)	46.76	92.88	62.20	7.60	40.26	96.52	56.82	12.10	70.54	91.15	79.53	14.12
Beam search with LM (width=16)	55.59	95.72	70.33	6.93	43.33	96.94	59.89	10.81	73.01	90.90	80.98	13.03
Keyword-biased beam search: (1)	74.45	94.73	83.37	6.95	52.39	90.15	66.27	11.14	81.08	80.50	80.79	13.35
(1) + Cost subtraction: (2)	77.17	92.42	84.11	6.86	54.70	85.45	66.7	11.08	83.90	73.91	78.59	13.44
(2) + Adaptive: (3)	73.03	94.96	82.56	6.87	53.16	90.14	66.88	10.97	82.08	78.62	80.32	13.30
(3) + ASP	78.84	94.84	86.10	6.83	66.67	91.55	77.15	10.86	84.00	76.07	79.84	13.35

Table 2

Transcription samples generated by baseline methods

Reference text	so ni wang is now the rebecca’s assistant
Whisper Large	so ni wang is now rebecca’s assistant
Greedy decoding	so kne waang is now the rebecca’s assistant
Beam search	so kne waang is now the rebecca’s assistant
Beam search with LM fusion	so knee wang is now the rebecca’s assistant

Additionally, Table 1 includes the results of the Whisper Large and Small models. These models are proficient at recognizing terms, names and other commonly used keywords due to their training on vast amounts of data. However, they still struggle to recognize novel words that were not present in the training set.

Keyword-biasing methods. The use of keyword-biased beam search resulted in a significant boost in recall across all three datasets. Specifically, when compared to the LM-fused beam search, there is an 18.86% absolute improvement in recall in the Podcasts dataset, a 9.06% improvement in the Meetings dataset and an 8.07% improvement in the Earnings21-oracle dataset. Additionally, by using *cost subtraction* approach we can filter out beams that contain false prefixes, which leads to an overall increase in recall of around 2-3% across all three datasets.

As can be seen from Table 1 by imposing the decoder to produce certain keywords, we observed a reduction in precision where the predicted keywords were not actually present in the reference text. By using *adaptive boosting* approach, we were able to increase precision and limit the overboosting effect.

The last row of Table 1 demonstrates the effectiveness of *alternate spelling prediction* approach. Compared to the LM-fused beam search baseline, the ASP approach resulted in an absolute recall improvement of 23.25%, 23.34% and 10.99% across the Podcasts, Meetings and Earnings21-oracle datasets, respectively. As outlined earlier, to prevent false positive errors, the keyword-biased beam search is not applied right from the beginning of the keyword. This means that keywords like “Krisp” may be recognized as "Crisp" without the possibility of correction. By incorporating ASP alternatives into the decoding process, we can anticipate how ASR may inaccurately recognize the term and subsequently replace it with the correct spelling.

Table 3 illustrates both positive and negative examples of ASR transcription with and without keyword biasing. Some errors occurred when the decoder failed to complete a word by skipping the last characters (e.g., *manue*) which can potentially be caused by adaptive boosting. Other errors arose from the beam pruning logic, where candidates with the correct keyword prefix were pruned

during the beam search due to their relatively lower scores. Another source of error comes from the ASR's inability to safely capture the phonetic prefix of the keyword and hence it will never be boosted (e.g., *ubiquitous*).

Table 3

Positive and negative examples of ASR transcription with and without keyword biasing

Positive examples	
gold text	the airline's ceo oscar munoz issued an apology
no biasing	the airlines ceo oscar munyos issued an apology
with biasing	the airlines ceo oscar munoz issued an apology
gold text	i wanted to interview cathy o'neil
no biasing	i wanted to interview kathy o'neill
with biasing	i wanted to interview cathy o'neil
gold text	the team topologies patterns
no biasing	the team apologies patterns
with biasing	the team topologies patterns
gold text	i'm ashock one of your regular co hosts
no biasing	i'm a shock one of your regular cohorts
with biasing	i'm ashock one of your regular cohorts
Negative examples	
gold text	it's evan bottcher here from melbourne
no biasing	it's evan botcher here from melbourne
with biasing	it's even bottcher here from melbourne
gold text	manuel you are talking to that
no biasing	manua you are talking to that
with biasing	manue you are talking to that
gold text	that data is ubiquitous
no biasing	that data is ibiicuous
with biasing	that data is ibiguous
gold text	this architecture as data mesh
no biasing	this architecture as datamish
with biasing	this architecture as data mish

OOV and Rare words: According to Table 4, it is clear that both greedy decoding and LM-fused beam search decoding are not successful at recognizing *OOV words*. In fact, on the podcast and meetings datasets these methods failed to detect any *OOV words* resulting in a 0% F1 score. LM fusion, on the other hand, significantly improves the recall and F1-score of recognizing *Rare words*, as these words are incorporated in the LM lexicon. By introducing keyword biasing techniques in the decoding process, we were able to drastically increase the recognition accuracy of *OOV* and *Rare words* (see the last row of Table 4).

Table 4

Evaluation results of OOV and Rare words with the numbers x/y representing the Recall and F1 scores, respectively. The third row shows the proportion of Rare and OOV words in the biasing lists for each evaluation dataset

	Podcast			Meetings			Earnings21 - oracle		
	OOV	Rare	All	OOV	Rare	All	OOV	Rare	All
Number of keywords	12 (9.37%)	49 (38.28%)	128 (100%)	17 (9.55%)	55 (30.9%)	178 (100%)	20 (7.4%)	100 (36.7%)	272 (100%)
Greedy decoding	7.41/13.79	24.37/38.67	47.03/62.34	0.0/0.0	4.51/8.53	39.74/56.26	5.65/10.69	22.42/34.59	70.38/79.30
Beam Search with LM	0.0/0.0	37.39/53.61	55.59/70.33	1.30/2.56	4.51/8.55	43.33/59.89	1.61/3.17	31.03/45.66	73.01/80.98
Keyword-biasing + Cost subtraction + Adaptive + ASP	44.44/60.0	72.46/81.62	78.84/86.10	19.48/32.61	51.88/66.13	66.67/77.15	51.61/67.37	57.40/62.15	84.00/79.84

Conclusions. In conclusion, we performed a comparative analysis of various adaptations to the beam search algorithm, including keyword-biasing, LM fusion, cost subtraction, adaptive boosting and alternate spelling prediction. Our evaluation was carried out on three datasets, and the results demonstrate that LM fusion can consistently boost the recall and precision of rare and common words, but does not help in recognizing OOV words. We observed significant improvement in recall when using keyword-biased beam search along with cost subtraction across all three datasets, while the use of the adaptive boosting method mostly improved precision. A further enhancement is achieved by employing an alternate spelling prediction approach.

REFERENCES

1. **Chan W., Jaitly N., Le Q., and Vinyals O.** Listen, attend and spell: A neural network for large vocabulary conversational speech recognition // IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP). -2016. -P. 4960–4964.
2. Robust speech recognition via large-scale weak supervision / **A. Radford, J.W. Kim, T. Xu, G. Brockman, et al:** ArXiv preprint arXiv:2212.04356, 2022.
3. **Graves A., Fernández S., Gomez F., and Schmidhuber J.** Connectionist temporal classification: labelling unsegmented sequence data with recurrent neural networks // Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning. -2006. -P. 369–376.
4. **Graves A.** Sequence transduction with recurrent neural networks: ArXiv preprint arXiv:1211.3711, 2012.
5. Deep context: end-to-end contextual speech recognition/ **G. Pundak, T.N. Sainath, R. Prabhavalkar, et al** // IEEE spoken language technology workshop (SLT). -2018. -P. 418–425.
6. **Chen Z., Jain M., Wang Y., Seltzer M.L., and Fuegen C.** Joint Grapheme and Phoneme Embeddings for Contextual End-to-End ASR // Interspeech. -2019. -P. 3490–3494.

7. **Alon U., Pundak G., and Sainath T.N.** Contextual speech recognition with difficult negative training examples // ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). -2019. -P. 6440–6444.
8. Contextual RNN-T for open domain ASR / **Jain M., Keren G., Mahadeokar J., Zweig G., et. al:** ArXiv preprint arXiv:2006.03411. -2020.
9. Composition-based on-the-fly rescoring for salient n-gram biasing/ **Hall K., Cho E., Allauzen C., Beaufays F., et. al** // Interspeech 2015, International Speech Communications Association.-2015.
10. **Jung N., Kim G., and Chung J.S.** Spell my name: keyword boosted speech recognition // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). -2022. -P. 6642–6646.
11. **Fox J. D. and Delworth N.** Improving Contextual Recognition of Rare Words with an Alternate Spelling Prediction Model // Interspeech. -2022.
12. Personalization of ctc speech recognition models/ **Dingliwal S., Sunkara M., Ronanki S., Farris J., et. al** // IEEE Spoken Language Technology Workshop (SLT). -2023. -P. 302–309.
13. **Le D., Koehler T., Fuegen C., and Seltzer M.L.** G2G: TTS-driven pronunciation learning for graphemic hybrid ASR // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). -2020. -P. 6869–6873.
14. Deep shallow fusion for RNN-T personalization/ **D. Le, G. Keren, J. Chan, J. Mahadeokar, et. al** // IEEE Spoken Language Technology Workshop (SLT).-2021.- P. 251–257.
15. Contextualized streaming end-to-end speech recognition with trie-based deep biasing and shallow fusion/ **Le, Duc, Mahaveer Jain, Gil Keren, Suyoun Kim, et al:** ArXiv preprint arXiv:2104.02194. -2021.
16. **Hannun A.Y., Maas A.L., Jurafsky D., and Ng A.Y.** First-pass large vocabulary continuous speech recognition using bi-directional recurrent dnns.: ArXiv preprint arXiv:1408.2873, -2014.
17. Deep speech: Scaling up end-to-end speech recognition/ **Hannun A., et al:** ArXiv preprint arXiv:1412.5567.-2014.
18. Earnings-21: A Practical Benchmark for ASR in the Wild/ **Rio M. D., et al.** -2021.
19. Conformer: Convolution-augmented transformer for speech recognition/ **Gulati A., et al.** ArXiv preprint arXiv:2005.08100. -2020.
20. **Heafield K.** KenLM: Faster and smaller language model queries // Proceedings of the sixth workshop on statistical machine translation. -2011. -P. 187–197.
21. **Papineni K., Roukos S., Ward T., and Zhu W.-J.** Bleu: a method for automatic evaluation of machine translation // Proceedings of the 40th annual meeting of the Association for Computational Linguistics. -2002. -P. 311–318.

National Polytechnic University of Armenia. The materials is received on 11.01.2024.

Դ.Ս. ՔԱՐԱՄՅԱՆ, Գ.Ա. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ

ԱՌԱՆՔՔԱՅԻՆ ԲԱՌԵՐԻ ՀԻՄՔՈՎ ԽՈՍՔԻ ՃԱՆԱԶՈՒՄ: ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆ

Անհայտ կամ հազվադեպ գործածվող բառերը, ինչպիսիք են տեխնիկական տերմիններն ու անունները ճանաչելու ունակությունը կարևոր է խոսքի ճանաչման տեխնոլոգիայի դեպքում՝ խոսակցությունները ճշգրիտ ընկալելու համար: Այնուամենայնիվ, ըստ խոսքի ճանաչման ներկայիս մոդելների՝ հաճախ դժվար է ճանաչել այն բառերը, որոնք հազվադեպ են գործածվում կամ երբեք չեն հանդիպում մոդելի ուսուցման ընթացքում: Աշխատանքում ուսումնասիրվել է առանցքային բառերի կանխակալման տարբեր մեթոդների արդյունավետությունը, որոնք ուրվագծվել են նախորդ հետազոտություններում և չեն պահանջում որևէ փոփոխություն խոսքի ճանաչման մոդելում:

Առանցքային բառեր. խոսքի ճանաչում, առանցքային բառեր, կոնտեքստային կանխակալություն:

Д.С. КАРАМЯН, Г.А. КИРАКОСЯН

РАСПОЗНАВАНИЕ РЕЧИ НА ОСНОВЕ КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ:
СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Способность распознавания неизвестных или редких слов, таких как технические термины и имена, является ключевой для того, чтобы технология распознавания речи точно понимала разговоры в контексте. Тем не менее, текущим моделям распознавания речи часто бывает сложно распознавать слова, которые редко или вообще не встречаются во время обучения. В данной работе изучается эффективность различных методов смещения ключевых слов, а также их модификации, которые были описаны в предыдущих исследованиях и не требовали внесения изменений в модель распознавания речи.

Ключевые слова: распознавание речи, ключевые слова, контекстуальная предвзятость.

UDC 621.382

MICROELECTRONICS

DOI: 10.53297/0002306X-2023.v76.4-506

A.A. AVETISYAN

INVESTGATING POWER METRICS OF NEURAL NETWORKS AFTER PRUNING, QUANTIZATION, DPU IMPLEMENTATION: A COMPARATIVE ANALYSIS

The rapid proliferation of deep learning applications in various fields has highlighted the need for efficient neural network implementations, especially on resource-constrained edge devices. In response to this demand, pruning and quantization have emerged as essential techniques to reduce the computational and memory requirements of neural networks. Additionally, the deployment of dedicated hardware, such as Digital Processing Units (DPUs), has gained momentum for accelerating neural network inference.

This paper presents a comprehensive comparative analysis of the power metrics of neural networks after pruning and quantization, with a particular focus on their implementation on DPUs. The objective of this research is to investigate the energy efficiency and power consumption of pruned and quantized neural networks when executed on DPU platforms. The trade-offs between model size reduction and inference accuracy, as well as the power efficiency of different DPU architectures are researched.

The results reveal insights into the power efficiency of pruned and quantized neural networks on DPU platforms, offering a clear understanding of the benefits and trade-offs associated with these optimization techniques.

This research provides a valuable resource for researchers, developers, and practitioners interested in optimizing neural network implementations for power efficiency. The findings contribute to the ongoing effort to make deep learning more accessible and sustainable on edge devices and other power-constrained environments, ultimately enabling a wider range of applications with reduced energy consumption.

Keywords: FPGA, DPU, pruning, quantization.

Introduction. The widespread adoption of deep learning has revolutionized the fields of artificial intelligence and machine learning, propelling remarkable advancements in various applications such as image recognition, natural language processing, autonomous systems, etc. However, this transformation has not come without its challenges, particularly when deploying deep neural networks on resource-constrained edge devices. As the demand for efficient, low-power artificial intelligence (AI) solutions continues to grow, researchers and engineers have turned their attention to techniques that reduce the computational and memory footprint of neural networks. Among these techniques, pruning [1] and quantization

[2] have emerged as pivotal strategies, allowing neural networks to maintain high performance while consuming fewer resources.

In parallel with the quest for resource-efficient neural networks, the development and utilization of dedicated hardware accelerators have gained momentum. Digital Processing Units (DPUs) [3] represent a class of specialized hardware designed to optimize neural network inference, offering both computational power and energy efficiency. This paper delves into the intersection of these two key domains: neural network optimization through pruning and quantization, and the deployment of these networks on DPU platforms.

The primary objective of this paper is to conduct a thorough and comparative analysis of the power metrics associated with neural networks after pruning and quantization, with a specific focus on their execution on DPUs. Pruning involves removing unimportant network connections, effectively reducing model size and, in some cases, enhancing inference speed. Quantization, on the other hand, reduces the precision of network weights and activations, thus leading to further compression of the model and resource-efficient execution. These techniques have the potential to unlock AI capabilities on edge devices, where computational and power constraints are paramount.

The findings presented in this paper hold relevance for researchers, developers, and practitioners engaged in the pursuit of efficient neural network implementations. This paper contributes to the ongoing effort to make deep learning more accessible and sustainable in power-constrained environments, fostering the proliferation of AI at the edge.

From autonomous vehicles and medical diagnostics to virtual assistants and industrial automation, DNNs have demonstrated their prowess in solving complex problems and enabling intelligent decision-making. Yet, as these networks have grown in size and complexity, so too have the challenges associated with deploying them efficiently on resource-constrained edge devices.

To address these challenges, researchers and engineers are trying to optimize the execution of DNNs. As a result, two main techniques were developed: pruning and quantization. Pruning focuses on reducing model size and computational demands by identifying and eliminating redundant network connections. Quantization, on the other hand, aims to reduce memory requirements and accelerate computation by decreasing the precision of network parameters. Together, these techniques have the potential to make deep learning feasible on devices with limited computational resources.

While neural network optimization, power efficiency, and hardware acceleration are widely studied topics, there are several key papers worth mentioning. Each of them gives a thorough description and together they make it possible to perform a comparative analysis.

In [4] the concept of efficient model scaling is introduced, demonstrating that model size and computational requirements can be balanced to achieve resource-efficient DNNs. EfficientNet serves as a foundational reference in the pursuit of optimizing DNNs for edge deployments. [5] presents a comprehensive study of quantization techniques, highlighting the advantages of reducing bit precision in network parameters. This work has inspired numerous studies on efficient DNN execution.

Pruning, with its potential to create compact neural networks, has attracted significant attention, as evidenced by paper [6]. This pioneering work laid the groundwork for understanding how network pruning can lead to a reduction in model size without sacrificing performance. Furthermore, the development of hardware accelerators tailored for neural network inference is described in [7]. It contains insights into specialized hardware designed to enhance the DNN execution efficiency.

In the following sections quantization, pruning and DPU implementation are researched, to understand the overall tradeoffs during neural network optimizations.

Method. The model is trained on the “Kaggle Dogs vs. Cats” dataset. After the training is finished, the model accuracy reaches 97.7%. The evaluation is performed on 1000 image dataset, and the power consumption is monitored via sensors on the GPU.

Then the trained model is pruned. Pruning is an iterative process in which the network is reduced by a certain amount (10% per iteration is used in this work) and then fine-tuned (retrained) to bring its performance back to the original. In this work, we are repeating the pruning-retraining sequence six times. The final model’s accuracy reaches 92.94%. After the pruning is done, the model is evaluated similarly as it was done for the original float model and the power is measured again.

To further reduce the model’s power consumption, quantization is applied to the pruned model. Quantization is a technique used to reduce the memory footprint and computational requirements of CNNs by representing and performing computations with lower precision data types. In a standard CNN, weights and activations are typically represented as 32-bit floating-point numbers (FP32), which consume significant memory and require higher computational resources. Quantization aims to replace these higher precision representations with lower precision data types, such as fixed-point or integer values, which have fewer bits.

Finally, the quantized CNN is taken and compiled for the proper DPU architecture.

The DPU is a soft-core IP whose only function is to accelerate the execution of CNNs. It acts as a co-processor to the host processor and has its own instruction

set: the Vitis AI compiler will convert and optimize, where possible, the quantized model to a set of micro-instructions and then output them to an xmodel file for the DPU.

The action sequence described in the previous paragraphs forms a standard flow which is shown in Fig. 1.

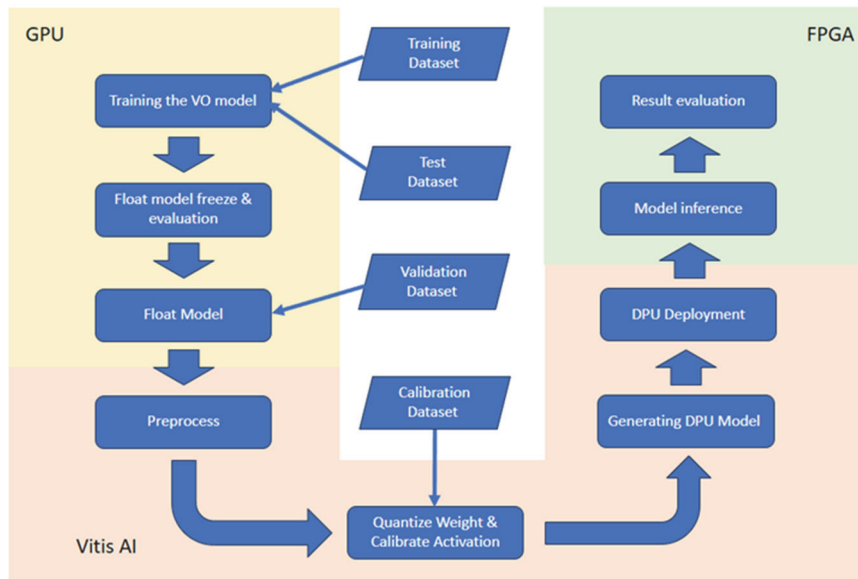


Fig. 1. DPU deployment flow

Experimental results. The experiments show that pruning and quantization are reducing overall power consumption. At the same time, network performance and accuracy do not suffer much. The simulation accuracy results and power measurements are presented in Table.

Table

Object recognition neural network performance after pruning and quantization

	Power (Watts)	Accuracy (%)
Float	26.810	97.7
Prune1	23.403	96.4
Prune2	23.648	96.3
Prune3	20.446	94.1
Prune4	19.101	93.8
Prune5	17.252	93.4
Prune6	15.383	92.9
Quantize	11.165	92.8

The DPU implementation is further reducing power consumption to an extent of 9.864 Watts. So, the tradeoff is 4.9% in accuracy vs 63.21% power reduction.

Although the implemented DPU has high utilization percent, the tested neural network is relatively small, meaning that the power efficiency can increase further for bigger neural networks.

Conclusion. Based on the analysis of power metrics for neural networks after pruning and quantization and their implementation on DPUs, the research demonstrates that these optimization techniques reduce power consumption by 63% while maintaining high accuracy levels of 92.8%. This balance showcases the efficiency of DPUs in executing complex models with reduced energy requirements. The findings highlight the potential for wider application and sustainability of AI in power-constrained environments, pointing towards a future where deep learning is more accessible on edge devices.

REFERENCES

1. **Nagel, M., Fournarakis, M., Amjad, R.A., Bondarenko, Y., van Baalen, M., & Blankevoort, T.** A White Paper on Neural Network Quantization. Qualcomm AI Research. – 2021.
2. **Hongrong Cheng, Miao Zhang,** Javen Qinfeng Shi A Survey on Deep Neural Network Pruning-Taxonomy, Comparison, Analysis, and Recommendations – ArXiv. – 2023.
3. <https://www.xilinx.com/products/intellectual-property/dpu.html#documentation>
4. **Tan, M., & Le, Q.V.** EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. – ArXiv. - 2019.
5. Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference/ **B. Jacob, B.S. Kligys, B. Chen, M. Zhu, et al,** Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). - 2018.
6. **Song Han, Jeff Pool, John Tran, William J. Dally** Learning both weights and connections for efficient neural network // Advances in Neural Information Processing Systems. - 2015.- P. 1135-1143.
7. **Chen Y.-H., Krishna T., Emer J.S. and Sze V.** Eyeriss: An Energy-Efficient Reconfigurable Accelerator for Deep Convolutional Neural Networks//IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017.- Vol. 52, no. 1.- P. 127-138.

National Polytechnic University of Armenia. The materials is received on 29.01.2024.

Ա.Ա. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

ՆԵՅՐՈՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԵՐԻ ԶԱՏՈՒՄԻՑ, ՔՎԱՆՏԱՑՈՒՄԻՑ, DPU-Ի ՎՐԱ ԻՐԱԿԱՆՈՒՑԻՄԻՑ ՀԵՏՈ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԱՆՋԱՏՄԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄ: ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ

Տարբեր ոլորտներում խոր ուսուցման կիրառությունների արագ տարածումը ցույց տվեց նեյրոնային ցանցերի արդյունավետ ներդրման անհրաժեշտությունը, հատկապես ռեսուրսներով սահմանափակ եզրային սարքերում: Ի պատասխան այս պահանջի՝ զատումը և քվանտացումը առաջացել են որպես նեյրոնային ցանցերի հաշվողական և հիշողության պահանջները էականորեն նվազեցնելու եղանակներ: Բացի այդ, մասնագիտացված սարքերի տեղակայումը, որոնցից են թվային մշակման միավորները (DPU), դարձել է նեյրոնային ցանցերի արագագործությունը մեծացնելու կիրառվող եղանակ:

Աշխատանքում ներկայացվել է նեյրոնային ցանցերի հզորության չափումների համապարփակ համեմատական վերլուծություն զատումից և քվանտացումից հետո՝ հատուկ ուշադրություն դարձնելով դրանց՝ DPU սարքերի վրա իրականացմանը: Հետազոտության նպատակն է ուսումնասիրել զատված և քվանտացված նեյրոնային ցանցերի էներգաարդյունավետությունը և հզորության սպառումը DPU հարթակներում գործելու ժամանակ: Ուսումնասիրված են մոդելի չափերի կրճատման և արդյունքի ճշգրտության փոխզիջումները, ինչպես նաև տարբեր DPU ճարտարապետությունների էներգաարդյունավետությունը:

Արդյունքները DPU հարթակներում զատված և քվանտացված նեյրոնային ցանցերի էներգաարդյունավետության մասին տեղեկություններ են տրամադրում՝ և տալիս հստակ պատկերացում լավարկման այս մեթոդի առավելությունների և փոխզիջումների մասին:

Հետազոտությունը էներգախնայողության համար նեյրոնային ցանցերի ներդրման լավարկմամբ հետաքրքրվող հետազոտողների, մշակողների և իրագործողների համար արժեքավոր ռեսուրս է տրամադրում: Գտածոները նպաստում են եզրային սարքերում և էներգիայի սահմանափակումով այլ միջավայրերում խոր ուսուցումն ավելի մատչելի և կայուն դարձնելու շարունակական ջանքերին՝ ի վերջո ապահովելով ցածր էներգասպառմամբ սարքերի ավելի լայն կիրառությունների հնարավորություն:

Առանցքային բառեր. FPGA, DPU, զատում, քվանտացում:

А.А. АВЕТИСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПОСЛЕ СОКРАЩЕНИЯ, КВАНТОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ НА DPU. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Быстрое распространение приложений глубокого обучения в различных областях вызывает необходимость эффективных реализаций нейронных сетей, особенно на периферийных устройствах с ограниченными ресурсами. В ответ на этот спрос обрезка и квантование стали важными методами снижения вычислительных требований и требований к памяти нейронных сетей. Кроме того, развертывание специального оборудования, такого как цифровые процессоры (DPU), набирает обороты для ускорения вывода нейронных сетей.

Представлен всесторонний сравнительный анализ показателей потребляемой мощности нейронных сетей после обрезки и квантования с особым акцентом на их реализацию на DPU. Целью данного исследования является изучение энергоэффективности и энергопотребления сокращенных и квантованных нейронных сетей при их выполнении на платформах DPU. Исследуются компромиссы между уменьшением размера модели и точностью вывода, а также энергоэффективностью различных архитектур DPU.

Результаты дают представление об энергоэффективности сокращенных и квантованных нейронных сетей на платформах DPU, предлагая четкое понимание преимуществ и компромиссов, связанных с этими методами оптимизации.

Исследование предоставляет ценный ресурс для исследователей, разработчиков и практиков, заинтересованных в оптимизации реализации нейронных сетей для повышения энергоэффективности. Полученные результаты способствуют постоянным усилиям, направленным на то, чтобы сделать глубокое обучение более доступным и устойчивым на периферийных устройствах и в других средах с ограниченным энергопотреблением, что в конечном итоге позволит использовать более широкий спектр приложений с меньшим потреблением энергии.

Ключевые слова: FPGA, DPU, обрезка, квантование.

С.О. СИМОНЯН, М.Г. ЧИЛИНГАРЯН, О.С. АБГАРЯН

ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
КОМПЛЕКСНЫХ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБОБЩЕННЫХ
ОБРАТНЫХ МАТРИЦ МУРА-ПЕНРОУЗА (II)

Предложены аналитические и численно-аналитические декомпозиционные методы определения комплексных однопараметрических обобщенных обратных матриц Мура-Пенроуза. Аналитические методы основаны на первых двух условиях Мура-Пенроуза. Показано, что в обоих случаях получается одно и то же решение задачи, что и должно было быть. Численно-аналитические методы основаны на полученных аналитических соотношениях и дифференциальных преобразованиях Пухова. Рассмотрен модельный пример.

Ключевые слова: комплексные однопараметрические матрицы, обобщенные обратные матрицы Мура-Пенроуза, аналитические и численно-аналитические решения, дифференциальные преобразования, средства современных информационных технологий, модельный пример.

Введение. В работе [1] были предложены методы определения комплексных однопараметрических обобщенных обратных матриц Мура-Пенроуза $A^+(t)_{n \times m}$ при недоопределенных матрицах $A(t)_{m \times n}$, т.е. когда $m < n$. При этих методах были использованы условия Мура-Пенроуза (1, I) и (2, I) этой работы. В настоящей работе рассматриваются методы определения комплексных однопараметрических обобщенных обратных матриц Мура-Пенроуза $A^+(t)_{n \times m}$ при переопределенных матрицах $A(t)_{m \times n}$, т.е. когда $m > n$, причем и в этом случае используются условия Мура-Пенроуза (1, I) и (2, I).

I. Аналитические решения. Пусть имеется матрица $A(t)_{m \times n}$, для которой $m > n$. По аналогии с автономными матрицами $A_{m \times n}$, обобщенная обратная $A^+(t)_{n \times m}$ будет иметь вид [2, 3]

$$A^+(t)_{n \times m} = [A^*(t) \cdot A(t)]_{n \times n}^+ \cdot A^*(t)_{n \times m}. \quad (1)$$

При разложении (6, I) матрица имеет вид

$$[A^*(t) \cdot A(t)] = [A_1(t) - j \cdot A_2(t)]^T \cdot [A_1(t) + j \cdot A_2(t)] = [A_1^T(t) \cdot A_1(t) + A_2^T(t) \cdot A_2(t)] + j \cdot [A_1^T(t) \cdot A_2(t) - A_2^T(t) \cdot A_1(t)] = C_1(t) + j \cdot C_2(t), \quad (2)$$

где

$$C_1(t)_{n \times n} = A_1^T(t) \cdot A_1(t) + A_2^T(t) \cdot A_2(t), \quad (3)$$

$$C_2(t)_{n \times n} = A_1^T(t) \cdot A_2(t) - A_2^T(t) \cdot A_1(t), \quad (4)$$

а также

$$[A^*(t) \cdot A(t)]^+ = [C_1(t) + j \cdot C_2(t)]^+ = [Y_1(t) + j \cdot Y_2(t)]_{n \times n}. \quad (5)$$

Замечание 1. Нетрудно убедиться, что матрица $C_1(t)$ симметрическая из-за симметричности слагаемых $A_1^T(t) \cdot A_1(t)$ и $A_2^T(t) \cdot A_2(t)$, а матрица $C_2(t)$ - кососимметрическая с нулевыми диагональными элементами.

Теперь перейдем к определению матрицы $A^+(t)$ с учетом представленных соотношений (1) – (5).

1. Использование условия Мура-Пенроуза (1, I) по отношению к матрице $[A^*(t) \cdot A(t)]$ приводит к следующему выражению:

$$[A^*(t) \cdot A(t)] \cdot [A^*(t) \cdot A(t)]^+ \cdot [A^*(t) \cdot A(t)] = [A^*(t) \cdot A(t)], \quad (6)$$

раскрытие которого с учетом (19, I) и (22, I) дает

$$[C_1(t) + j \cdot C_2(t)] \cdot [Y_1(t) + j \cdot Y_2(t)] \cdot [C_1(t) + j \cdot C_2(t)] = [C_1(t) + j \cdot C_2(t)]$$

или

$$\begin{aligned} & [C_1(t) \cdot Y_1(t) \cdot C_1(t) - C_2(t) \cdot Y_2(t) \cdot C_1(t) - C_1(t) \cdot Y_2(t) \cdot C_2(t) - \\ & - C_2(t) \cdot Y_1(t) \cdot C_2(t)] + j \cdot [C_1(t) \cdot Y_1(t) \cdot C_2(t) - C_2(t) \cdot Y_2(t) \cdot C_2(t) + \\ & + C_1(t) \cdot Y_2(t) \cdot C_1(t) + C_2(t) \cdot Y_1(t) \cdot C_1(t)] = [C_1(t) + j \cdot C_2(t)], \end{aligned}$$

откуда имеем матричную систему

$$\begin{cases} C_1(t) \cdot Y_1(t) \cdot C_1(t) - C_2(t) \cdot Y_2(t) \cdot C_1(t) - C_1(t) \cdot Y_2(t) \cdot C_2(t) - C_2(t) \cdot Y_1(t) \cdot C_2(t) = C_1(t), \\ C_1(t) \cdot Y_1(t) \cdot C_2(t) - C_2(t) \cdot Y_2(t) \cdot C_2(t) + C_1(t) \cdot Y_2(t) \cdot C_1(t) + C_2(t) \cdot Y_1(t) \cdot C_1(t) = C_2(t), \end{cases} \quad (7)$$

или

$$\begin{bmatrix} [C_1(t) \cdot Y_1(t) - C_2(t) \cdot Y_2(t)] & - [C_1(t) \cdot Y_2(t) + C_2(t) \cdot Y_1(t)] \\ [C_1(t) \cdot Y_2(t) + C_2(t) \cdot Y_1(t)] & [C_1(t) \cdot Y_1(t) - C_2(t) \cdot Y_2(t)] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{bmatrix},$$

или

$$\begin{bmatrix} [C_1(t) & -C_2(t)] \\ [C_2(t) & C_1(t)] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [Y_1(t) & -Y_2(t)] \\ [Y_2(t) & Y_1(t)] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{bmatrix},$$

или

$$\begin{bmatrix} [C_1(t) & -C_2(t)] \\ [C_2(t) & C_1(t)] \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \cdot \begin{bmatrix} [Y_1(t) & -Y_2(t)] \\ [Y_2(t) & Y_1(t)] \end{bmatrix}_{2n \times 2n} - E_{2n \times 2n} \cdot \begin{bmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{bmatrix}_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{2n \times 2n}. \quad (8)$$

Из последнего соотношения имеем:

а) либо

$$\begin{bmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} C_1(t) - C_2(t) \\ C_2(t) - C_1(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_1(t) - Y_2(t) \\ Y_2(t) - Y_1(t) \end{bmatrix} - E = [0], \quad (9)$$

следовательно,

$$\begin{bmatrix} Y_1(t) - Y_2(t) \\ Y_2(t) - Y_1(t) \end{bmatrix}_{2 \times 2n} = \begin{bmatrix} C_1(t) - C_2(t) \\ C_2(t) - C_1(t) \end{bmatrix}_{2n \times 2n}^+; \quad (10)$$

б) либо

$$\begin{bmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} C_1(t) - C_2(t) \\ C_2(t) - C_1(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_1(t) - Y_2(t) \\ Y_2(t) - Y_1(t) \end{bmatrix} - E \neq [0],$$

что не представляет никакого интереса.

Таким образом, имея матрицы $Y_1(t)$ и $Y_2(t)$, в соответствии с (1), (2) и (5) можно определить и матрицу

$$A^+(t)_{n \times m} = [Y_1(t) + j \cdot Y_2(t)] \cdot [A_1(t) - j \cdot A_2(t)]^T = [Y_1(t) \cdot A_1^T(t) + Y_2(t) \cdot A_2^T(t)] + j \cdot [Y_2(t) \cdot A_1^T(t) - Y_1(t) \cdot A_2^T(t)]. \quad (11)$$

2. Использование условия Мура-Пенроуза (2, I) по отношению к матрице $[A^*(t) \cdot A(t)]$ приводит к следующему выражению:

$$[A^*(t) \cdot A(t)]^+ \cdot [A^*(t) \cdot A(t)] \cdot [A^*(t) \cdot A(t)]^+ = [A^*(t) \cdot A(t)]^+, \quad (12)$$

раскрытие которого с учетом (2) и (5) дает

$$[Y_1(t) + j \cdot Y_2(t)] \cdot [C_1(t) + j \cdot C_2(t)] \cdot [Y_1(t) + j \cdot Y_2(t)] = [Y_1(t) + j \cdot Y_2(t)]$$

или

$$\begin{aligned} & [Y_1(t) \cdot C_1(t) \cdot Y_1(t) - Y_2(t) \cdot C_2(t) \cdot Y_1(t) - Y_1(t) \cdot C_2(t) \cdot Y_2(t) - \\ & - Y_2(t) \cdot C_1(t) \cdot Y_2(t)] + j \cdot [Y_1(t) \cdot C_1(t) \cdot Y_2(t) - Y_2(t) \cdot C_2(t) \cdot Y_2(t) + \\ & + Y_1(t) \cdot C_2(t) \cdot Y_1(t) + Y_2(t) \cdot C_1(t) \cdot Y_1(t)] = [Y_1(t) + j \cdot Y_2(t)], \end{aligned}$$

откуда имеем матричную систему

$$\begin{cases} Y_1(t) \cdot C_1(t) \cdot Y_1(t) - Y_2(t) \cdot C_2(t) \cdot Y_1(t) - Y_1(t) \cdot C_2(t) \cdot Y_2(t) - Y_2(t) \cdot C_1(t) \cdot Y_2(t) = Y_1(t), \\ Y_1(t) \cdot C_1(t) \cdot Y_2(t) - Y_2(t) \cdot C_2(t) \cdot Y_2(t) + Y_1(t) \cdot C_2(t) \cdot Y_1(t) + Y_2(t) \cdot C_1(t) \cdot Y_1(t) = Y_2(t), \end{cases} \quad (13)$$

или

$$\begin{bmatrix} [Y_1(t) \cdot C_1(t) - Y_2(t) \cdot C_2(t)] \\ [Y_1(t) \cdot C_2(t) + Y_2(t) \cdot C_1(t)] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [Y_1(t) \cdot C_2(t) + Y_2(t) \cdot C_1(t)] \\ [Y_1(t) \cdot C_1(t) - Y_2(t) \cdot C_2(t)] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \end{bmatrix},$$

или

$$\begin{bmatrix} Y_1(t) & -Y_2(t) \\ Y_2(t) & Y_1(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1(t) & -C_2(t) \\ C_2(t) & C_1(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \end{bmatrix},$$

или

$$\begin{bmatrix} Y_1(t) & -Y_2(t) \\ Y_2(t) & Y_1(t) \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \cdot \begin{bmatrix} C_1(t) & -C_2(t) \\ C_2(t) & C_1(t) \end{bmatrix}_{2n \times 2n} - E_{2n \times 2n} \cdot \begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \end{bmatrix}_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{2n \times 2n}. \quad (14)$$

Из последнего соотношения имеем:

а) либо

$$\begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} Y_1(t) & -Y_2(t) \\ Y_2(t) & Y_1(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1(t) & -C_2(t) \\ C_2(t) & C_1(t) \end{bmatrix} - E = [0], \quad (15)$$

следовательно,

$$\begin{bmatrix} Y_1(t) & -Y_2(t) \\ Y_2(t) & Y_1(t) \end{bmatrix}_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} C_1(t) & -C_2(t) \\ C_2(t) & C_1(t) \end{bmatrix}_{2n \times 2n}^+; \quad (16)$$

б) либо

$$\begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} Y_1(t) & -Y_2(t) \\ Y_2(t) & Y_1(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1(t) & -C_2(t) \\ C_2(t) & C_1(t) \end{bmatrix} - E \neq [0],$$

что не представляет никакого интереса.

Таким образом, имея матрицы $Y_1(t)$ и $Y_2(t)$, в соответствии с (11) можно определить и матрицу $A^+(t)_{n \times m}$.

Замечание 2. Очевидно, что при использовании условий Мура-Пенроуза (1, I) и (2, I) и здесь пришли к одному и тому же аналитическому решению, т.е. (10) $\equiv$ (16).

II. Численно-аналитические решения. В качестве основного математического аппарата воспользуемся дифференциальными преобразованиями [4, 5].

Обозначим

$$C(t) = \begin{bmatrix} C_1(t) & -C_2(t) \\ C_2(t) & C_1(t) \end{bmatrix}, Y(t) = \begin{bmatrix} Y_1(t) & -Y_2(t) \\ Y_2(t) & Y_1(t) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

при которых матричные дискреты (прямые преобразования)

$$C(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \left[\frac{d^K C(t)}{dt^K} \right]_{t=t_\gamma}, \quad K = \overline{0, \infty}, \quad (18)$$

$$Y(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \left[\frac{d^K Y(t)}{dt^K} \right]_{t=t_\gamma}, \quad K = \overline{0, \infty}, \quad (19)$$

а тейлоровские матричные оригиналы (обратные преобразования):

$$C(t) = \mathfrak{a}_3(t, t_\gamma, H, C(K)) = \sum_{K=0}^{\infty} \left(\frac{t-t_\gamma}{H} \right)^K \cdot C(K) \quad (20)$$

$$Y(t) = \mathfrak{a}_4(t, t_\gamma, H, Y(K)) = \sum_{K=0}^{\infty} \left(\frac{t-t_\gamma}{H} \right)^K \cdot Y(K), \quad (21)$$

где t_γ - центр аппроксимации тейлоровских разложений; H - масштабный коэффициент, выравнивающий размерности оригиналов и их изображений; K - целочисленный аргумент; $\mathfrak{a}_3(\cdot)$ и $\mathfrak{a}_4(\cdot)$ - тейлоровские матричные функции, восстанавливающие оригиналы $C(t)$ и $Y(t)$ соответственно. Естественно, при этом предполагается, что все элементы матриц $C(t)$ и $Y(t)$ обладают достаточной степенью гладкости в центре аппроксимации t_γ .

Замечание 3. Матрицы $C(t)$ и $Y(t)$ блочно-кососимметрические относительно первой главной диагонали и блочно-симметрические относительно второй главной диагонали.

Замечание 4. Матричные оригиналы (20) и (21) могут быть восстановлены и другими обратными дифференциальными преобразованиями (например, маклореновскими ($t_\gamma = 0$), дробно-рациональными (Паде), одноточечными, многоточечными и др. [4]).

Теперь перейдем к использованию дифференциальных преобразований для перевода оригиналов (9) и (15) в область дифференциальных изображений.

1. D - аналог условия (9)

Использование дифференциальных преобразований для перевода оригинала (9) в область дифференциальных изображений при соотношениях (17) - (21) приводит к следующему:

при $K = 0$:

$$C(0) \cdot Y(0) = E \cdot \delta(K), \quad \delta(K) = \begin{cases} 1, & \text{если } K = 0, \\ 0, & \text{если } K \geq 1, \end{cases}$$

2nx2n

откуда

$$Y(0) = C^+(0); \quad (22)$$

при $K = 1$:

$$C(0) \cdot Y(1) + C(1) \cdot Y(0) = 0,$$

откуда

$$Y(1) = -C^+(0) \cdot C(1) \cdot C^+(0); \quad (23)$$

при $K = 2$:

$$C(0) \cdot Y(2) + C(1) \cdot Y(1) + C(2) \cdot Y(0) = 0,$$

откуда

$$Y(2) = C^+(0) \cdot [-C(2) + C(1) \cdot C^+(0) \cdot C(1)] \cdot C^+(0); \quad (24)$$

при $K = 3$:

$$C(0) \cdot Y(3) + C(1) \cdot Y(2) + C(2) \cdot Y(1) + C(3) \cdot Y(0) = 0,$$

откуда

$$Y(3) = C^+(0) \cdot [-C(3) + C(1) \cdot C^+(0) \cdot C(2) - \\ - C(1) \cdot C^+(0) \cdot C(1) \cdot C^+(0) \cdot C(1) + C(2) \cdot C(0) \cdot C(1)] \cdot C^+(0); \quad (25)$$

при $K = K$:

$$C(0) \cdot Y(K) + \sum_{l=1}^K C(l) \cdot Y(K-l) = 0,$$

откуда

$$Y(K) = -C^+(0) [\sum_{l=1}^K C(l) \cdot Y(K-l)], K = \overline{1, \infty} \quad (26)$$

Таким образом, имея матричные дискреты $Y(K)$, $K = \overline{0, \infty}$, будем иметь и блоки $Y_1(K)$ и $Y_2(K)$, а следовательно, оригиналы $Y_1(t)$ и $Y_2(t)$ в соответствии с (21). Тогда можно определить и матрицу $A^+(t)_{n \times m}$ в соответствии с (11).

2. D - аналог условия (15)

Использование дифференциальных преобразований для перевода оригинала (15) в область дифференциальных изображений при соотношениях (17) - (21) приводит к следующему:

при $K = 0$:

$$Y(0) \cdot C(0) = E \cdot \delta(K), \quad \delta(K) = \begin{cases} 1, \text{ если } K = 0, \\ 0, \text{ если } K \geq 1, \end{cases}$$

2nx2n

откуда

$$Y(0) = C^+(0) ; \quad (27)$$

при $K = 1$:

$$Y(0) \cdot C(1) + Y(1) \cdot C(0) = 0,$$

откуда

$$Y(1) = -C^+(0) \cdot C(1) \cdot C^+(0); \quad (28)$$

при $K = 2$:

$$Y(0) \cdot C(2) + Y(1) \cdot C(1) + Y(2) \cdot C(0) = 0,$$

откуда

$$Y(2) = C^+(0) \cdot [-C(2) + C(1) \cdot C^+(0) \cdot C(1)] \cdot C^+(0) ; \quad (29)$$

при $K = 3$:

$$Y(0) \cdot C(3) + Y(1) \cdot C(2) + Y(2) \cdot C(1) + Y(3) \cdot C(0) = 0,$$

откуда

$$Y(3) = C^+(0) \cdot [-C(3) + C(1) \cdot C^+(0) \cdot C(2) - \\ -C(1) \cdot C^+(0) \cdot C(1) \cdot C^+(0) \cdot C(1) + C(2) \cdot C^+(0) \cdot C(1)] \cdot C^+(0) ; \quad (30)$$

·
·
·

при $K = K$:

$$Y(K) \cdot C(0) + \sum_{l=1}^K Y(l) \cdot C(K-l) = 0,$$

откуда

$$Y(K) = -[\sum_{l=1}^K Y(l) \cdot C(K-l)] \cdot C^+(0), \quad K = \overline{1, \infty}. \quad (31)$$

Таким образом, имея матричные дискретные $Y(K)$, $K = \overline{0, \infty}$, будем иметь и блоки $Y_1(K)$ и $Y_2(K)$, а следовательно, оригиналы $Y_1(t)$ и $Y_2(t)$ в соответствии с (21). Тогда можно определить и матрицу $A^+(t)_{n \times m}$ в соответствии с (11).

Замечание 5. Во всех предложенных в настоящей работе вычислительных схемах, очевидно, оперируем квадратными обобщенными обратными матрицами в отличие от вычислительных схем работы [5], в которой оперируем прямоугольными обобщенными обратными матрицами. Это обстоятельство, естественно, обуславливает получение точных, а не приближенных решений задачи.

III. Модельный пример. Пусть задана матрица из работы [1]:

$$A(t) = \begin{bmatrix} (1+jt) & jt \\ -jt & (1-jt) \end{bmatrix}, m = n = 2,$$

для которой, очевидно,

$$A^+(t) = \begin{bmatrix} (1-jt) & -jt \\ jt & (1+jt) \end{bmatrix} = A^{-1}(t), \text{ ибо } \det A(t) = 1.$$

С другой стороны, в соответствии с (6, I), (1) - (5), (10) и (16) имеем

$$A_1(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, A_2(t) = \begin{bmatrix} t & t \\ -t & -t \end{bmatrix},$$

$$C_1(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t & -t \\ t & -t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t & t \\ -t & -t \end{bmatrix} = \dots = \begin{bmatrix} (1+2t^2) & 2t^2 \\ 2t^2 & (1+2t^2) \end{bmatrix},$$

$$C_2(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t & t \\ -t & -t \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t & -t \\ t & -t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \dots = \begin{bmatrix} 0 & 2t \\ -2t & 0 \end{bmatrix},$$

а также

$$\begin{aligned} \left[\begin{array}{c|c} Y_1(t) & -Y_2(t) \\ \hline Y_2(t) & Y_1(t) \end{array} \right] &= \left[\begin{array}{c|c} C_1(t) & -C_2(t) \\ \hline C_2(t) & C_1(t) \end{array} \right]^+ = \\ &= \left[\begin{array}{cc|cc} (1+2t^2) & 2t^2 & 0 & -2t \\ 2t^2 & (1+2t^2) & 2t & 0 \\ \hline 0 & 2t & (1+2t^2) & 2t^2 \\ -2t & 0 & 2t^2 & (1+2t^2) \end{array} \right]^+ = \dots = \\ &= \dots = \left[\begin{array}{cc|cc} (1+2t^2) & -2t^2 & 0 & 2t \\ -2t^2 & (1+2t^2) & -2t & 0 \\ \hline 0 & -2t & (1+2t^2) & -2t^2 \\ 2t & 0 & -2t^2 & (1+2t^2) \end{array} \right], \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} C(t) &= \left[\begin{array}{cc|cc} (1+2t^2) & 2t^2 & 0 & -2t \\ 2t^2 & (1+2t^2) & 2t & 0 \\ \hline 0 & 2t & (1+2t^2) & 2t^2 \\ -2t & 0 & 2t^2 & (1+2t^2) \end{array} \right], \\ Y(t) &= \left[\begin{array}{cc|cc} (1+2t^2) & -2t^2 & 0 & 2t \\ -2t^2 & (1+2t^2) & -2t & 0 \\ \hline 0 & -2t & (1+2t^2) & -2t^2 \\ 2t & 0 & -2t^2 & (1+2t^2) \end{array} \right]. \end{aligned}$$

Теперь перейдем к использованию численно-аналитического метода (22) – (26).

Очевидно, при $t_\gamma = 0, H = 1$:

$$C(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = C^+(0) = Y(0), C(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C(2) = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \end{bmatrix}, C(K \geq 3) = [0].$$

Следовательно:

при $K = 1$:

$$Y(1) = -C^+(0) \cdot C(1) \cdot C^+(0) = \dots = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

при $K = 2$:

$$Y(2) = C^+(0) \cdot [-C(2) + C(1) \cdot C^+(0) \cdot C(1)] \cdot C^+(0) = -C(2) + C^2(1) =$$

$$\dots = \begin{bmatrix} -2 & -2 & 0 & 0 \\ -2 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & -2 \\ 0 & 0 & -2 & -2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 \\ -2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -2 \\ 0 & 0 & -2 & 2 \end{bmatrix};$$

при $K = 3$:

$$Y(3) = C^+(0) \cdot [-C(3) + C(1) \cdot C^+(0) \cdot C(2) -$$

$$-C(1) \cdot C^+(0) \cdot C(1) \cdot C^+(0) \cdot C(1) + C(2) \cdot C^+(0) \cdot C(1)] \cdot C^+(0) =$$

$$= C(1) \cdot C(2) - C^3(1) + C(2) \cdot C(1) = \dots =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4 & -4 \\ 0 & 0 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 0 & 0 \\ -4 & -4 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -8 \\ 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 \\ -8 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 4 & -4 \\ 0 & 0 & 4 & -4 \\ -4 & 4 & 0 & 0 \\ -4 & 4 & 0 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Нетрудно убедиться также, что при

при $K \geq 3$:

$$Y(K) = [0].$$

Таким образом, матрица $Y(t)$ в соответствии с (21) выглядит так:

$$\begin{aligned}
 Y(t) &= Y(0) + Y(1) \cdot t + Y(2) \cdot t^2 = \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot t + \begin{bmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 \\ -2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -2 \\ 0 & 0 & -2 & 2 \end{bmatrix} \cdot t^2 = \\
 &= \begin{bmatrix} (1+2t^2) & -2t^2 & 0 & 2t \\ -2t^2 & (1+2t^2) & -2t & 0 \\ 0 & -2t & (1+2t^2) & -2t^2 \\ 2t & 0 & -2t^2 & (1+2t^2) \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

что точно совпадает с представленным выше аналитическим решением. При этом решение задачи $A^+(t)$ в соответствии с (11) будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 A^+(t) &= [Y_1(t) + j \cdot Y_2(t)] \cdot [A_1(t) - j \cdot A_2(t)]^T = \\
 &= \left[\begin{bmatrix} (1+2t^2) & -2t^2 \\ -2t^2 & (1+2t^2) \end{bmatrix} + j \cdot \begin{bmatrix} 0 & -2t \\ 2t & 0 \end{bmatrix} \right] \cdot \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - j \cdot \begin{bmatrix} t & t \\ -t & -t \end{bmatrix} \right]^T = \dots = \\
 &= \begin{bmatrix} (1-jt) & -jt \\ jt & (1+jt) \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

что точно совпадает с решением, полученным в [1], что и должно было быть.

Заключение. В настоящей работе предложены точные аналитические и приближенные численно-аналитические вычислительные методы определения комплексных однопараметрических обобщенных обратных матриц Мура-Пенроуза. Численно-аналитические вычислительные схемы легко реализуемы средствами современных информационных технологий [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Симонян С.О., Чилингарян М.Г., Абгарян О.С.** Декомпозиционные методы определения комплексных однопараметрических обобщенных обратных матриц Мура-Пенроуза (I) // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. – 2023. – № 2. – С. 9 - 22.
2. **Гантмахер Ф.Р.** Теория матриц. - М.: Физматлит, 2010. - 560 с.
3. **Ланкастер П.** Теория матриц. - М.: Наука, 1978. - 280 с.
4. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные преобразования функций и уравнений. - Киев: Наукова думка, 1984. - 419 с.
5. **Симонян С.О.** Методы определения однопараметрических обобщенных обратных матриц: Монография. - LAP LAMBERT Academic Publishing RU, Saarbrücken, Deutschland, 2017. - 222 с.
6. **Kong Q., Siau T., Bayan A.** Python Programming and Numerical Methods. A Guide for Engineers and Scientists. - Academic Press, 2021. - 455p.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 19.12.2023.

Մ.Հ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ, Մ.Գ. ՉԻԼԻՆԳԱՐՅԱՆ, Հ.Ս. ԱԲԳԱՐՅԱՆ

**ՄՈՒՐ-ՊԵՆՐՈՈՒԶԻ ԿՈՄՊԼԵՔՍ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ԸՆԴՀԱՆՐԱՑՎԱԾ
ՀԱԿԱԴԱՐՁ ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ԴԵԿՈՄՊՈԶԻՑԻՈՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐ (II)**

Առաջարկվել են Մուր-Պենրոուզի կոմպլեքս միապարամետրական ընդհանրացված հակադարձ մատրիցների որոշման անալիտիկ և թվա-անալիտիկ դեկոմպոզիցիոն մեթոդներ: Անալիտիկ մեթոդները հիմնված են Մուր-Պենրոուզի առաջին երկու պայմանների վրա: Ցույց է տրվել, որ երկու դեպքում էլ ստացվում է միևնույն լուծումը, ինչը և պետք է լիներ: Թվա-անալիտիկ մեթոդները հիմնված են ստացված անալիտիկ հարաբերակցությունների և Պուխովի դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա: Դիտարկվել է մոդելային օրինակ:

Առանցքային բառեր. կոմպլեքս միապարամետրական մատրիցներ, Մուր-Պենրոուզի ընդհանրացված հակադարձ մատրիցներ, անալիտիկ և թվա-անալիտիկ լուծումներ, դիֆերենցիալ ձևափոխություններ, ժամանակակից տեղեկատվական տեխնոլոգիաների միջոցներ, մոդելային օրինակ:

S.H. SIMONYAN, M.G. CHILINGARYAN, H.S. ABGARYAN

**DECOMPOSITION METHODS FOR DETERMINING COMPLEX ONE-
PARAMETER GENERALIZED INVERSE MOORE-PENROSE
MATRICES (II)**

Analytical and numerical-analytical decomposition methods for determining complex one-parameter generalized inverse Moore-Penrose matrices are suggested. Analytical methods are based on the first two Moore-Penrose conditions. It is shown that in both cases, the same solution to the problem is obtained, as it should be. Numerical-analytical methods are based on the obtained analytical relations and differential Pukhov transformations. A model example is considered.

Keywords: complex one-parameter matrices, generalized inverse Moore-Penrose matrices, analytical and numerical-analytical solutions, differential transformations, means of modern information technologies, model example.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ԱՂԲԱԼՑԱՆ Ս.Գ., ԲԱՂԴԱՍԱՐՑԱՆ Վ.Ա., ՎԱՍԻԼՅԱՆ Գ.Ա., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ս.Ա.

ՏԱՔ ԱՐՏԱՄՂՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ ՁՈՒԼՎԱԾ ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՅԻՆ ՀԱՄԱՁՈՒԼՎԱԾՔՆԵՐԻ
ԴԵՖՈՐՄԱՑՄԱՆ ԼԱՐՎԱԾՄԱՅԻՆ ՎԻՃԱԿԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՈՒ
ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ՕՐԻՆԱԶՄՓՈԻԹՅՈՒՆՆԵՐԸ..... 409

ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Ն.Վ., ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Դ.Ս., ԱՐԱՂԻ Ս.Ա.Խ., ՎԱՆԴՈՒՆՅ Տ.Վ., ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ Ս.Գ., ՂԱԶԱՐՅԱՆ Ռ.Հ., ԵՐԵՄՅԱՆ Ա.Ս.

ՄԱՆԳԱՆԻ ՀԱՎԵԼՈՒՄՈՎ ԲԻՍՄՈՒԹ ՖԵՐԻՏԻ ԿԵՐԱՄԻԿԱԿԱՆ ՆՄՈՒՇՆԵՐԻ
ՍՏԱՅՈՒՄԸ ԵՎ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ 421

ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Ա.Ս., ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Դ.Գ., ՆԻԿՈՅԱՆ Ն.Ա.

ԲԱԶՄԱՄԵՏԱՂ-ՍՈՒԼՖԻԴԱՅԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹՅՈՒՆ ԴԻՐՈ-ՀԻԴՐՈՄԵՏԱԼՈՒԴԳԻԱԿԱՆ
ԵՂԱՆԱԿՈՎ ՊՂՆՁԻ, ՑԻՆԿԻ ԵՎ ԿԱՊԱՐԻ ԿՈՐԶՈՒՄԸ 436

ԴԵՄԻՐՉՅԱՆ Տ.Ա.

ՏԻՏԱՆԻ ԿԱՐԲԻԴԻ ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ՉԱՓԵՐԻ ԵՎ ՔԱՆԱԿԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ
Al-Cu ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԱՄԱՁՈՒԼՎԱԾՔԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԵՎ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՎՐԱ 442

ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ Լ.Ա. , ՀՈՎԱԿԻՍՅԱՆ Վ.Վ.

ԲԱՅԱՀԱՆՔԻ ԿՈՂԻ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ԲՆԱԿԱՆ ԼԵՌՆԱԼԱՆՁԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ
ԱՌԱՎԵԼԱԳՈՒՅՆ ԲԱՐՁՐՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ 451

ԲԱՂԴԱՍԱՐՑԱՆ Ա.Թ., ՄԱՍՅԱՆ Ս.Վ.

«ՊԱՇՏԱՐՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ԱՌԱՎԵԼԱԳՈՒՅՆ ԽՈՐՈՒԹՅՈՒՆ» ԿՈՆԴԻՑԻՍՅՈՒՆ
ՊԱՐԱՄԵՏՐԻ ՀԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄԸ ՊՂՆՁԱՄՈՒԲԳԵՆԱՅԻՆ ՇՏՈԿՎԵՐԿԱՅԻՆ
ՀԱՆՔԱՎԱՅՐԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ 460

ԱՐՄԱՂԱՆՅԱՆ Հ.Ա.

ՇԱՀՈՒՄՅԱՆԻ ՈՍԿԻ-ԲԱԶՄԱՄԵՏԱՂԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՎԱՅՐԻ ՍՏՈՐԳԵՏՆՅԱ ՄՇԱԿՄԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ 469

ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ Պ.Ս., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ա.Ս., ՍԱՐԳՍՅԱՆ Ս.Զ.

ՏՐԻՍՏՈՐԱՅԻՆ ՓՈԽԱԿԵՐՊԻՉԻՆ ԻՆԴՈՒԿՏՈՐԻ ՄԻԱՑՄԱՆ
ԱՎՏՈՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐԱՅԻՆ ՄԵԹՈԴ 480

ՔԱՐԱՄՅԱՆ Դ.Ս., ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ Գ.Ա.

ԱՌԱՆՅՔԱՅԻՆ ԲԱՌԵՐԻ ՀԻՄՔՈՎ ԽՈՍՔԻ ՃԱՆԱՉՈՒՄ: ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆ 493

ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Ա.Ա.

ՆԵՅՐՈՆԱՅԻՆ ՑԱՆՅԵՐԻ ԶԱՏՈՒՄԻՑ, ՔՎԱՆՏԱՅՈՒՄԻՑ, DPU-Ի ՎՐԱ
ԻՐԱԿԱՆՈՒՑԻՄԻՑ ՀԵՏՈ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԱՆՁԱՏՄԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄ:
ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ 506

ՄԻՍՈՆՅԱՆ Ս.Հ., ՉԻԼԻՆԳԱՐՅԱՆ Մ.Գ., ԱԲԳԱՐՅԱՆ Հ.Ս.

ՄՈՒՐ-ՊԵՆՐՈՈՒՋԻ ԿՈՄՊԼԵՔՍ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ԸՆԴՀԱՆՐԱՅՎԱԾ
ՀԱԿԱԴԱՐՁ ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ԴԵԿՈՄՊԻՈՋԻՑԻՈՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐ (II) 514

СОДЕРЖАНИЕ

АГБАЛЯН С.Г., БАГДАСАРЯН В.А., ВАСИЛЯН Г.А., АРУТЮНЯН С.А. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ЭКСТРАКЦИИ И ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ.....	409
МАРТИРОСЯН Н.В., МАРТИРОСЯН Д.С., АРАГИ М.А.Х., ВАНДУНЦ Т.В., АЙРАПЕТЯН С.Г., КАЗАРЯН Р.А., ЕРЕМЯН А.С. ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ФЕРРИТА ВИСМУТА, ЛЕГИРОВАННОГО МАРГАНЦЕМ, И ИЗУЧЕНИЕ ИХ СВОЙСТВ.....	421
ОГАНЕСЯН А.М., ВАРДАНИЯН Д.Г., НИКОЯН Н.А. ПИРОГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ СПОСОБ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕДИ, СВИНЦА И ЦИНКА ИЗ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СУЛЬФИДНОГО КОНЦЕНТРАТА	436
ДЕМИРЧЯН Т.А. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ И КОЛИЧЕСТВА КАРБИДА ТИТАНА НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL-CU	442
МАНУКЯН Л.А., ОВАКИМЯН В.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ ВЛИЯНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО СКЛОНА ГОРЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТА НАГОРНОГО КАРЬЕРА.....	451
БАГДАСАРЯН А.Т., МАМЯН С.В. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА КОНДИЦИИ “МАКСИМАЛЬНАЯ ГЛУБИНА ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ” В УСЛОВИЯХ ШТОКВЕРКОВОГО МЕДНО- МОЛИБДЕНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ	460
АРМАГАНЯН Г.А. АНАЛИЗ СИСТЕМ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ ШАУМЯНСКОГО ЗОЛОТОПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ.....	469
МАНУКЯН П.С., АРУТЮНЯН А.М., САРГСЯН С.Д. АВТОТРАНСФОРМАТОРНЫЙ МЕТОД ПОДКЛЮЧЕНИЯ ИНДУКТОРА К ТИРИСТОРНОМУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЮ.....	480
КАРАМЯН Д.С., КИРАКОСЯН Г.А. РАСПОЗНАВАНИЕ РЕЧИ НА ОСНОВЕ КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ: СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	493
АВЕТИСЯН А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПОСЛЕ СОКРАЩЕНИЯ, КВАНТОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ НА DRU. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ	506
СИМОНЯН С.О., ЧИЛИНГАРЯН М.Г., АБГАРЯН О.С. ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБОБЩЕННЫХ ОБРАТНЫХ МАТРИЦ МУРА-ПЕНРОУЗА (II).....	514

CONTENTS

AGHBALYAN S.G., BAGDASARYAN V.A., VASILYAN G.A., HARUTYUNYAN S.A.	
INVESTIGATING THE STRESS - STRAIN STATE OF ALUMINIUM ALLOYS AT HOT EXTRUSION AND REGULARITIES OF STRUCTURE AND PROPERTY FORMATION.....	409
MARTIROSYAN N.W., MARTIROSYAN D.S., ARAGHI M.A.KH., VANDUNTS T.V., HAYRAPETYAN S.G., GHAZARYAN R.H., YEREMYAN A.S.	
OBTAINING MANGANESE-DOPED BISMUTH FERRITE CERAMIC SAMPLES AND STUDYING THEIR PROPERTIES	421
HOVHANNISYAN A.M., VARDANYAN D.G., NIKOYAN N.A.	
THE EXTRACTION OF COPPER, LEAD, AND ZINC FROM POLYMETALLIC SULFIDE CONCENTRATE BY THE PYRO-HYDROMETALLURGICAL METHOD	436
DEMIRCHYAN T.A.	
THE INFLUENCE OF PARTICLE SIZES AND THE TITANIUM CARBIDE QUANTITY ON THE PROPERTIES AND STRUCTURE OF THE AL-CU SYSTEM ALLOYS.....	442
MANUKYAN L.A., HOVAKIMYAN V.V.	
DETERMINING THE MAXIMUM HEIGHT OF IMPACT OF THE NATURAL MOUNTAIN SLOPE ON THE STABILITY OF THE OPEN-PIT WALL	451
BAGHDASARYAN A.T., MAMYAN S.V.	
JUSTIFICATION OF THE CONDITION PARAMETER “MAXIMUM DEPTH OF RESERVE CALCULATION” UNDER THE CONDITIONS OF COPPER- MOLYBDENUM DEPOSIT	460
ARMAGANYAN H.A.	
ANALYSIS OF THE UNDERGROUND MINING SYSTEMS OF THE SHAHUMYAN GOLD-POLYMETAL DEPOSIT.....	469
MANUKYAN P.S., HARUTYUNYAN A.M., SARGSYAN S.D.	
THE AUTOTRANSFORMER METHOD OF CONNECTING THE INDUCTOR TO THE THYRISTOR CONVERTER	480
KARAMYAN D.S., KIRAKOSYAN G.A.	
KEYWORD-BIASED SPEECH RECOGNITION: A COMPARATIVE STUDY	493
AVETISYAN A.A.	
INVESTGATING POWER METRICS OF NEURAL NETWORKS AFTER PRUNING, QUANTIZATION, DPU IMPLEMENTATION: A COMPARATIVE ANALYSIS.....	506
SIMONYAN S.H., CHILINGARYAN M.G., ABGARYAN H.S.	
DECOMPOSITION METHODS FOR DETERMINING COMPLEX ONE-PARAMETER GENERALIZED INVERSE MOORE-PENROSE MATRICES (II).....	514

ՀԵՂԻՆԱԿՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

- 1 Աբգարյան Հովհաննես Սամվելի ասպիրանտ, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - abgaryanhov@gmail.com
- 2 Աղբալյան Սուրեն Գևորգի տ.գ.դ., պրոֆեսոր, Մետալուրգիայի և նյութագիտության ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - metalsur@polytechnic.am
- 3 Ավետիսյան Աշոտ Ազատի ասպիրանտ, ՀԱՊՀ, ավագ ինժեներ «Մինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ,
Էլ. հասցե - aavet@synopsys.com
- 4 Արմաղանյան Հրանտ Արամայիսի Կապանի «Լեռնահարստացման կոմբինատ» ՓԲԸ հանքի ավագ ինժեներ, Ընդերքաբանության և շինարարության ամբիոնի դասախոս, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - h.armaghanyan@mail.ru
- 5 Բաղդասարյան Արամ Թորգոմի տ.գ.թ., դոցենտ, ԼԳ ԵՎ ՇՄՊ ամբիոնի վարիչի պ/կ, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - aram.baghdasaryan@politechnic.am
- 6 Բաղդասարյան Վազգեն Արմենի տ.գ.թ., դոցենտ, Վարշավայի գլխավոր գյուղատնտեսական համալսարան, Լեհաստանի Հանրապետություն
Էլ. հասցե - vazgen_bagdasaryan@sggw.edu.pl
- 7 Դեմիրչյան Տիգրան Արտակի ասպիրանտ, Մետալուրգիայի և նյութագիտության ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - tigrand1997@gmail.com
- 8 Երեմյան Արշամ Սարգսի տ.գ.թ., «ԲԵՆԴԼ» ՍՀԻ առաջատար գիտաշխատող
Էլ. հասցե - yeremyan@asls.candle.am
- 9 Կիրակոսյան Գրիգոր Արմենի ասպիրանտ, ՀՀ ԳԱԱ մաթեմատիկայի ինստիտուտ,
«Միկրո- և նանոէլեկտրոնիկայի» բազային լաբորատորիայի գիտաշխատող, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - sergar55@mail.ru
- 11 Հարությունյան Աննա Մարտինի տ.գ.թ., դոց., Էլեկտրաէներգետիկայի ամբիոն, ՀԱՊՀ,
- 12 Հարությունյան Սամվել Ալբերտի մագիստրանտ, Մետալուրգիայի և նյութագիտության ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - samo.harutyunyan7@mail.ru

- 13 Հովակիմյան Վրեժ Վարուժանի տ.գ.թ., Երկրամեխանիկայի և լեռնային աշխատանքների լաբորատորիայի գեոտեխնիկ, Լեռնամետալուրգիայի ինստիտուտ ՓԲԸ,
Էլ. հասցե - vrezh_hovakimyan@mmi.am
- 14 Հովհաննիսյան Արմեն Մարտիկի տ.գ.դ., պրոֆեսոր, Մետալուրգիայի և նյութագիտության ամբիոնի վարիչ, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - armhovah@gmail.com
- 15 Ղազարյան Ռուզաննա Հայրապետի Էլեկտրոնիկայի, կենսաբժշկական և չափիչ համակարգերի ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - ruzikghazaryan@gmail.com
- 16 Մամյան Սուրեն Վլադիմիրի տ.գ.թ., ՀՀ ՏԿԵ նախարարության ընդերքի վարչության ընդերքաբանական փորձաքննության բաժնի պետ,
Էլ. հասցե - surenmayan@mpc.am
- 17 Մանուկյան Լևոն Անդրանիկի տ.գ.դ., դոցենտ, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - manukyanlevon-a@rambler.ru
- 18 Մանուկյան Պարզև Սուրենի տ.գ.թ. դոց., Էլեկտրաէներգետիկայի ամբիոն, ՀԱՊՀ,
- 19 Մարտիրոսյան Դավիթ Սամվելի հայցորդ, Էլեկտրոնիկայի, կենսաբժշկական և չափիչ համակարգերի ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - david.martirosyan.99@gmail.com
- 20 Մարտիրոսյան Նորայր Վիլյամսի տ.գ.թ., դոցենտ, «Միկրո- և նանոէլեկտրոնիկայի» բազային լաբորատորիայի ղեկավար, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - marnorw@yahoo.com
- 21 Մոհամմադ Ալի Խալիլի Արադի հայցորդ, Էլեկտրոնիկայի, կենսաբժշկական և չափիչ համակարգերի ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - va.mahdieh@gmail.com
- 22 Նիկոյան Նորայր Ադասու ասպիրանտ, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - nikoyannoro3@gmail.com
- 23 Չիլինգարյան Մարինե Գևորգի տ.գ.թ., դոցենտ, Տեղեկատվական տեխնոլոգիաների և ավտոմատացման ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - ch_marine@yahoo.com
- 24 Սարգսյան Սամվել Զանիբեկի «Էլեկտրատեխնոլոգիաներ» բազային լաբորատորիայի լաբորանտ
- 25 Սիմոնյան Սարգիս Հովհաննեսի տ.գ.դ., պրոֆ., Տեղեկատվական տեխնոլոգիաների և ավտոմատացման ամբիոնի վարիչ, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - ssimonyan@seua.am
- 26 Վանդունց Տիգրան Վալերիկի տ.գ.թ., դոցենտ, Գորիսի պետական համալսարանի ռեկտոր
Էլ. հասցե - tvandunts@gmail.com

- 27** Վասիլյան Գայանե Արտաշի տ.գ.թ., դոցենտ, Մետալուրգիայի և նյութագիտության ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - gayavasi@gmail.com
- 28** Վարդանյան Դավիթ Գագիկի տ.գ.թ., դոցենտ, Մետալուրգիայի և նյութագիտության ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - 26david@mail.ru
- 29** Քարամյան Դավիթ Սպարտակի ասպիրանտ, Հայ-Ռուսական համալսարան,
Էլ. հասցե - davitkar98@gmail.com

СПИСОК АВТОРОВ

- 1 Абгарян Оганнес Самвелович аспирант, НПУА,
Эл. почта - abgaryanhov@gmail.com
- 2 Аветисян Ашот Азатович аспирант, НПУА; ст. инженер, ЗАО “Синописис Армения”,
Эл. почта - aavet@synopsys.com
- 3 Агбалиян Сурен Геворкович д.т.н., профессор, кафедра Металлургии и материаловедения, НПУА,
Эл. почта - metalsur@polytechnic.am
- 4 Айрапетян Сероб Гарникович научный сотрудник лаборатории Микро- и наноэлектроники, НПУА,
Эл. почта - sergar55@mail.ru
- 5 Армаганиян Грант Арамаисович старший инженер рудника, ЗАО “Капанский горно-обогатительный комбинат”, преподаватель кафедры Недрологии и строительства, НПУА,
Эл. почта - h.armaghanyan@mail.ru
- 6 Арутюнян Анна Мартиновна к.т.н., доцент, кафедра Электроэнергетики, НПУА
- 7 Арутюнян Самвел Альбертович магистрант, кафедра Металлургии и материаловедения, НПУА,
Эл. почта - samo.harutyunyan7@mail.ru
- 8 Багдасарян Арам Торгомович к.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедрой Горного дела и охраны окружающей среды, НПУА,
Эл. почта - aram.baghdasaryan@politechnic.am
- 9 Багдасарян Вазген Арменович к.т.н., доцент, Варшавский главный сельскохозяйственный университет, Республика Польша,
Эл. почта - vazgen_bagdasaryan@sggw.edu.pl
- 10 Вандунц Тигран Валерикович к.т.н., доцент, ректор Горисского гос. ун.-а,
Эл. почта - tvandunts@gmail.com
- 11 Варданян Давид Гагикович к.т.н., доцент, кафедра Металлургии и материаловедения, НПУА,
Эл. почта - 26david@mail.ru
- 12 Василян Гаяне Арташевна к.т.н., доцент, кафедра Металлургии и материаловедения, НПУА,
Эл. почта - gayavasi@gmail.com

- 13** Демирчян Тигран Артакович аспирант, кафедра Metallургии и материаловедения, НПУА,
Эл. почта - tigrand1997@gmail.com
- 14** Еремян Аршам Саргисович к.т.н., ведущий научный сотрудник Института синхротронных исследований “КЕНДЛ”,
Эл. почта - yeremyan@asls.candle.am
- 15** Казарян Рузанна Айрапетовна кафедра “Электроники, биомедицинских и измерительных систем”, НПУА
Эл. почта - ruzikghazaryan@gmail.com
- 16** Карамян Давит Спартакович аспирант, РАУ,
Эл. почта - davitkar98@gmail.com
- 17** Киракосян Григор Арменович аспирант, Институт математики НАН РА,
18 Мамян Сурен Владимирович к.т.н., начальник отдела недрологической экспертизы Управления недр Министерства территориального управления и инфраструктур РА,
Эл. почта - surenmayan@mrc.am
- 19** Манукян Левон Андраникович д.т.н., доцент НПУА,
Эл. почта - manukyanlevon-a@rambler.ru
- 20** Манукян Паргев Суренович к.т.н., доцент, кафедра Электроэнергетики, НПУА
21 Мартиросян Давид Самвелович соискатель, кафедра Электроники, биомедицинских и измерительных систем, НПУА,
Эл. почта - david.martirosyan.99@gmail.com
- 22** Мартиросян Норайр Вильямсович к.т.н., доцент, заведующий лабораторией Микро- и нанoeлектроники, НПУА,
Эл. почта - marnorw@yahoo.com
- 23** Мохаммад Али Халили Араги соискатель, кафедра Электроники, биомедицинских и измерительных систем, НПУА,
Эл. почта - va.mahdieh@gmail.com
- 24** Никоян Норайр Агасиевич аспирант, НПУА,
Эл. почта - nikoynnnoro3@gmail.com
- 25** Овакимян Вреж Варужанович к.т.н., геотехник лаборатории геомеханики и горных работ, ЗАО “Лернаметаллургииаи Институт”
Эл. почта - vrezh_hovakimyan@mml.am
- 26** Оганесян Армен Мартикович д.т.н., профессор, зав. кафедрой Metallургии и материаловедения, НПУА,
Эл. почта - armhovah@gmail.com
- 27** Саргсян Самвел Джанибекович лаборант базовой лаборатории Электротехнологии, НПУА,
28 Симонян Саргис Оганесович д.т.н., профессор, зав. кафедрой Информационных технологий и автоматизации, НПУА,
Эл. почта - ssimonyan@seua.am
- 29** Чилингарян Марине Геворговна к.т.н., доцент кафедры Информационных технологий и автоматизации, НПУА,
Эл. почта - ch_marine@yahoo.com

LIST OF THE AUTHORS

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1 Abgaryan Hovhannes Samvel | Post-graduate student, NPUA,
E-mail - abgaryanhov@gmail.com |
| 2 Aghbalyan Suren Geworg | Dr. of tech. sci., Prof., Chair of Metallurgy and Material Science, NPUA,
E-mail - metalsur@polytechnic.am |
| 3 Armaghanyan Hrant Aramayis | senior mine engineer, Kapan Mining and Processing Plant CJSC, lecturer of the Chair of Subsoil Science and Construction,
E-mail - h.armaghanyan@mail.ru |
| 4 Avetisyan Ashot Azat | Post-graduate student, NPUA, senior engineer, “Synopsis Armenia”, CJSC,
E-mail - aavet@synopsys.com |
| 5 Baghdasaryan Aram Torgom | Cand. of tech. sci., Assoc. Prof., Acting Head of the Chair of Mining and Environmental Protection, Institute of Mining and Metallurgy and Chemical Technologies, NPUA,
E-mail - aram.baghdasaryan@politechnic.am |
| 6 Bagdasaryan Vazgen Armen | Cand. of tech. sci., Assoc. Prof. Institute of Civil Engineering, Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Warsaw, Poland,
E-mail - vazgen_bagdasaryan@sggw.edu.pl |
| 7 Chilingaryan Marine Gevorg | Cand. of tech. sci., Assoc. Prof. of the Chair of Information Technologies and Automatization, NPUA,
E-mail - ch_marine@yahoo.com |
| 8 Demirchyan Tigran Artak | Post-graduate student of the Chair Metallurgy and Material Science, NPUA,
E-mail - tigrand1997@gmail.com |
| 9 Ghazaryan Ruzanna Hayrapet | Researcher of the Chair of Electronics, Biomedical and Measuring Systems, NPUA,
E-mail - ruzikghazaryan@gmail.com |
| 10 Harutyunyan Anna Martin | Cand. of tech. sci., Assoc. Prof. of the Chair of Electro Engineering, NPUA, |
| 11 Harutyunyan Samvel Albert | Graduate student, Chair of Metallurgy and Material Science, NPUA,
E-mail - samo.harutyunyan7@mail.ru |
| 12 Hayrapetyan Serob Garnik | Researcher of the laboratory of Micro- and Nano-electronics, NPUA,
E-mail - sergar55@mail.ru |

- 13** Hovakimyan Vrezh Varujan Cand. of tech. sci., geology engineer laboratory of the Geomechanics and Mining Works of the Institute of Mining Engineering CJSC,
E-mail - vrezh_hovakimyan@mimi.am
- 14** Hovhannisyan Armen Martik Dr. of tech. sci., Prof., Head of the Chair of Metallurgy and Material science, NPUA,
E-mail - armhovh@gmail.com
- 15** Karamyan Davit Spartak Post-graduate student, RAU,
E-mail - davitkar98@gmail.com
- 16** Kirakosyan Grigor Armeni Post-graduate student of the Institute of Mathematics, NAS RA
- 17** Mamyan Suren Vladimir Cand. of tech. sci., Head of Mining Expertise Department of the Ministry of Territorial Administration and Infrastructures of Republic of Armenia,
E-mail - surenmayan@mpc.am
- 18** Manukyan Levon Andranik Dr. of tech. sci., Assoc. Prof., NPUA,
E-mail - manukyanlevon-a@rambler.ru
- 19** Manukyan Pargev Suren Cand. of tech. sci., Assoc. Prof. of the Chair of Electrical Energy, NPUA,
- 20** Martirosyan Davit Samvel Probationer of the Chair of Electronics, Biomedical and Measuring Systems, NPUA,
E-mail - david.martirosyan.99@gmail.com
- 21** Martirosyan Norayr William Cand. of tech. sci., Assoc. Prof., Head of the laboratory of Micro- and Nano-electronics, NPUA,
E-mail - marnorw@yahoo.com
- 22** Mohammad Ali Khalili Araghi Probationer of the Chair Electronics, Biomedical and Measuring Systems of NPUA,
E-mail - va.mahdieh@gmail.com
- 23** Nikoyan Norair Aghas Post-graduate student, NPUA,
E-mail - nikoyannoro3@gmail.com
- 24** Sargsyan Samvel Janibek Laboratory assistant at the basic laboratory of Electrotechnology NPUA,
- 25** Simonyan Sargis Hovhannes Dr. of tech. sci., Prof., Head of the Chair of Information Technologies and Automatization, NPUA,
E-mail - ssimonyan@seua.am
- 26** Vandnunc Tigran Valerik Cand. of tech. sci., Assoc. Prof., Rector of Goris State University,
E-mail - tvandunts@gmail.com

- 27** Vardanyan David Gagik Cand. of tech. sci., Assoc. Prof., of the Chair
Metallurgy and Material Science, NPUA,
E-mail - 26david@mail.ru
- 28** Vasilyan Gayane Artash Cand. of tech. sci., Assoc. Prof. of the Chair
“Metallurgy and Material Science”, NPUA,
E-mail - gayavasi@gmail.com
- 29** Yeremyan Arsham Sargis Cand. of tech. sci., leading researcher of the “KENDL”
Synchrotron Research Institute,
E-mail - yeremyan@asls.candle.am

ՀՈՂՎԱԾՆԵՐԻ ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱՆՈՆՆԵՐԸ

Նյութը խմբագրություն ներկայացվում է ըստ հետևյալ պահանջների.

1. Երկու օրինակ, նաև էլեկտրոնային տարբերակով, համակարգչային շարվածքը՝ Microsoft Office Word: Հոդվածի ծավալը կարող է լինել մինչև 10 էջ, հաղորդումներինը՝ մինչև 4 էջ: Տեքստը շարադրվում է A4 չափսի թղթի վրա, աշխատանքային դաշտը՝ Top-5սմ, Bottom-5,1սմ, Left-5,75սմ, Right-1,75սմ, Footer-4,6սմ, միջտողային տարածությունը (Line spacing)՝ 1,1, պարբերությունը (First line)՝ 0,75 սմ: Հայերեն լինելու դեպքում նյութը շարադրվում է Sylfaen տառատեսակով, տառաչափը՝ 10, իսկ ռուսերեն կամ անգլերեն լինելու դեպքում՝ Times New Roman տառատեսակով, տառաչափը՝ 11:

2. Թղթի վերևի ձախ անկյունում գրվում է համապիտանի տասնորդական դարականիշը՝ տեքստին համապատասխան լեզվով (ՀՏԴ, ՄԴԿ, UDC), հաջորդ տողի կենտրոնում՝ գլխատառերով հեղինակ(ներ)ի անվան-հայրանվան սկզբնատառերը և ազգանուն(ներ)ը՝ bold, 10 տառաչափով հայերեն, անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում: Հոդվածի վերնագիրը տրվում է հեղինակի ազգանվանը հաջորդող տողի կենտրոնում՝ bold, ամբողջությամբ գլխատառերով՝ 10 տառաչափով՝ հայերեն, անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում:

3. Նյութը սկսվում է ամփոփումով (անտասցիա) այն լեզվով, որով ներկայացված է: Ամփոփումն ավարտվում է առանցքային բառերով՝ տառաչափը՝ 9 հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, և միայն «Առանցքային բառեր» արտահայտությունը՝ bold, italic: Ամփոփումը պետք է լինի 500 նիշից ոչ ավելի՝ ներառյալ միջակայքերը, առանցքային բառերը կամ բառակապակցությունները՝ 4-8 բառ:

4. Երաշխավորվում է նյութի շարադրման հետևյալ կարգը. «Ներածություն», որը պետք է համառոտ ներառի հարցի վիճակը, թեմայի արդիականությունը և հետազոտության նպատակը, «Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը», «Հետազոտության արդյունքները», «Եզրակացություն», անհրաժեշտության դեպքում՝ նաև այլ բաժիններ՝ համապատասխան վերնագրերով:

5. Տեքստում հղումները գրականությանը նշվում են ուղղանկյուն փակագծերով: Բանաձևերը ներկայացվում են նոր տողից, Equation Editor ծրագրով, italic, տառաչափը՝ 11, անհրաժեշտության դեպքում համարակալվում են տողի վերջում՝ սովորական (կոր) փակագծի մեջ:

6. Նկարներն ու աղյուսակները հաջորդում են տեքստում համապատասխան հղումներին: «Նկ. » և «Աղյուսակ» բառերը, նկարների մակագրությունը և աղյուսակների անվանումները գրվում են Italic 9 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում:

7. Տեքստին հաջորդում է գրականության ցանկը՝ 9 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, միայն հեղինակի ազգանունն ու անվան-հայրանվան սկզբնատառերը՝ bold, «Գրականության ցանկ» արտահայտությունը՝ տողի կենտրոնում, գլխատառերով: Ցանկում գրականության յուրաքանչյուր աղբյուր համարակալվում է ըստ տեքստում իր հղման հերթականության: Գրականության աղբյուրները պարբերական հրատարակությունների դեպքում ներկայացվում են հետևյալ կարգով. հեղինակի ազգանունը, անվան-հայրանվան սկզբնատառերը, վերնագիրը, հանդեսի անվանումը կամ ընդունված հապավումը, հրատարակման տարեթիվը, հատորի ու թողարկման համարները, հերթական համարը, նյութի գետեղման էջերը, գրքերի դեպքում՝ հեղինակի ազգանունը, անվան-հայրանվան սկզբնատառերը, վերնագիրը, հրատարակման վայրը, հրատարակչությունը, թվականը, էջերի քանակը:

8. Գրականության ցանկին հաջորդում են ամփոփումները մյուս երկու լեզուներով (եթե տեքստը հայերեն է, ամփոփումները նախ՝ ռուսերեն, ապա՝ անգլերեն, եթե ռուսերեն է, նախ՝ հայերեն, ապա՝ անգլերեն, եթե անգլերեն է, նախ՝ հայերեն, ապա՝ ռուսերեն): Ամփոփումները բոլոր երեք լեզուներով իրենց բովանդակությամբ և առանցքային բառերով պետք է լինեն նույնական:

9. Տեքստը ստորագրվում է հեղինակ(ներ)ի կողմից, նշվում է նյութը խմբագրություն հանձնելու ամսաթիվը: Տեքստի խմբագրված և սրբագրված տարբերակը համաձայնեցվում է հեղինակ(ներ)ի հետ:

10. Հեղինակ(ներ)ն առանձին էջով ներկայացնում է (են) ազգանուն, անուն, հայրանունը (լրիվ), աշխատավայրի, սովորելու վայրի լրիվ անվանումը, զբաղեցրած պաշտոնը, գիտական աստիճանը, հեռախոսահամարները (աշխատանքային, տան և բջջային):

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Материал представляется в редакцию в соответствии со следующими правилами:

1. Статья в двух экземплярах и файл статьи в формате Microsoft Office Word. Объем статьи не должен превышать 10 страниц, объем сообщений – до 4-х страниц. Формат страницы – А4. Рабочее поле: Top – 5cm, Bottom – 5,1cm, Left – 5,75cm, Right – 1,75cm, Footer – 4,6cm, межстрочный интервал (Line spacing) – 1,1, красная строка (First line) – 0,75cm. Для статьи, написанной на армянском языке, применяется шрифт Sylfaen (размер шрифта - 10), а на русском и английском – Times New Roman (размер шрифта – 11).

2. В левом верхнем углу первого листа указывается универсальный десятичный классификатор (ՀՏԴ, УДК, UDC); строкой ниже - инициалы (И.О.) и фамилия - заглавными буквами, шрифт Bold, размер 10 – на арм., рус. и англ. яз., выравнивание по центру; строкой ниже по центру указывается название статьи – заглавными буквами, шрифт Bold, размер 10 – на арм., рус. и англ. яз.

3. Материал текста начинается с аннотации и представляется на том языке, на котором написана статья. Текст аннотации должен состоять не более чем из 500 знаков, включая пробелы. После аннотации пишутся ключевые слова – от 4-х до 8-и слов или словосочетаний. Размер текста аннотации и ключевых слов 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз., словосочетание **“Ключевые слова”** - Bold, italic.

4. Рекомендуется следующий порядок изложения материала статьи: введение, в котором должны быть кратко представлены состояние вопроса, актуальность темы и цель исследования; постановка задачи и обоснование методики; результаты исследования; заключение (эти, а при необходимости, и другие разделы должны иметь соответствующие заголовки).

5. Ссылки на литературу в тексте даются в квадратных скобках. Формулы и математические выражения набираются редактором Microsoft Equation, italic, размер – 11. Формулы набираются с новой строки, выравнивание по центру. При необходимости, их нумеруют. Номер формулы располагается в конце строки, в круглых скобках.

6. Рисунки и таблицы располагаются в тексте по ходу ссылки на них. Слова *“Рис.”*, *“Таблица”*, а также названия рисунков и таблиц пишутся italic, размер 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз.

7. В конце статьи дается список литературы: размер 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз. Словосочетание **“СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ”** располагается в центре строки заглавными буквами, Bold. Цитированная литература нумеруется в порядке ссылки на нее в тексте. Каждый источник представляется в следующем порядке: в случае ссылки на статью из журнала: **фамилия, инициалы И.О.** - Bold, название статьи, название журнала, место издания, год издания, том и номер издания, с какой по какую страницы занимает статья в этом журнале; в случае ссылки на книгу: **фамилия, инициалы И.О.**, название книги, место издания, название издательства, год издания, общее количество страниц.

8. После литературы представляются аннотации вместе с ключевыми словами на двух других языках. Если статья написана на армянском языке, то сначала дается аннотация на русском языке, затем на английском; если написана на русском языке – соответственно на армянском и английском, а если на английском – соответственно на армянском и русском языках. Содержание аннотаций и ключевые слова должны быть на трех языках одинаковыми.

9. Статья подписывается автором (авторами). В конце статьи ставится дата (число, месяц, год) представления статьи. Отредактированный и откорректированный вариант рукописи согласовывается с автором (авторами).

10. На отдельной странице необходимо представить следующие авторские данные: фамилия, имя, отчество; полное наименование места работы, места учебы; занимаемая должность, ученая степень и звание; номера телефонов (служебный, домашний, мобильный).

RULES FOR PREPARATION OF MANUSCRIPTS

The material should be presented to the editorial staff in accordance with the requirements given below.

1. The authors are requested to submit two hard copies, and also the electronic version of the manuscript by Microsoft Office Word. The volume of scientific paper is limited to 10 pages, and to 4 pages for short communications. The text should be printed on A4 sized paper. The text margins should be: Top – 5cm, Bottom – 5.1 cm, Left – 5.75 cm, Right – 1.75 cm, Footer – 4.6 cm, Line-spacing – 1.1 cm, the first line – 0.75 cm. Texts in Armenian should be printed by the Sylfaen, font size 10, and the texts in by Times New Roman, in font size 10 .

2. On the top left corner, the Universal Decimal Classifier is placed in the language of the manuscript (ՀՏԴ, УДК, UDC). The initials and the surname(s) in font size 10, bold for texts in Armenian, English and Russian should be in the centre of the next line. The title should be placed in the centre of the line following the author's surname in font size 10, bold, all in capital letters for texts in Armenian, English and Russian.

3. The text begins with an abstract in the language it is presented. It ends with keywords in font size 9 for texts in Armenian, and in font size 10 for the ones in English and Russian. Only the word “Keywords” should be bold, italic. The summary should not exceed 500 characters including the spaces, the number of keywords or word combinations - 4-8.

4. The papers should include an introduction briefly introducing the state of the problem area, the importance of the subject and the aim of investigation, as well as sections describing the statement of the problem and selection of the methodology, the results of investigation, conclusion (other sections if necessary) with subtitles, and it should end with the list of references.

5. The references in the text should be given in square brackets. The formulae should be introduced by the Microsoft Equation Editor. They should be printed from a new line in italic, font size 11 in the center of the line, and if necessary numbered at the end of the line in round brackets..

6. Figures and tables should follow their references given in the text. The words “Fig”, “Table”, the figure inscriptions and the table names should be printed in italic, in font size 9 for texts in Armenian, and in font size 10 for texts in English and Russian.

7. The text is followed by the references in font size 9 for texts in Armenian and in font size 10 for texts in English and Russian. Only the author's initials and surname should be bold. The word “References” should be placed in the centre of the line in capital letters. In the list of references, each source should be enumerated according to its reference number in the text. For the periodicals, the references should be introduced in the following style: the author's surname, initials, title, year, numbers of the volume and issue, page numbers, and for books – the authors names, full title, publication place, publisher, year, total number of pages.

8. The references are followed by the abstracts in the other two languages. If the text is in Armenian, the abstracts should be first in Russian and then in English. The text in Russian should be followed first by Armenian and then by English abstracts, while the texts in English should be followed first by Armenian, then by Russian abstracts. The abstracts in all the three languages should be identical in content and keywords.

9. The manuscript should be signed by the author(s) with indication of the submission date. The edited and proofread version of the manuscript should be agreed upon by the author(s).

10. On a separate page, the author(s) should introduce his/her/their full surname(s), name(s), patronymic(s); the full name(s) of employment place, educational institution; the position occupied scientific degree, telephone numbers (office, home, mobile).