

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

მალხაზ სირაძე

ფოლადის ლუმელსგარე დამუშავების ტექნოლოგიაში
მრეწველობის ნარჩენებიდან მიღებული კომპლექსური
შენადნობების გამოყენების თეორიული და პრაქტიკული
საფუძვლების შემუშავება.

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2014 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტში.

ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტი
მეტალურგიის, მასალათმცოდნეობის და ლითონების დამუშავების
დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: სრული პროფესორი ომარ მიქაძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2014 წლის, , საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის მეტალურგიის ფაკულტეტის

სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის

სხდომაზე, კორპუსი II, აუდიტორია

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი

სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

პრობლემის აქტუალობა. მსოფლიოში მკვეთრად შემცირდა ლითონშემცველი მდიდარი მადნების მარაგი. ამავდროულად სწრაფი ტემპებით მატულობს და გროვდება ძვირფასი ლითონების შემცველი შემდეგი სხვადასხვა სამრეწველო ნარჩენი: ლითონის ჯართი, წიდა, სხვადასხვა საწარმოების ტექნოლოგიური აირების გამწმენდის სისტემების მტვერი, მადნების გამდიდრების კულები. ასეთი ნარჩენების მეტალურგიული გადამუშავება რთული ტექნოლოგიური პროცესია, რამეთუ, მათში სხვადასხვა ელემენტის ერთობლიობაა. თანამედროვე მეტალურგიაში ლითონების წარმოების პრობლემაა აღმდგენლების მწვავე დეფიციტი. ამიტომ დიდი მნიშვნელობა ენიჭება აღმდგენლების ახალი სახეობების მოძიებას სხვადასხვა საწარმოო თუ საყოფაცხოვრებო ნარჩენის გამოყენების თვალსაზრისით.

სამუშაოს მიზანი: მეტალურგიულ, ქიმიურ, სამთო-გამამდიდრებელ მრეწველობათა და საყოფაცხოვრებო ნარჩენებიდან კომპლექსური შენადნობების მიღება და ფოლადის მეტალურგიაში გამოყენება.

მეცნიერული სიახლე:

- ჩატარებულია მეტალურგიული, ქიმიური, სამთო-გამამდიდრებელი და საყოფაცხოვრებო ნარჩენების იდენტიფიკაცია;
- შემუშავებულია კომპლექსური შენადნობის მისაღები რაციონალური კაზმის შედგენილობა;
- შესწავლილია შემოთავაზებული კაზმების თბოტექნიკური პარამეტრები;
- ჩატარებულია კომპლექსური შენადნობის მიღების ლაბორატორიული და ნახევრად საწარმოო დნობები;
- შესწავლილია შემოთავაზებული კომპლექსური შენადნობის ძირითადი ელემენტების თხევად რკინაში დიფუზიის კოეფიციენტები;
- შესწავლილია მიღებული კომპლექსური შენადნობის განმჟანგველუნარიანობა;
- ჩატარებულია შემოთავაზებული კომპლექსური შენადნობით ფოლადის

დამუშავების თერმოდინამიკური გათვლები;

- ლაბორატორიულ და ნახევრად საწარმოო პირობებში ჩატარებულია ფოლადის განჟანგვის, ლეგირების და მოდიფიცირების ექსპერიმენტები, რის შედეგადაც დადასტურდა შემოთავაზებული კომპლექსური შენადნობით დამუშავებულ ლითონში არალითონური ჩანართების რაოდენობის შემცირება;
- დადგინდა არალითონური ჩანართების მორფოლოგიური შედგენილობა.

სამუშაოს პრაქტიკული ღირებულება : 1. შემუშავებულია მეტალურგიული, ქიმიური, სამთო გამამდირებელი მრეწველობისა და საყოფაცხოვრებო ნარჩენების გამოყენებით კომპლექსური შენადნობის მიღების ტექნოლოგია; 2. შემუშავებულია თხევადი ფოლადის გამოდნობის ტექნოლოგია კომპლექსური შენადნობის გამოყენებით და შესაბამისი საწარმოო-ტექნოლოგიური სქემა.

ნაშრომის შინაარსი

შესავალში განხილულია სადისერტაციო თემის აქტუალობა, ჩამოყალიბებულია სამუშაოს მიზანი, სამეცნიერული სიახლე და სამუშაოს პრაქტიკული ღირებულება. სამუშაოს პირველ ნაწილში განხილულია: სამრეწველო და საყოფაცხოვრებო ნარჩენების დახასიათება, ფხვიერი საკაზმე მასალების დანაჭროვნებისა და ლითონის პირდაპირი მიღების თანამედროვე ტექნოლოგიები. მეორე ნაწილში განხილულია შავ მეტალურგიაში რკინის პირდაპირი მიღების ტექნოლოგია, ჩატარებულია ლითონის პირდაპირი მიღებისათვის რაციონალური კაზმის ანგარიში, რის შედეგადაც განსაზღვრულია მონოკაზმის საშუალო შემადგენლობა (ცხრილი 1). გარდა ამისა, დადგენილია რკინის აღდგენის ხარისხის ტემპერატურული დამოკიდებულება (ნახ. 1).

როგორც 1 ნახაზიდან ჩანს, რკინის ჟანგეულების ხარისხი საკმაოდ მაღალია 600°C ტემპერატურაზე და მისი შემდგომი მატებისას საგრძნობლად იზრდება. ამავე ნახაზიდან ჩანს, რომ მოცემულ ტემპერატურაზე კაზმში ქვანახშირის რაოდენობის ზრდისას იზრდება აგრეთვე რკინის აღდგენის ხარისხიც. გამოთვლილია 1,5 ფუძიანობის მქონე 1 კგ კაზმიდან სხვადასხვა ტემპერატურაზე გამოყოფილი აირების მოცულობა და სიმკვრივე (ცხრილები 2 და 3).

ცხრილი 1. მონოკაზმის საშუალო შემადგენლობა

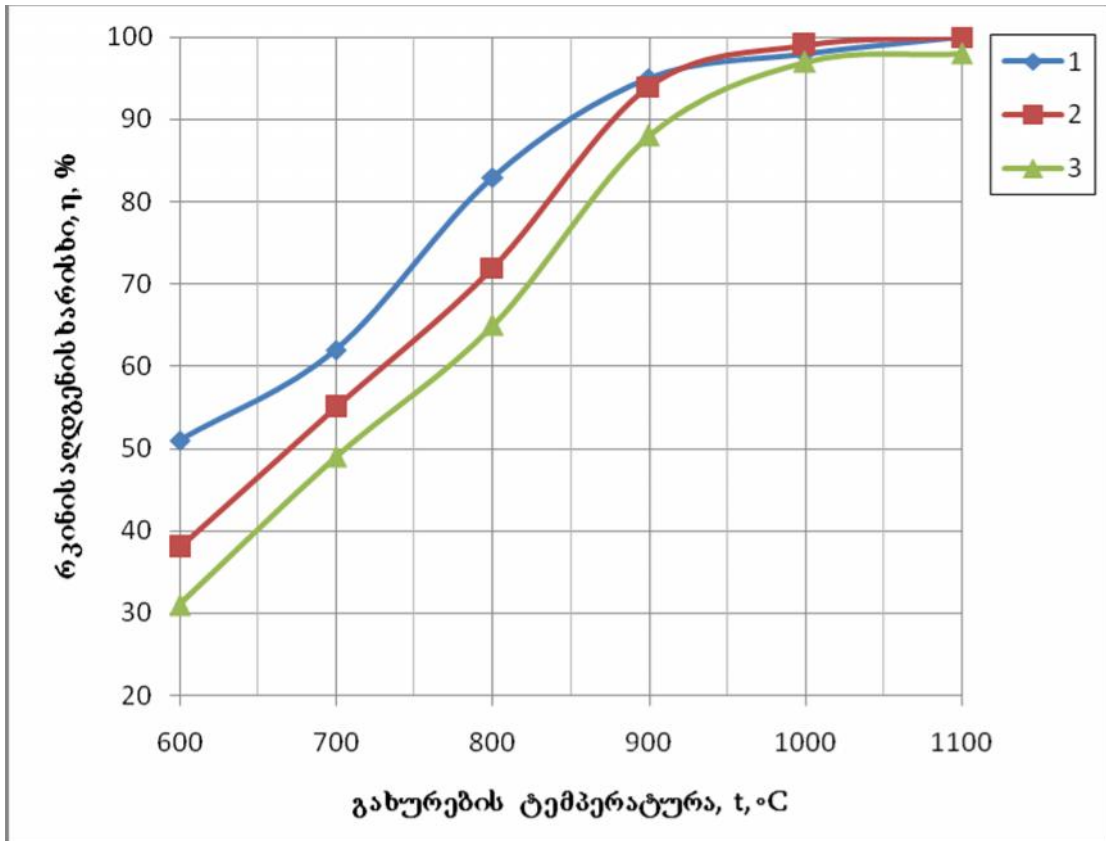
Fe _{საერთო}	C	Fe ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	S	P	დ/გ*	ჯამი	განზომილება
43,649	8,885	42,623	0,112	16,658	7,614	5,074	1,027	6,567	0,417	0,02	10,964	99,961	კგ
43,67	8,888	42,66	0,112	16,66	7,61	5,07	1,02	6,57	0,42	0,02	10,97	100,00	%

ცხრილი 2. მადან-ნახშირიანი კაზმის გახურების პროცესში გამოყოფილი აირების შემადგენლობა

შეცხობის ტემპერატურული ინტერვალი, °C	ქვანახშირის კონცენტრატის რაოდენობა, %															
	100				15				20				25			
	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄
500 ÷ 600	7,80	3,50	31,50	56,50	9,00	11,80	24,00	54,00	9,30	9,50	27,20	53,00	10,00	8,00	28,10	53,00
600 ÷ 700	6,30	1,80	50,90	40,50	12,50	14,00	36,50	36,00	8,00	11,60	40,61	38,80	7,50	9,40	43,30	39,00
700 ÷ 800	7,70	2,20	74,90	15,50	17,20	20,00	49,50	12,50	13,50	17,00	55,10	13,40	13,00	13,00	60,00	13,20
800 ÷ 900	8,00	2,00	90,00	-	35,40	27,00	37,90	-	27,50	25,50	46,30	-	22,60	20,00	56,60	-
900 ÷ 1000	7,70	2,00	90,00	-	58,00	31,00	10,00	-	54,40	30,00	15,00	-	51,00	28,00	20,40	-
1000 ÷ 1100	7,50	2,20	90,00	-	68,20	26,00	5,00	-	65,00	26,30	8,00	-	64,30	25,00	10,00	-

ცხრილი. 3. 20 % ქვანახშირის შემცველი მონოკაზმის გახურების პროცესში გამოყოფილი აირების შემცველობა

შეცხოვის ტემპერატურული ინტერვალი, °C	მონოკაზმის ფუძიანობა											
	1,0				1,5				2,0			
	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄
500 ÷ 600	11,10	12,70	26,00	49,00	13,00	14,60	24,00	47,20	14,50	17,50	22,80	44,20
600 ÷ 700	13,00	13,60	37,00	35,00	15,50	16,00	34,50	33,00	17,80	20,20	31,00	30,00
700 ÷ 800	20,70	22,00	46,30	10,20	22,20	25,00	43,00	9,00	23,90	29,00	38,20	8,00
800 ÷ 900	30,00	40,60	28,50	-	31,20	44,00	24,00	-	32,00	48,80	18,20	-
900 ÷ 1000	58,90	30,20	10,00	-	60,00	30,60	8,70	-	60,50	31,00	7,50	-
1000 ÷ 1100	65,60	26,50	7,00	-	65,40	27,00	6,60	-	66,00	27,30	6,00	-



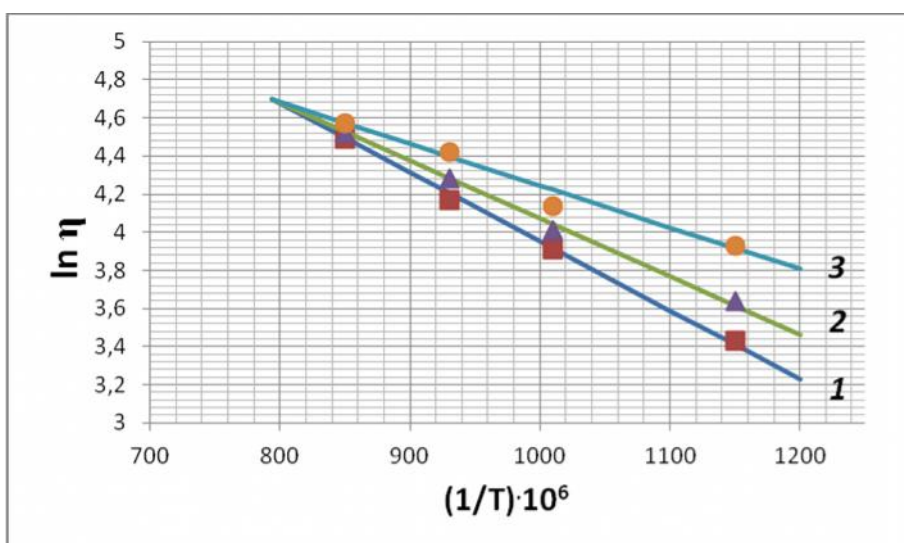
ნახ. 1. რკინის ალდგენის ხარისხის დამოკიდებულება გახურების ტემპერატურაზე:

- 1 – ქვანახშირი 25 %, მადანი 75 %,
- 2 – ქვანახშირი 20 %, მადანი 80 %,

მეტალურგიული პროცესის ჩატარების აუცილებელია გარკვეული ზომის ნაჭროვანი საკაზმე მასალების გამოყენება. მის მისაღებად შევისწავლეთ მონოკაზმის დაბრიკეტების პროცესი და ბრიკეტების თვისებები, რადგან ბრიკეტებს მოეთხოვებათ გარკვეული მექანიკური და თბოფიზიკური თვისებები. ლაბორატორიულ პირობებში ჩატარებულია მონოკაზმის ბრიკეტების მეტალიზაცია 600-900 °C ტემპერატურულ ინტერვალში 100-გრადუსიანი ბიჯით, მონოკაზმის სამი სხვადასხვა შემადგენლობისათვის, რომლებშიც ქვანახშირის წილი იყო 15, 20 და 25%. ტემპერატურის ზრდასთან ერთად მეტალიზაციის ხარისხი 600-900 °C ინტერვალში სწორხაზოვნად იზრდება (ცხრილი 4, ნახ. 2).

ცხრილი 4. მონოკაზმის მეტალიზაციის ძირითადი მაჩვენებლები

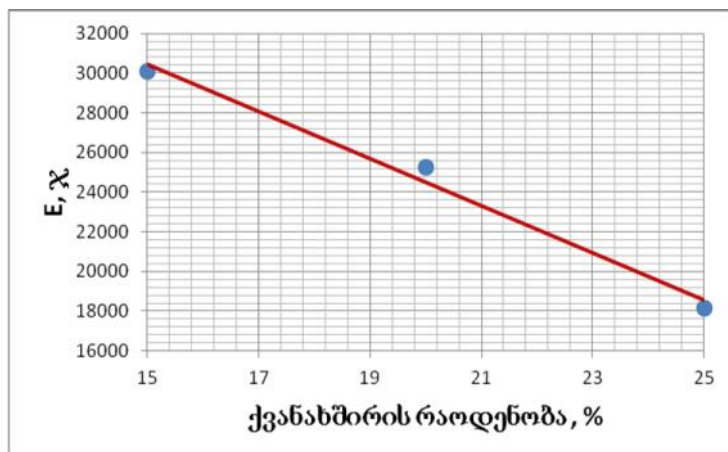
ტემპერატურა, °C	$(1/T) \cdot 10^6$	მეტალიზაციის ხარისხი η , %		
		ქვანახშირის რაოდენობა, %		
		15	20	25
600	1145.475	31	38	51
700	1027.749	50	55	63
800	931.966	65	72	83
900	852.515	89	92	97



ნახ. 2. მეტალიზაციის ხარისხის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ქვანახშირის შემცველობა: 1 – 15%, 2 – 20%, 3 – 25%

როგორც მე-2 ნახაზიდან ჩანს, დაბალ ტემპერატურებზე მეტალიზაციის ხარისხი საგრძნობლად განსხვავდება სხვადასხვა შემადგენლობის მონოკაზმისათვის. შეწავლილია აქტივაციის ენერჯის (E) დამოკიდებულება მონოკაზმში ქვანახშირის რაოდენობაზე, რომლის შედეგები ასახულია მე-3 ნახაზზე. ჩატარებულ იქნა აგრეთვე კვლევები ლითონის პირდაპირი მიღების ტექნოლოგიის გამოყენებით კომპლექსური შენადნობების წარმოების შესაძლებლობის დასადგენად, რისთვისაც მასალებად შერჩეულ იქნა რუსთავის მეტალურგიული, ქიმიური, ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნებისა და მადნეულის სამთო-გამადიდრებელი კომბინატის ტექნოლოგიური ნარჩენები (ცხრილები 5-12). მათი იდენტიფიკაციით შედეგად დადგინდა, რომ ამ ნარჩენების მეტალურ-

გიული გადამუშავებით შესაძლებელია ბარიუმის კომპლექსური შენადნობების მიღება.



ნახ. 3. აქტივაციის ენერჯის (E) დამოკიდებულება მონოკაზმში ქვანახშირის რაოდენობაზე

ცხრილი 5. ბარიუმის შემცველი საკაზმე მასალის – მადნეულის სამთო-გამამდიდრებელი კომბინატის ბარიტული მადნის გამდიდრების კუდების ქიმიური შედგენილობა

მადნეულის სამთო-გამამდიდრებელი კომბინატის ბარიტული მადნის გამდიდრების კუდების ქიმიური შედგენილობა, მას. %				
BaSO ₄	Al ₂ O ₃	CaO	Sr	SiO ₂
8-17	≤1,7	≤4,5	≤0.008	დანარჩენი

ცხრილი 6. მანგანუმის შემცველი საკაზმე მასალის – რუსთავის სს „აზოტის“ მანგანუმის IV ოქსიდის წარმოების შლამის ქიმიური შედგენილობა

სს „აზოტის“ მანგანუმის IV ოქსიდის წარმოების შლამის ქიმიური შედგენილობა, მას. %:							
Mn საერთო	MnO ₂	SiO ₂	CaO	Ni	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	დანარჩენი
21–28	3, 5–5,7	18– 22	≤5	≤0.2	≤ 4	≤0,4	დ/გ*

• - დ/გ - დანაკარგები გამოწვისას

ცხრილი 7. ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნის ფერომანგანუმის მტვრის ქიმიური შედგენილობა

ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნის ფერომანგანუმის მტვრის ქიმიური შედგენილობა, მას. %:								
Mn საერთო	MnO ₂	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	P	H ₂ O
40-42	≤18,7	8-12	≤0.9	≤0,5	≤2,8	≤7,0	≤0,20	დანარჩენი

ცხრილი 8. ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნის სილიკომანგანუმის წარმოების გრანულირებული წიდის ქიმიური შედგენილობა

სილიკომანგანუმის გრანულირებული წიდის ქიმიური შედგენილობა, მას. %:								
Mn საერთო	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	P	S	დანარჩენი
15-16	49-51	11-12	3-3,8	≤1,7	≤7, 4	≤0,22	≤5,2	დ/გ

ცხრილი 9. აღმდგენლად გამოყენებული მეორადი ალუმინის წარმოების ბურბუშელას ანაცრის ქიმიური შედგენილობა

აღმდგენლად გამოყენებული მეორადი ალუმინის წარმოების ბურბუშელას ანაცრის ქიმიური შედგენილობა, მას. %:									
Al	Mn	Si	Zn	Mg	Pb	Ni	Cu	Cr	Fe
19-55	0,3	2-7	0,7-2,8	0,3-0,5	0,8-1,9	0,7-1,4	0,4-0,7	1,0-1,1	დანარჩენი

ცხრილი 10. მეორეული ალუმინის წარმოების წიდის ქიმიური შედგენილობა, მას. %:

Al	Si	P	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Zn	Mo	Cd	Sb	Pb
29,37	3,27	0,012	0,183	0,773	0,109	0,072	0,149	0,034	0,003	0,092	0,048	0,061

ემოწმ (ელექტროლიტური მანგანუმის ორჟანგის წარმოების შლამი). მისი ქიმიურ შედგენილობაა (მას. %): 17,00-21,30 SiO₂; 0,30 P; 10,00-15,00 ΣMeO; 2,0-3,0 MeR; 25,0-38,0 ტენი. აქ ΣMeO შემდეგი ლითონების ოქსიდებია: Fe, Al, Cu, Ni, Co, Zn, Na, ხოლო R – სხვადასხვა ქიმიურ ნაერთთა რადიკალები.

ცხრილი 11. გამომწვარი დოლომიტის ანაცრის ქიმიური შედგენილობა

გამომწვარი დოლომიტის ანაცრის ქიმიური შედგენილობა, მას. %			
CaO	MgO	SiO ₂	დანარჩენი
≤56	≤38	≤2	დ/გ

შემკვრელად და ნაწილობრივ აღმდგენლად გამოყენებულია PET-ბოთლები – ფართო მოხმარების პლასტმასის ბოთლები, რომლებსაც ამზადებენ პოლიეთილენტერეფტალატისგან (PET) – $[-(\text{CH}_2)_3\text{O}(\text{CO})\text{C}_6\text{H}_4(\text{CO})\text{O}-]_n$. მისი სიმკვრი-

ვე $\rho=1380-1400 \text{ კგ/მ}^3$, ხოლო დნობის ტემპერატურა $t_{\text{დნ}}=255-265 \text{ }^\circ\text{C}$.

ბარიუმის კომპლექსური შენადნობების მისაღებად ჩვენ მიერ შერჩეული იქნა შემუშავებულ შენადნობთა მისაღებად კაზმის 3 ვარიანტი (ცხრილი 12).

ცხრილი 12. ბარიუმის კომპლექსური შენადნობების მისაღებად შემუშავებული კაზმები

№ კომპონენტების დასახელება	რაოდენობა კაზმის ვარიანტებში, მას. %		
	I	II	III
1. მადნეულის სამთო – გამამდიდრებელი კომბინატის ბარიტული მადნის გამდიდრების კუდები	35	30	25
2. რუსთავის ს.ს. „აზოტის“ მანგანუმის IV ოქსიდის წარმოების შლამი	–	20	–
3. ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნის ფერომანგანუმის წარმოების მტვერი	–	–	20
4. ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნის სილიკომანგანუმის გრანული წიდა	–	–	15
5. მეორადი ალუმინის წარმოების ბურბუმელას ანაცერი	დან.	დან.	დან.
6. ახლადგამომწვარი დოლომიტის ანაცერი	10	10	10
7. პოლიეთილენის გამოყენებული ბოთლები	15	15	15

შენიშვნა: შემკვრელად გამოყენებული პოლიეთილენის ბოთლების მასალა აღებულია კაზმის შედგენილობის ჯამის 100 %-ზე ზემოთ.

საშუალო თბოტევადობა განისაზღვრა ტემპერატურული ცვლილების ფართო დიაპაზონში კალორიმეტრული მეთოდით. თბოტევადობის მნიშვნელობა გამოთვლილი იქნა შემდეგი ფორმულით:

$$C_p = [A(T_{\text{საბ.}} - T_0) + q] / m \cdot (T - T_{\text{საბ.}}) \quad (10)$$

სადაც : T_0 და $T_{\text{საბ.}}$ – კალორიმეტრიული სისტემის საწყისი და საბოლოო

ტემპერატურა, K;

T – გარკვეული მასის ნიმუშის ტემპერატურა, K;

A – კალორიმეტრის მაჩვენებელია და განისაზღვრება მაგრადუირებელი ცდებით, კჯ/K;

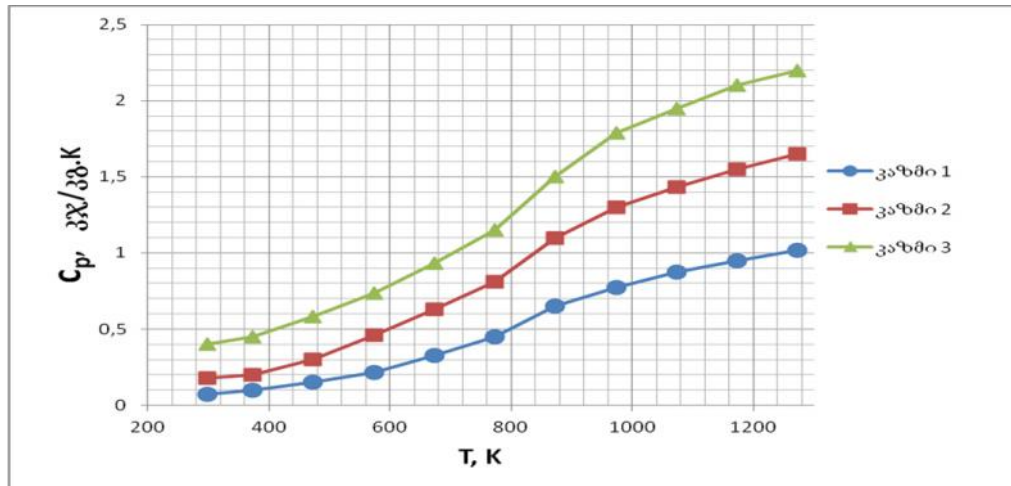
q – თბური კარგვებია კალორიმეტრულ სისტემასა და გარემოს შორის ჯ;

m – გამოსაკვლევი ნიმუშის მასა, კგ.

საშუალო თბოტევადობის განსაზღვრისათვის ექპერიმენტულად იზომებოდა

m მასის ნიმუშისათვის T, T₀ და T_{საბ} ტემპერატურები.

ტემპერატურის გასაზომად ვიყენებდით Pt-PtRh ტიპის კონტაქტურ თერ-
მოწყვილსა და თვითჩამწერს.



ნახ. 4. კაზმების თბოტევადობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

ხურების მონოტონურ რეჟიმში შესწავლილ იქნა გახურების ტემპერატურის გავლენა კაზმების ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტზე (ნახ. 5), რომლის გამოსათვლელ ფორმულას აქვს შემდეგი სახე:

$$a = \nu R^2(1 + \sigma \Delta T) / n \Delta T = R^2(1 + \sigma \Delta \tau) / n \Delta \tau, \quad (2)$$

სადაც: a – ნიმუშის ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტი, მ²/წმ;

V – ნიმუშის ტემპერატურის ცვლილების სიჩქარე, K/წმ;

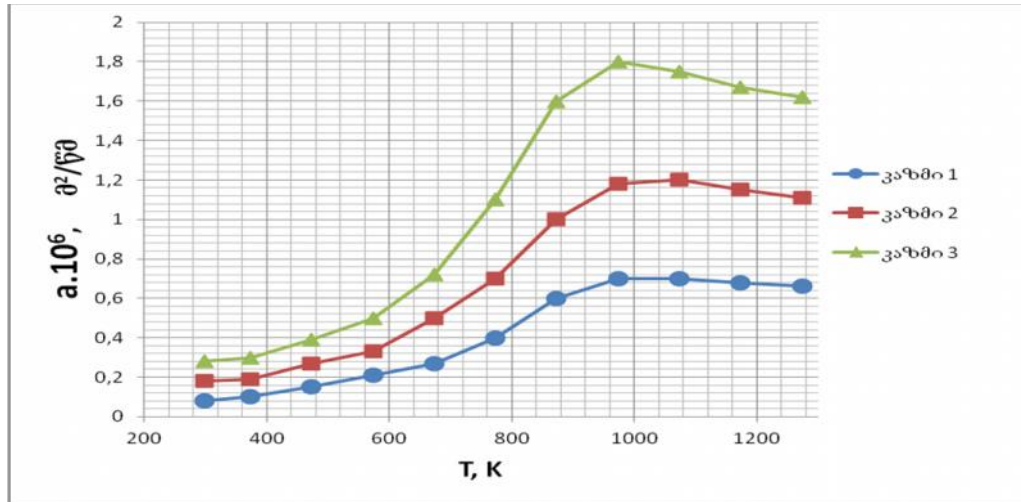
R – ნიმუშის ტემპერატურის გაზომვის წერტილსა და საწყის კოორდინატს შორის მანძილი, მ;

$\Delta \tau$ – ნიმუშის ზედაპირსა და ცენტრს შორის ტემპერატურის შემფოთების (დაგვიანების) დროა, წმ;

n – ნიმუშის ფორმის ფაქტორია, რომელიც ფირფიტის, ცილინდრისა და სფეროსათვის შესაბამისად არის 2, 4 და 6;

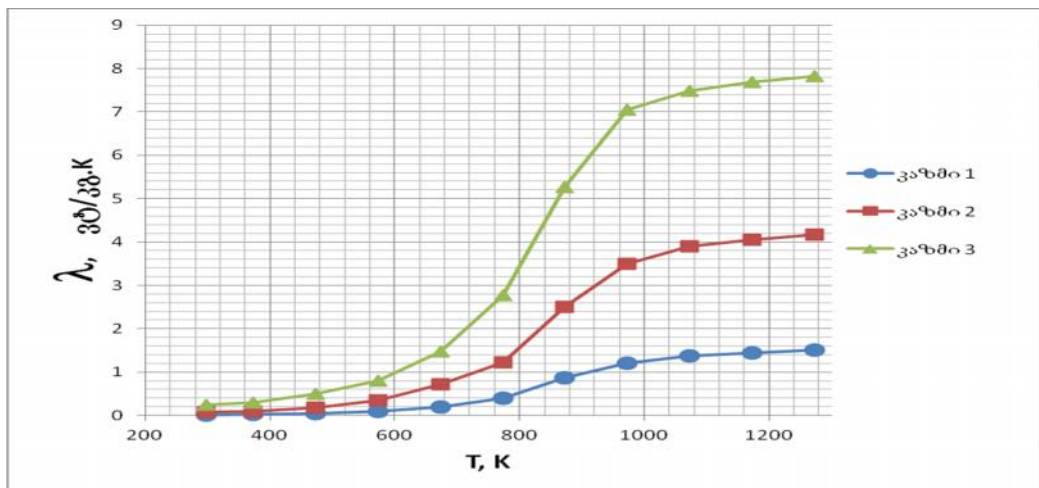
ΔT – ტემპერატურის ვარდნაა ნიმუშის ზედაპირსა და ცენტრს შორის, K;

$\sigma \Delta T$ და $\sigma \Delta \tau$ – შესწორებებია, რომლებიც ითვალისწინებს ტემპერატურის ცვლილების არაწრფივი გავრცელების კანონს დროის მიხედვით.



ნახ.5. კაზმების ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

თბოტევადობის და ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტების ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე გამოთვლილ იქნა შემოთავაზებული კაზმების თბოგამტარობის კოეფიციენტების მნიშვნელობები (ნახ. 6).



ნახ. 6. კაზმების თბოგამტარობის კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

ჩატარებულ იქნა შემოთავაზებული კაზმების დიფერენციალური თერმული ანალიზი და შესწავლილ იქნა კომპლექსური შენადნობის კაზმის დანაჭროვ-

ნების მახასიათებლები შემდეგი შედგენილობის კაზმისათვის (ცხრილი 13).

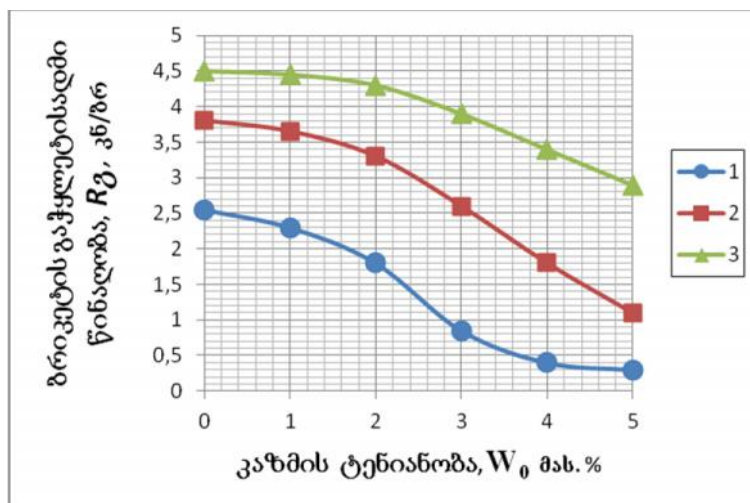
ცხრილი 13. საკაზმე მასალების ქიმიური შედგენილობა და კაზმის თანაფარდობა

საკაზმე მასალების ქიმიური შედგენილობა, მას. %.	კაზმში მასალის წილი, მას. %
ელექტროლიტური მანგანუმის ორჟანგის წარმოების შლამი: Mn _{საერთო} – 20,2; MnO ₂ – 3,20; SiO ₂ – 21,30; P – 0,30; S – 0,50; MeO – 12,0; Σ MeR – 2,0; დანარჩენი – ტენი.	30
SiMn-ის წარმოების გრანულირებული წიდა: Mn – 15,0; SiO ₂ – 49,90; CaO – 13,00; MnO – 3,0; Al ₂ O ₃ – 7,50; Fe ₂ O ₃ – 1,50; P – 0,002; S – 0,05.	15
მეორეული ალუმინის წარმოების წიდა : Al – 29,37; Si – 3,27; P – 0,012; S – 0,183; CaO – 0,773; Cr – 0,078; Mn – 0,149; Zn – 0,034; Mo – 0,003; Cd – 0,092; Sb – 0,048; Pb – 0,061.	20
კოქსწვრილა: C – 85, ნაცარი – 10; ტენი – 3,5; აქროლადები – 1,0.	25
ფლუსად გამოყენებული კირი: SiO ₂ – 3,50; Al ₂ O ₃ – 0,60; MgO – 3,50; CaO – 85,0; MnO – 6,92; Fe ₂ O ₃ – 0,35; S – 0,13	10

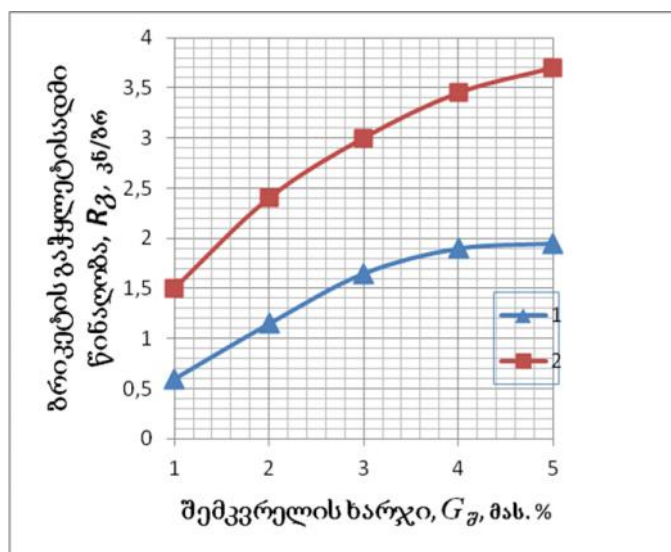
შემკვრელად გამოიყენებოდა თხევადი მინა, რომლის ქიმიური შედგენილობაა (მას. %): SiO₂ – 30; Na₂O – 1,2 და H₂O – 59,00. თხევადი მინის სიმკვრივე იყო 1550კგ/მ³, ხოლო სიბლანტე – 0,95 ნ.წმ/მ².

შემუშავდა ახალი ბრიკეტების შრობის რეჟიმი: $t_{\text{შრობის}}=20^{\circ}\text{C}$. შრობის ხანგრძლივობა $\tau \geq 20$ დღ, ბრიკეტების სიმაღლე იყო 25-30 სმ. ბრიკეტების მექანიკური თვისებების დამოკიდებულება დაბრიკეტების ზოგიერთ პარამეტრზე წარმოდგენილია მე-7 და მე-8 ნახაზებზე. როგორც მე-7 ნახაზიდან ჩანს, თუ კაზმის საწყისი ტენიანობა <2 %, მზა ბრიკეტების გაჭყლეტისადმი წინალობა უმნიშვნელოდ იცვლება, ხოლო თუ ტენიანობა >2 %, – საგრძნობლად ეცემა.

ბრიკეტების მექანიკური თვისებები ასევე დამოკიდებულია შემკვრელის ხარჯზე კაზმში (ნახ. 8). დაბრიკეტების პროცესში სწორი ფორმის ბრიკეტების გამოსავალი მაქსიმალურია, როდესაც კაზმი შეიცავს 5-6% შემკვრელს, მისი ხარჯის სხვა მნიშვნელობებისათვის ვარგის ბრიკეტთა გამოსავალი მცირდება (ნახ. 9).



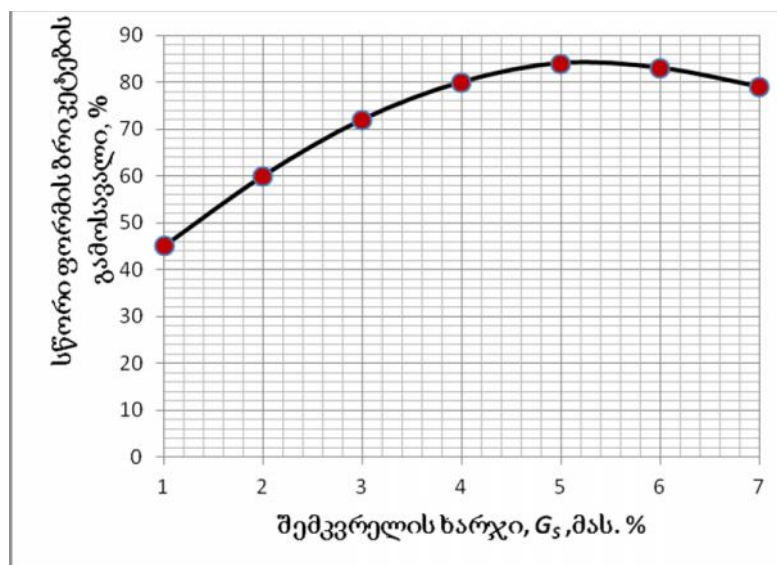
ნახ. 7. ბრიკეტის გაჭყლუტისადმი R_g წინაღობის დამოკიდებულება კაზმში ტენის შემცველობაზე
 ჰაერზე შრობის ხანგრძლივობა: 1 – 10 დღ; 2 – 20 დღ; 3 – 30 დღ.



ნახ. 8. ბრიკეტის გაჭყლუტისადმი წინაღობის დამოკიდებულება შემკვრელის ხარჯზე კაზმში
 ჰაერზე შრობის ხანგრძლივობა: 1–20 დღ, 2–30 დღ.

ზემოჩამოთვლილი მასალებისაგან დამზადებული ბრიკეტები, გამრობის შემდეგ გადადნობილ იქნა ლაბორატორიულ ელექტრორკალურ ლუმელში აპრობირებული ტექნოლოგიით. დნობის ხანგრძლივობა ცივ კაზმზე იყო 40-45 წთ. დნობის დამთავრების შემდეგ ხდებოდა ლითონისა და წიდის გამოშვება კირის რძით შესხურებულ ლითონის ყალიბში და მიღებული პროდუქ-

ტები იმაშივე ცივდებოდა. გაცივებული ლითონი და წიდა ადვილად სცილდებოდა როგორც ერთმანეთს, ისე – ლითონის ყალიბს. ლითონის გამოსავალმა შეადგინა 22 % და მიღებულ იქნა შემდეგი ქიმიური შედგენილობის შენადნობი (მას. %): Mn – 22,0; Si – 44,1; Al – 14,5; Ca – 8,5; Fe – 3,1; C – 5,5; დანარჩენი: Σ_{El} – P-ის, S-ის, Zn-ის, Ni-ის, Mg-ის ჯამური რაოდენობაა. წიდას გამოსავალმა შეადგინა 75%. მისი ქიმიური შედგენილობაა (მას. %): MnO – 14,40; SiO₂ – 21,00; FeO – 5,10; CaO – 20,90; Al₂O₃ – 28,00 და სხვა ოქსიდები.



ნახ. 9. სწორი ფორმის ბრიკეტების გამოსავალის დამოკიდებულება შემკვრელის ხარჯზე (G_s) კაზში

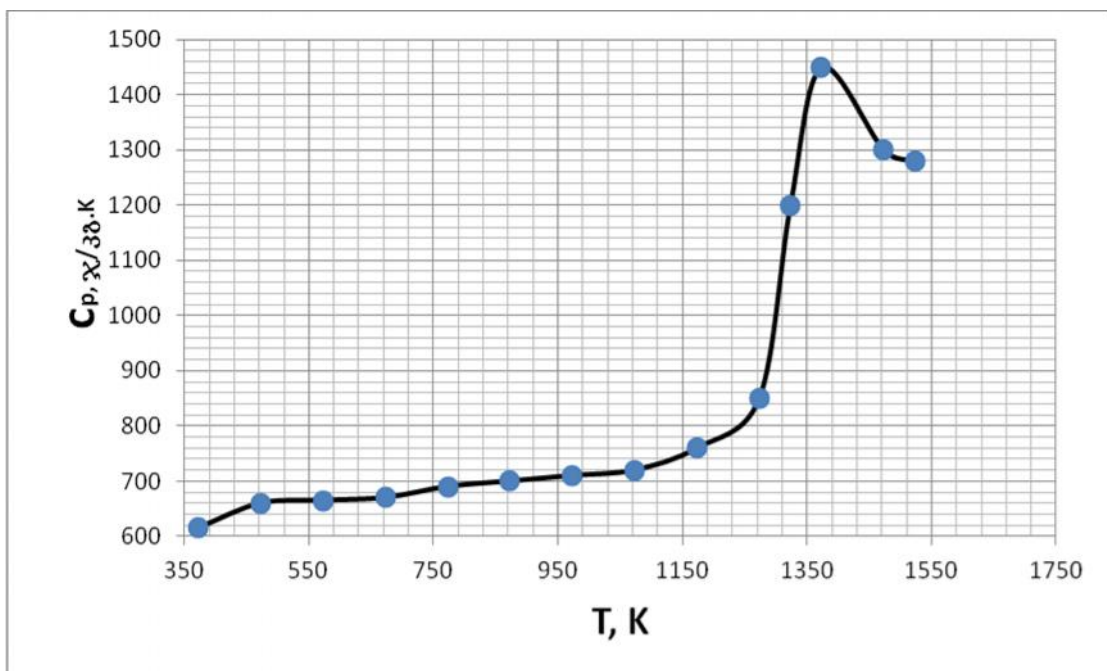
მეტალურგიული და ქიმიური მრეწველობის ნარჩენების ბაზაზე შემუშავდა კომპლექსური შენადნობის გამოსადნობი კაზმი, რომლის შედგენილობაა: ქ. რუსთავის საწარმოო გაერთიანება „აზოტის“ მანგანუმის ორჟანგის წარმოების შლამი – 30-35%; რუსთავის მეორადი ალუმინის წარმოების ნედლეულის ანაცერი – 55-60 %; საფლუსე დანამატი (გამომწვარი დოლომიტი) – 5-15%. ლიგატურა მიიღება ალუმინთერმული პროცესით გრაფიტისტიგელიან ინდუქციურ ღუმელში.

მიღებული ლიგატურის ქიმიური შედგენილობაა (მას. %): 27,00-32,00 % Mn;

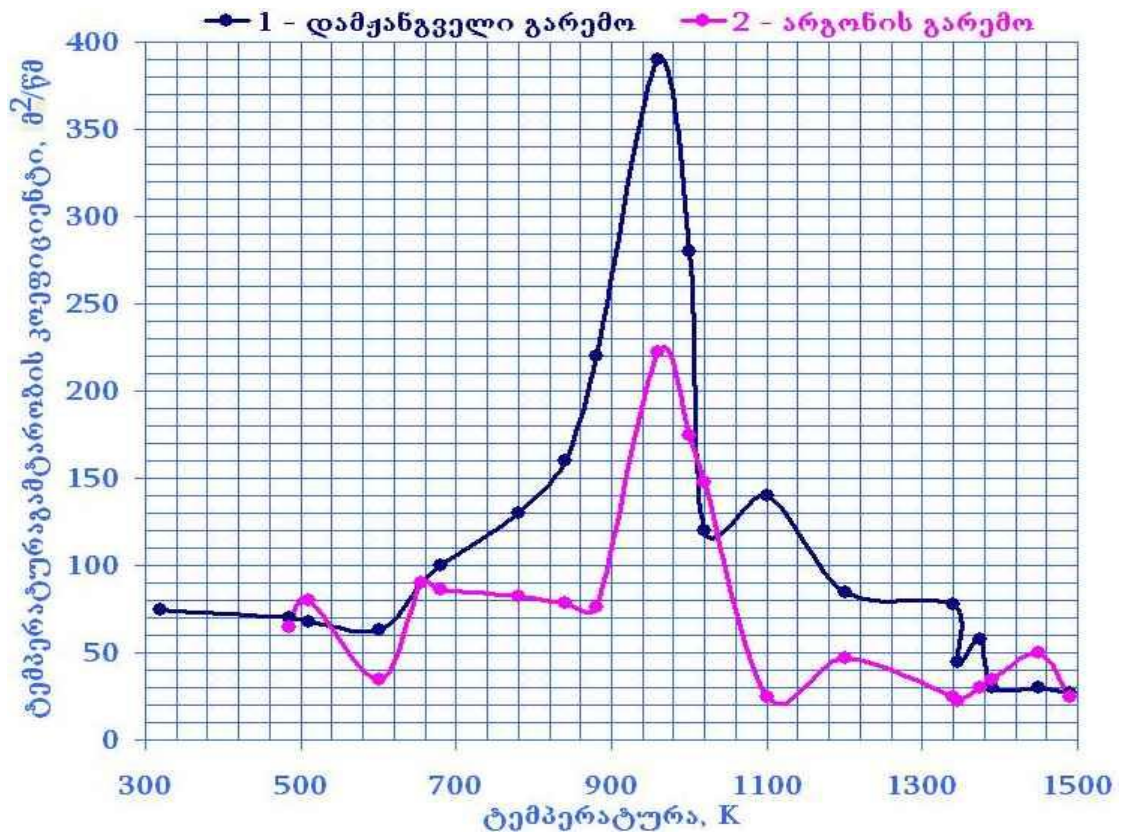
26-30 % Al; 20-22,00 % Si; 0,60-4,00% Ca; 0,50-2,80 % Mg; 0,40-0,80 % Ni; 0-2,70 % Zn; 0,01-0,11 % C; 0,01-0,02 % P; 0,005-0,006 % S; დანარჩენია Fe.

ძირითადი ელემენტების (Mn, Al, Si, Ca) ქვედა ზღვრულ დონეზე შემცველი ეს შენადნობი ავლნიშნეთ როგორც **MnAlSiCa-1**, ხოლო ზედა ზღვრულ დონეზე შემცველი კი – როგორც **MnAlSiCa-2**.

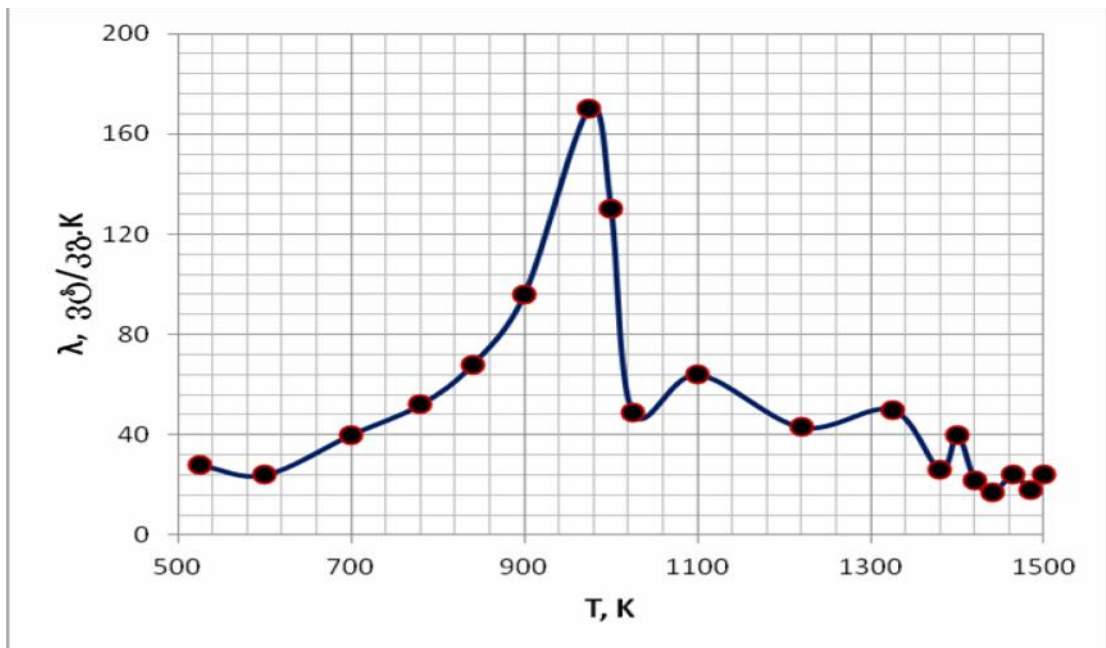
შევისწავლეთ **MnAlSiCa-2** შენადნობის თბოტევადობა, ტემპერატურაგამტარობა და სიმკვრივე. თბოტევადობა განვსაზღვრეთ ფართო ტემპერატურულ დიაპაზონში კალორიმეტრული მეთოდით. კალორიმეტრული გაზომვები ხორციელდებოდა იზოთერმულ პირობებში. ექსპერიმენტული მონაცემები წარმოდგენილია მე-10, მე-11 და მე-12 ნახაზებზე.



ნახ. 10. **MnAlSiCa-2** შენადნობის საშუალო თბოტევადობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე
 შენიშვნა: თითოეული წერტილი გრაფიკზე სამჯერ გამეორებული ცდის საშუალო მნიშვნელობაა.



ნახ. 11. გარემოს გავლენა MnAlSiCa-2 შენადნობის ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე



ნახ. 12. MnAlSiCa-2 შენადნობის თბოგამტარობის კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

ბარიუმის კომპლექსური შენადნობების მიღება ლაბორატორიულ პირობებში ტარდებოდა ტამანის (ელექტროწინალობის) ლუმელში 1400-1450 °C ტემპერატურაზე და მიღებულია შემდეგი მონაცემები: ლითონის გამოსავალი – 30-45 %; წიდისა – 55-48%; აქროლადების – 5-7%. ლაბორატორიულ პირობებში მიღებული შენადნობის და წიდის ქიმიური შედგენილობები წარმოდგენილია მე-14 და მე-15 ცხრილებში.

ცხრილი 14. ბარიუმის კომპლექსური შენადნობის ქიმიური შედგენილობა

კაზმის №	ლითონის შედგენილობა, მას. %						ელემენტების ამოლების ხარისხი, %			Al-ის გამოყენების ხარისხი, %
	Ba	Mn	Si	Ca	Mg	ΣAl,Fe	Ba	Mn	Si	
I	12,82-13,22	–	21,25-22,67	1,28-1,42	3,54-2,95	დანარჩენი	98,8	–	87,5	89,5
II	9,25-9,85	17,25-18,17	19,12-20,25	2,45-2,81	2,98-3,02	დანარჩენი	85,7	91,8	82,5	90,4
III	8,67-8,78	29,34-30,01	15,25-17,12	2,85-2,91	2,67-2,87	დანარჩენი	82,5	95,3	89,3	92,7

შენიშვნა: შენადნობში – C ≤ 0,14; S ≤ 0,003

ცხრილი 15. ბარიუმის კომპლექსური შენადნობის წიდის შედგენილობა

კაზმის №	წიდის კომპონენტები, მას%							წიდის ფუძიანობა, CaO / SiO ₂
	CaO	MnO	MgO	BaO	SiO ₂	FeO	Al ₂ O ₃	
I	10,25	–	12,45	3,35	9,8	7,55	დან.	3,43
II	10,85	0,75	13,15	2,85	8,87	6,89	დან.	3,88
III	11,05	0,87	12,32	3,02	9,12	7,28	დან.	3,79

ნახევრად საწარმოო დნობები ტარდებოდა საწარმოო პირობების ფიზიკური მოდელის გამოყენებით, რომლის დროსაც გათვალისწინებული იყო მოდელირების ძირითადი პრინციპები. დნობები ტარდებოდა გრაფიტისტიგელიან ინდუქციურ ლუმელში 15 კგ მასის კაზმით. დნობის ხანგრძლივობა შეადგენდა 25-30 წუთს. მიღებული შენადნობის და წიდის შედგენილობები წარმოდგენილია მე-16 და მე-17 ცხრილებში.

ცხრილი 16. ნახევრად საწარმოო დნობებისას მიღებული ბარიუმიანი კომპლექსური შენადნობის ქიმიური შედგენილობა

კაზმის №	ლითონის შედგენილობა, მას. %						ელემენტის ამოღების ხარისხი, %			Al-ის გამოყენების ხარისხი, %
	Ba	Mn	Si	Ca	Mg	∑Al,Fe	Ba	Mn	Si	
I	12,91	–	22,67	1,35	3,48	დანარჩენი	90,5	–	85,5	90,8
II	9,48	17,75	19,67	2,61	2,92	დანარჩენი	92,7	93,7	87,2	91,7
III	8,25	29,97	16,28	3,07	2,77	დანარჩენი	95,2	94,3	86,7	92,2

ცხრილი 17. ნახევრად საწარმოო დნობებისას მიღებული ბარიუმიანი კომპლექსური შენადნობის წიდის ქიმიური შედგენილობა

კაზმის №	წიდის კომპონენტები, მას%							წიდის ფუძიანობა, CaO / SiO ₂
	CaO	MnO	MgO	BaO	SiO ₂	FeO	Al ₂ O ₃	
I	9,45	–	12,87	4,42	10,22	7,20	დანარჩენი	3,31
II	10,02	0,82	13,45	3,52	11,21	8,87	დანარჩენი	3,17
III	10,87	0,91	13,95	3,94	11,04	7,78	დანარჩენი	3,39

ჩატარებული იქნა კომპლექსური შენადნობებით თხევადი ფოლადის განჟანგვის პროცესის თერმოდინამიკური ანალიზი. გათვლები ჩატარდა რკინის დედახსნარში, სისტემისათვის **Fe-C-O-Mn-Al-Si-Ba-Ca-Mg-P-S**, შემდეგი პირობების გათვალისწინებით: ტემპერატურა 1873 K, წნევა 1 ბარი, მოცულობა $1,56 \cdot 10^{-12} - 1,578 \cdot 10^{-3}$ დმ³ -ის ფარგლებში. გათვლები ჩატარდა SOLGASMIX-ის მოდერნიზებული პროგრამით და მათი შედეგები წარმოდგენილია მე-18 ცხრილში. ჩატარებულმა თერმოდინამიკურმა გათვლებმა გვიჩვენა, რომ თხევადი ფოლადის მრავალკომპონენტური შენადნობით დამუშავებისას მიიღწევა განჟანგვის და დესულფურაციის მაღალი მაჩვენებლები, რაც განაპირობებს დამუშავებული ფოლადის მაღალ ხარისხს. პროცესის თერმოდინამიკური მახასიათებლები შემდეგია: $\Delta H=1187,02$ კჯ; $\Delta S=1341,81$ კჯ⁻¹; $\Delta G=-774,47$ კჯ.

თხევადი ფოლადის განჟანგვის პროცესის შესწავლის დროს დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ლითონის ნადნობში განმჟანგველი ელემენტების დიფუზიის კოეფიციენტების და ელემენტების დიფუზიის აქტივაციის ენერგიას.

ცხრილი 18. თხევადი ფოლადის განჯანვის პროცესის თერმოდინამიკური გათვლები

თხევადი ლითონის კომპონენტები	აქტიურობები თხევადი ლითონის დამუშავების შემდეგ	წარმოქმნილი კომპონენტები	წარმოქმნილი კომპონენტების აქტიურობები
Al	$1,021 \cdot 10^{-4}$	FeO	$2,17 \cdot 10^{-5}$
Si	$3,122 \cdot 10^{-5}$	Al ₂ O ₃	$1,28 \cdot 10^{-3}$
Mn	$3,15 \cdot 10^{-3}$	SiO ₂	$4,47 \cdot 10^{-7}$
O	$2,321 \cdot 10^{-5}$	MnO	$7 \cdot 43 \cdot 10^{-5}$
S	$1,125 \cdot 10^{-9}$	CaS	$8,27 \cdot 10^{-5}$
P	$4,25 \cdot 10^{-9}$	FeS	$3,91 \cdot 10^{-3}$
Ca	$1,15 \cdot 10^{-6}$	MnS	$2,75 \cdot 10^{-3}$
Mg	$1,23 \cdot 10^{-6}$	CaO	$1,08 \cdot 10^{-2}$
Ba	$4,34 \cdot 10^{-6}$	2CaO·2SiO ₂	$1,17 \cdot 10^{-6}$

ჩვენ მიერ შეწავლილ იქნა თხევად რკინაში ბარიუმიანი კომპლექსური შენადნობის ძირითადი კომპონენტების დიფუზიის კოეფიციენტები. სადიფუზიო არედ გამოყენებული იყო წყალბადით აღდგენილი რკინა 50% და 50% არმკო-რკინის ნარევი ჟანგბადის შემცველობით შეადგენდა 0,005-0,020%-ს.

ექსპონენციალური მამრავლის (D₀), აქტივაციის ენერჯის და დიფუზიური გადაადგილების ალბათობის (W) მნიშვნელობები, 1823-1923 K ტემპერატურულ ინტერვალში წარმოდგენილია მე-19 და მე-20 ცხრილებში, ხოლო შედარებისათვის შელლობით მიღებული იგივე შედგენილობის კომპლექსური შენადნობის გადაადგილების ალბათობის საშუალო მნიშვნელობები – 21-ე ცხრილში.

მიღებული შედეგების გაანალიზებით დადგინდა სამრეწველო და საყოფაცხოვრებო ნარჩენებიდან გამოდნობილი ბარიუმიანი კომპლექსური შენადნობის უპირატესობა.

ცხრილი 19. ექსპონენციალური მამრავლის (D₀), აქტივაციის ენერჯისა და დიფუზიური გადაადგილების ალბათობის (W) მნიშვნელობები მეორე და მესამე კაზმებიდან მიღებული შენადნობებისათვის

ელემენტი	D ₀ , მ ² /წმ	E, ჯ/მოლი	n	S	R	W, მ ² /წმ
Al	$24,987 \cdot 10^{-3}$	-279380	5	1,12	0,85	$(10,04-4,27) \cdot 10^{-6}$
Mn	$3,781 \cdot 10^{-3}$	-169271	5	1,02	0,81	$(5,97-2,82) \cdot 10^{-8}$
Si	$5,81 \cdot 10^{-3}$	-320862	5	0,91	0,92	$(1,35-1,78) \cdot 10^{-5}$
Ba	$7,91 \cdot 10^{-3}$	-440761	5	0,85	0,93	$(2,78-1,67) \cdot 10^{-6}$

ცხრილი 20. ექსპონენციალური მამრავლის (D₀), აქტივაციის ენერჯის და დიფუზიური გადაადგილების ალბათობის (W) მნიშვნელობები პირველი კაზმიდან მიღებული შენადნობისათვის

ელემენტი	D ₀ , მ ² /წმ	E, ჯ/მოლი	n	S	R	W, მ ² /წმ
Al	25.8·10 ⁻³	-280108	5	1,45	0,87	(9,72-7,27)·10 ⁻⁵
Si	4,91·10 ⁻³	-181075	5	0,89	0,84	(7,62-4,12)·10 ⁻⁶
Ba	19,27·10 ⁻³	-198245	5	1,02	0,90	(3,02-1,85)·10 ⁻⁵

ცხრილი 21. შეღობით მიღებული იგივე შედგენილობის კომპლექსური შენადნობის გადაადგილების ალბათობის საშუალო მნიშვნელობები

ელემენტის დასახელება	გადაადგილების ალბათობა W, მ ² /წმ
Al	(2,78-2,01)·10 ⁻¹¹
Si	(7,14-3,11)·10 ⁻⁹
Mn	(5,25-2,71)·10 ⁻⁹
Ba	(2,72-1,25)·10 ⁻⁹

მიღებული შენადნობის ფოლადის წარმოებაში გამოყენების მიზნით ჩატარებულ იქნა თხევადი ფოლადის ბარიუმიანი კომპლექსური შენადნობით დამუშავების როგორც ლაბორატორიული, ისე ნახევრად საწარმოო ექსპერიმენტები, რომელთა შედეგები წარმოდგენილია 22-ე და 23-ე ცხრილებში.

ჩატარებულ იქნა ბარიუმიანი კომპლექსური შენადნობებით დამუშავებულ ფოლადში არალითონური ჩანართების რაოდენობრივი და მორფოლოგიური შეფასება და განსაზღვრულ იქნა მექანიკური თვისებები.

ბარიუმიანი კომპლექსური შენადნობებით დამუშავებულ ფოლადში არალითონური ჩანართების რაოდენობის და მორფოლოგიური კვლევისას გამოყენებულია ნიმუშების ელექტროქიმიური გახსნით მიღებული ნალექის მიკროქიმიური და პეტროგრაფიული გამოკვლევის მეთოდი. არალითონური ჩანართების რაოდენობა და შედგენილობა საცდელი დნობებით მიღებულ ფოლადში წარმოდგენილია 24-ე ცხრილში, ხოლო ტრადიციული ხერხით დამუშავებულში (შედარებისათვის) – 25-ე ცხრილში.

ბარიუმიანი კომპლექსური შენადნობების გამოყენებით და ტრადიციული ტექნოლოგიით მიღებული ლითონის თვისებები ნაჩვენებია 26-ე ცხრილში.

ცხრილი 22. ბარიუმის კომპლექსური შენადნობის გამოყენებით თხევადი ფოლადის დამუშავების ლაბორატორიული ექსპერიმენტის შედეგები

კომპლექსური შენადნობის ქიმიური შედგენილობა, მას. %:	ფოლადის ქიმიური შედგენილობა, მას. %						
	განჟანგვის წინ/განჟანგვის შემდეგ						
	C	Si	Mn	S	P	ჟანგბადის კონცენტრაცია, %	დესულფურაციის ხარისხი, %
12,91 Ba; 22,67 Si; 1,35 Ca; 3,8 Mg; C≤0,14; S≤0,003; დანარჩენი Al	0,18/0,20	-/0,32	0,12/0,50	0,045/0,032	0,027/0,020	0,0210/0,0095	28
	0,20/0,244	-/0,35	0,11/0,39	0,043/0,032	0,022/0,020	0,0220/0,0085	26
	0,23/0,25	-/0,37	0,13/0,38	0,044/0,035	0,025/0,024	0,0191/0,0085	20,5
9,48 Ba; 17,75 Mn; 19,67 Si; 2,61 Ca; 2,69 Mg; C≤0,14; S≤0,003; დანარჩენი ΣAl, Fe	0,19/0,23	-/0,33	0,11/0,38	0,049/0,37	0,028/0,023	0,0175/0,0079	14
	0,22/0,25	-/0,35	0,09/0,37	0,042/0,031	0,022/0,019	0,0117/0,0071	26,2
	0,21/0,24	-/0,37	0,14/0,49	0,047/0,033	0,026/0,020	0,025/0,020	29,8
8,25 Ba; 29,97 Mn; 16,28Si; 3,07 Ca; 2,77 Mg; C ≤0,14; S≤0,003; დანარჩენი ΣAl, Fe	0,24/0,26	-/0,35	0,12/0,44	0,044/0,031	0,023/0,02	0,0190/0,0082	29,5
	0,171/0,20	-/32	0,11/0,47	0,041/0,033	0,026/0,021	0,0211/0,0091	19,5
	0,22/0,27	-0,36	0,13/0,49	0,043/0,35	0,025/0,021	0,011/0,0082	18,6

ცხრილი 23. ბარიუმის კომპლექსური შენადნობით თხევადი ფოლადის დამუშავების ნახევრად საწარმოო ექსპერიმენტების შედეგები

კომპლექსური შენადნობის ქიმიური შედგენილობა, მას. %:	ფოლადის ქიმიური შედგენილობა, მას. %						
	განჟანგვის წინ / განჟანგვის შემდეგ						
	C	Si	Mn	S	P	ჟანგბადის კონცენტრაცია, %	დესულფურაციის ხარისხი, %
1	2	3	4	5	6	7	8
12,91 Ba; 22,67Si; 1,35Ca; 3,8Mg; C ≤0,14; S≤0,003; დანარჩენი ΣAl, Fe	0,21/0,27	-/0,30	0,12/0,39	0,045/0,032	0,027/0,020	0,0210/0,0095	28
	0,22/0,264	-/0,36	0,11/0,43	0,043/0,032	0,022/0,020	0,0220/0,0085	26
	0,23/0,27	-/0,32	0,13/0,47	0,044/0,035	0,025/0,024	0,0191/0,0085	21

ცხრილი 23. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8
9,48 Ba, 17,75 Mn, 19,67 Si, 2,61 Ca, 2,69 Mg, C ≤0.14, S≤0,003 დანარჩენი ΣAl,Fe	0,17/0,23	-/0,33	0,11/0,48	0,049/ 0,037	0,028/ 0,023	0,0175/ 0,0079	14
	0,22/0,27	-/0,33	0,09/0,47	0,042/ 0,031	0,022/ 0,019	0,0117/ 0,0071	26
	0,41/0,47	-/0,29	0,14/0,49	0,047/ 0,033	0,026/ 0,020	0,025/ 0,020	30
8,25 Ba, 29,97 Mn, 16,28Si, 3,07 Ca, 2,77 Mg, C ≤0.14, S≤0,003 დანარჩენი ΣAl,Fe	0,18/0,25	-/0,34	0,12/0,46	0,044/ 0,031	0,023/ 0,02	0,0190/ 0,0082	30
	0,23/0,27	-/32	0,11/0,49	0,041/ 0,033	0,026/ 0,021	0,0211/ 0,0091	20
	0,19/0,27	-0,37	0,13/0,49	0,043/ 0,35	0,025/ 0,021	0,011/ 0,0082	19

ცხრილი 24. არალითონური ჩანართების რაოდენობა და შედგენილობა საც-
დელი დნობებით მიღებულ ფოლადში

კომპლექსური შენადნობების ქიმიური შედგენილობა, მას. %	ჩანართების საერთო რაოდენობა	ჩანართების ქიმიური შედგენი- ლობა, მას. %			
		SiO ₂	FeO	MnO	Al ₂ O ₃
9,48 Ba; 17,75Mn; 19,67Si; 2,61Ca; 2,69 Mg; C ≤0,14; S≤0,003; დანარჩენი ΣAl,Fe	0,0192	15,32	5,314	3,35	75,89
	0,0172	18,65	5,044	5,68	70,63
	0,0181	20,16	4,95	7,21	67,68
8,25 Ba;29,97Mn; 16,28Si; 3,07Ca; 2,77 Mg; C ≤0.14; S≤0,003 დანარჩენი ΣAl,Fe	0,0167	17,32	3,33	6,32	73,03
	0,0158	16,68	4,87	7,47	70,98
	0,0160	19,17	5,37	7,95	67,51

ცხრილი 25. არალითონური ჩანართების შედგენილობა ტრადიციული მეთოდით
დამუშავებულ ფოლადში

ჩანართების საერთო რაოდენობა	ჩანართების ქიმიური შედგენილობა, მას. %			
	SiO ₂	FeO	MnO	Al ₂ O ₃
0,0385	54,30	7,82	5,95	31,88

ცხრილი 26. ბარიუმის კომპლექსური შენადნობების გამოყენებით და ტრადიციული ტექნოლოგიით მიღებული ლითონის თვისებები

კომპლექსური შენადნობების ქიმიური შედგენილობა, მას. %	მექანიკურ თვისებათა მახასიათებლები			
	დენადობის ზღვარი	სიმტკიცის ზღვარი	ფარდობითი წაგრძელება	სისალე
	σ _დ , კპა	σ _ს , კპა	δ, %	HB
9,48 Ba; 17,75 Mn; 19,67 Si; 2,61 Ca; 2,69 Mg; C ≤ 0.14; S ≤ 0,003; დანარჩენი ΣAl, Fe	343	587	15,0	190
	345	580	14,5	200
8,25 Ba; 29,97 Mn; 16,28 Si; 3,07 Ca; 2,77 Mg; C ≤ 0.14; S ≤ 0,003 დანარჩენი ΣAl, Fe	360	588	15,7	209
	355	578	15,5	205
ტრადიციული ტექნოლოგიით განყენებული ფოლადი	325	592	14,2	205

განსაზღვრულია თხევად რკინაში ლიგატურა MnAlSiCa-ის და ამს-ის (32% Mn, 30% Al, 22% Si) კომპონენტების (Mn, Al, Si) და აგრეთვე Ni-ის დიფუზიის კოეფიციენტები (ცხრილები).

ცხრილი 27. წინაექსპონენციალური მამრავლისა (D₀) და აქტივაციის ენერჯის დიფუზიური გადაადგილების ალბათობის (W) მნიშვნელობები 1823-1923 K ტემპერატურულ ინტერვალში

ელემენტი	წინაექსპონენციალური მამრავლისა და აქტივაციის ენერჯის დიფუზიური გადაადგილების ალბათობის მნიშვნელობები					
	D ₀ , მ ² /წმ	E, ჯ/მოლი	n	±S·10 ⁸ , მ ² /წმ	R	W, მ ² /წმ
Al	25,847	278373	15	4,10	0,92	(9,466-3,642)10 ⁻⁶
Mn	3,289·10 ⁻³	167890	15	2,54	0,84	(6,465-3,634)10 ⁻⁹
Si	583,851	317310	15	5,30	0,85	(1,236-41,60)10 ⁻⁴
Ni	0,168·10 ⁻³	153120	15	1,14	0,91	(2,440-1,598)10 ⁻⁹

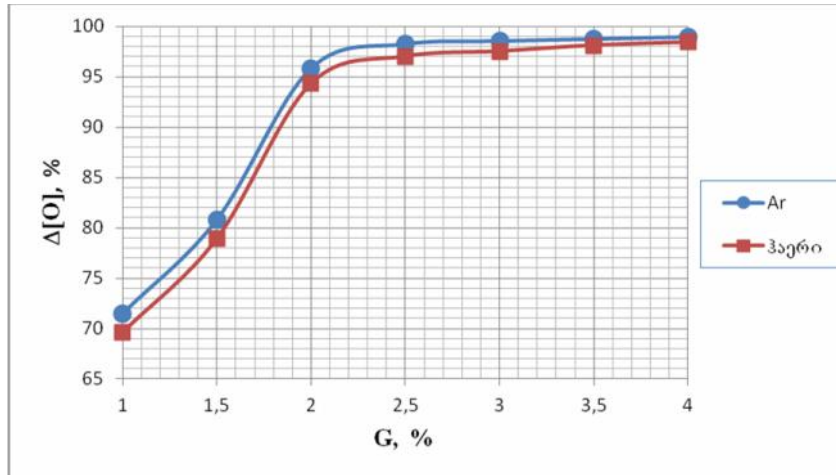
ვხრილი 28. ამს-ის ქიმიური ელემენტების დიფუზიური გადაადგილების ალბათობის (W) მნიშვნელობები

ქიმიური ელემენტის დასახელება	გადაადგილების ალბათობა (W,მ ² /წმ)
Al	(1,903÷1,448) · 10 ⁻¹¹
Si	(6,293÷3,542) · 10 ⁻⁹
Mn	(2,328 ÷ 1,380) · 10 ⁻⁹

მიღებული შედეგებით ამს-ის დიფუზიის კოეფიციენტებისა და დიფუზიური არის გადაადგილების ალბათობების შედარებამ დაადასტურა MnAlSiCa შენადნობის უპირატესობა, რაც გამოიხატება ამს-ის დიფუზიური პროცესის ალბათობის მცირე მნიშვნელობებით. ეს უკანასკნელი კი მიუთითებს აღნიშნული პროცესის ხანგრძლივობის ზრდაზე MnAlSiCa-თან შედარებით. მიღებული მონაცემებით დადგინდა, რომ MnAlSiCa შენადნობის გამოყენება, მისი ძირითადი ელემენტების (Mn, Al, Si) დიფუზიის მაღალი კოეფიციენტების გამო, თხევადი ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავების ტექნოლოგიური პროცესებით პრაქტიკულად არ არის შეზღუდული.

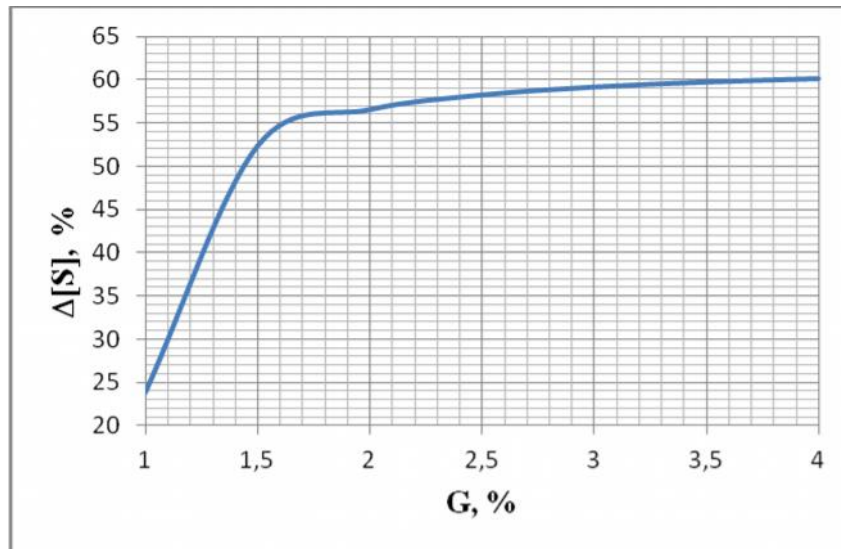
გამოკვლეულია კომპლექსური შენადნობის გამოყენებით ფოლადის განჟანგვა-დეჟულფურაციის ერთდროული ჩატარების შესაძლებლობა. ამისათვის, ქიმიური და მეტალურგიული წარმოების ნარჩენებით გამოდნობილ იქნა კომპლექსური შენადნობი ასეთი შედგენილობის კაზმისგან: ელექტროლიტური მანგანუმის IV ოქსიდის წარმოების ლამი – 30 % , სილიკომანგანუმის გრანულირებული წიდა – 15 %, მეორადი ალუმინის წარმოების წიდა – 20 %, ფლუსი – 10 % და აღმდგენელი (კოქსი) – 25 %. მიღებულ იქნა შემდეგი ქიმიური შედგენილობის (მას. %) მანგანუმ-სილიციუმ-კალციუმ-ალუმინიანი კომპლექსური შენადნობი: 22 Mn; 44 Si; 14,5 Al; 8,5 Fe; 5,5 C; დანარჩენი – ΣP, S, Zn, Ni, Mg.

შესწავლილ იქნა მიღებული კომპლექსური შენადნობის განმჟანგველუნარიანობა ინერტულ აირ არგონისა და დამჟანგველ ატმოსფეროებში (ნახ. 13) და განგოგირდების უნარი (ნახ 14), რის შედეგადაც დადგენილია, რომ განჟანგვა-დეჟულფურაციისათვის ამ კომპლექსური შენადნობის ოპტიმალური ხარჯია 2-2,5 %.



ნახ. 18. დეოქსიდაციის ($\Delta[O]$, %) ხარისხის დამოკიდებულება კომპლექსური შენადნობის ხარჯზე (G, %)

- – თხევადი ლითონის დამუშავება არგონის გარემოში.
- – თხევადი ლითონის დამუშავება დამჟანგველ (ატმოსფერული ჰაერის) გარემოში.



ნახ. 19. დესულფურაციის ხარისხის ($\Delta[S]$, %) დამოკიდებულება კომპლექსური შენადნობის ხარჯზე (G, %)

შესწავლილია ლიგატურის 2%-იანი ოპტიმალური ხარჯის დროს ტემპერატურის გავლენა დესულფურაციის ხარისხზე 1773-1973 K ტემპერატურულ ინტერვალში ყოველი 50 კგ-ით მომატების დროს. ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავების შედეგად დადგინდა, რომ დესულფურაციის ხარისხის დამოკიდებულებას ტემპერატურაზე აქვს პარაბოლის სახე და აღიწერება ასეთი გამოსახულებებით:

$$\Delta[S]_{MnAlSiCa-1} = -0,0026T^2 + 9,6326T - 8960$$

$$\Delta[S]_{MnAlSiCa-2} = -0,0026T^2 + 9,6326T - 8960$$

ტემპერატურის ზრდასთან ერთად იზრდება ლიგატურით ფოლადის დესულფურაციის ხარისხი და მაქსიმუმს აღწევს 1873 K-ის დროს, რაც თხევადი ფოლადის ღუმლიდან გამოშვებისა და ფოლადის ღუმელსგარე დამუშავების ტემპერატურის ტოლია.

ამრიგად, ექსპერიმენტების შედეგად დადგინდა, რომ MnAlSiCa შენადნობით ფოლადის დამუშავებისას შესაძლებელია თხევადი ფოლადის განჟანგვისა და დესულფურაციის პროცესების შეთავსება, რაც ცალკეული განჟანგვლებითა და კომპლექსურ შენადნობ „ამს“-ით ნაკლებად მიიღწევა და რომ MnAlSiCa კომპლექსური შენადნობის მეშვეობით ფოლადის განჟანგვისას მიიღწევა დესულფურაციის მაღალი ხარისხი შენადნობის 3%-იანი ხარჯისა

თხევადი ფოლადის დესულფურაციის მიზნით ჩვენ შევირჩიეთ შემდეგი შემადგენლობების წიდაწარმომქმნელი ნარევები:

I ვარიანტი – 10 % MnAlSiCa-2; 7 % მდნობი შპატი; კირი – დანარჩენი;

II ვარიანტი – 20 % MnAlSiCa-2; 15 % მდნობი შპატი; კირი – დანარჩენი.

ექსპერიმენტები ჩატარდა წიდაწარმომქმნელი ნარევის 1-4 % ხარჯისას. დესულფურაციის ხარისხი ლითონის 10 წთ-ით დაყოვნებისას მაქსიმუმს აღწევს წიდაწარმომქმნელი ნარევის 2,5-3 % ხარჯის შემთხვევაში, ხოლო მისი შემდგომი ზრდა უმნიშვნელოდ მოქმედებს დესულფურაციის ხარისხზე.

ჩვენ მიერ შეწავლი იქნა დესულფურაციის ხარისხის დამოკიდებულება დაყოვნების დროზე წიდის 3%-ის ხარჯისას. ნადნობის დაყოვნების ოპტიმალური დრო შეადგენს 10-12 წუთს. შემდგომი დაყოვნება პრაქტიკულად არ მოქმედებს დესულფურაციის ზრდაზე.

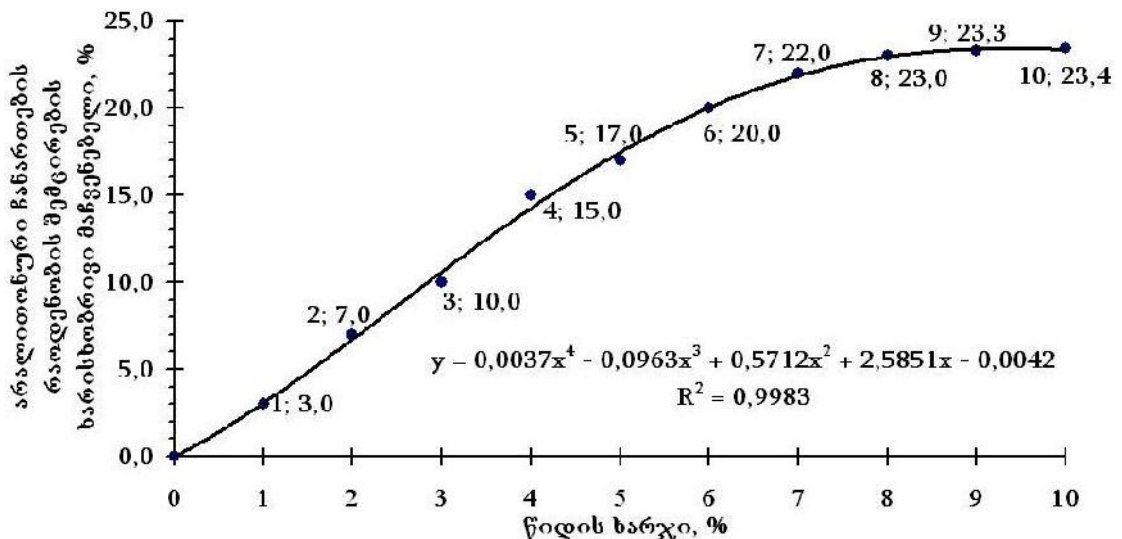
ამრიგად, ჩვენი გამოკვლევებით დადგინდა, რომ MnAlSiCa კომპლექსური შენადნობის გამოყენება წიდაწარმომქმნელ ნარევებში მიზანშეწონილია და შემოთავაზებული ნარევი უზრუნველყოფს დესულფურაციის მაღალ (70-85%) ხარისხს.

შესწავლილია თხევადი ფოლადის ლუმელგარე დამუშავება კომპლექსური შენადნობისა და ეგზოთერმული წიდაწარმოქმნელი ნარევით (ცხრილი 29)

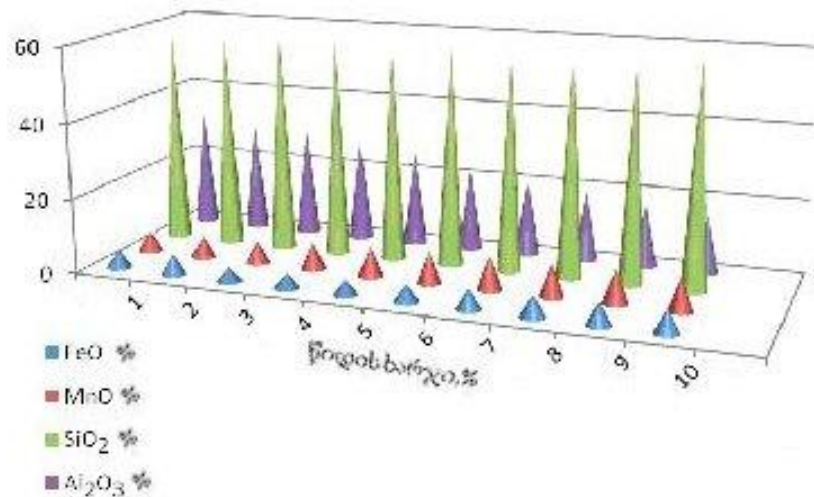
ცხრილი 29. ეგზოთერმული წიდაწარმოქმნელი ნარევის შედგენილობა

№	კომპონენტი	შემცველობა, მას. %
1	ქიმიური და მეტალურგიული წარმოების ნარჩენების ბაზაზე მიღებული კომპლექსური შენადნობი, (მას. %): 22 Mn; 44 Si; 14,5 Al; 8,5 Fe; 5,5 C; 3,5 Ca; 1,88 Mg; 0,08 S; 0,04 P.	5
2	კალციუმის კარბიდი – CaC_2	1,7
3	CaF_2	1,5
4	ახლად გამომწვარი კირი – CaO	დანარჩენი

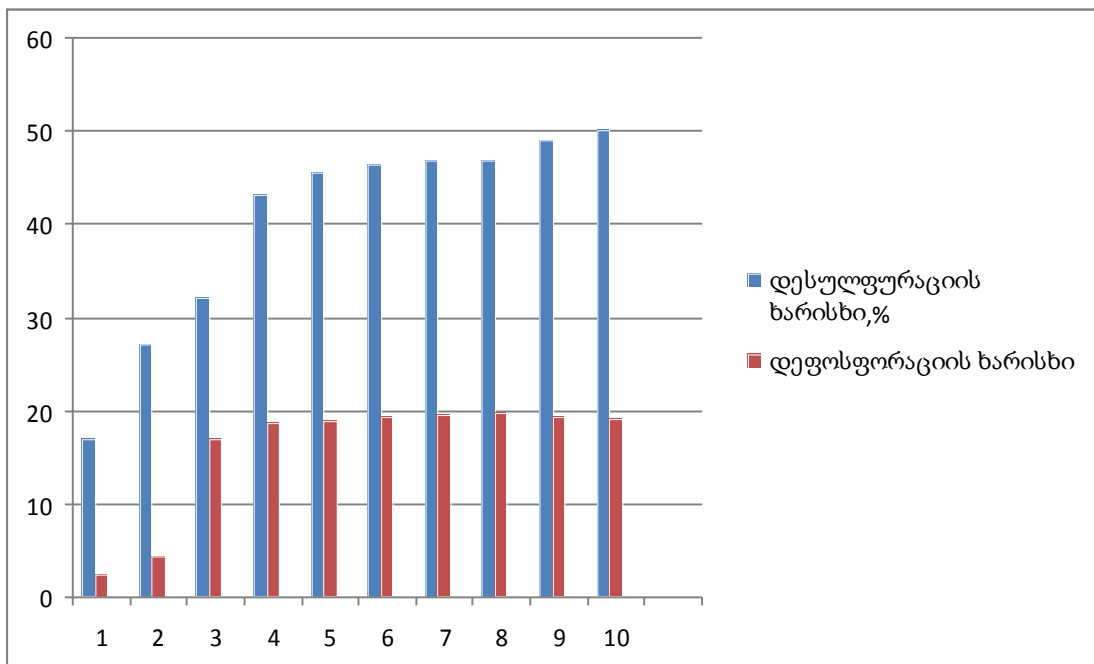
შესწავლილია ფოლადში არალითონური ჩანართების რაოდენობის შემცირების მახასიათებელი, მორფოლოგიური შედგენილობა, წიდაწარმოქმნელი ნარევის დესულფურაციისა და დეფოსფორაციის უნარიანობა (მე-20, 21-ე და 22-ე ნახაზები)



ნახ. 20. წილის ხარჯის გავლენა არალითონური ჩანართების რაოდენობის შემცირებაზე



ნახ. 21. არალითონური ჩანართების მორფოლოგიური შედგენილობის (რაოდენობის) დამოკიდებულება წილის ხარჯზე



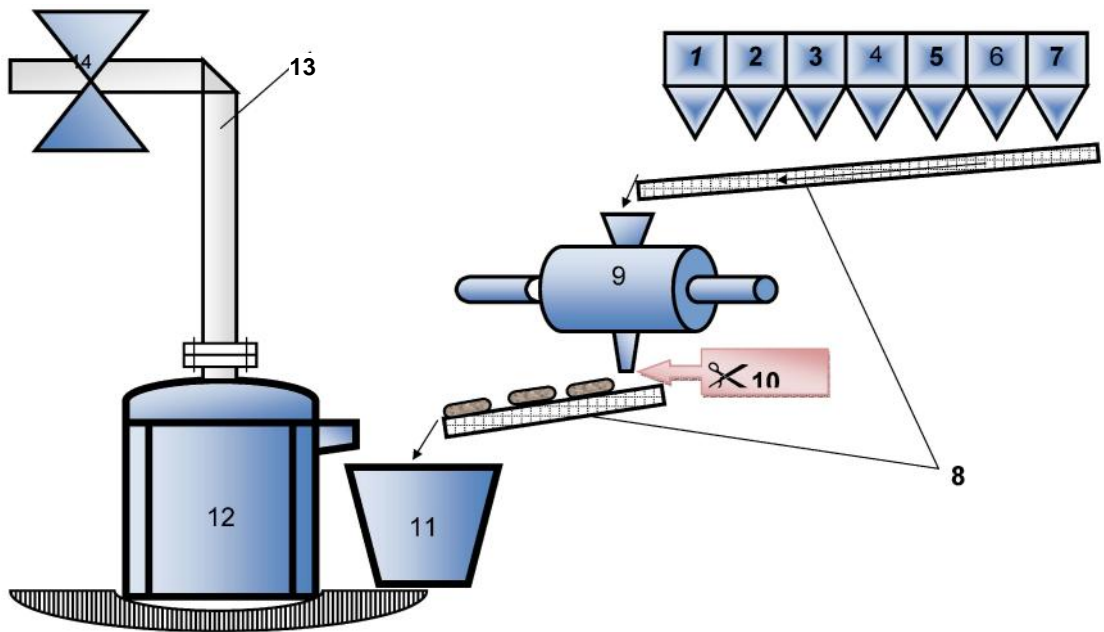
ნახ. 22. დესულფურაციისა და დეფოსფორაციის ხარისხის დამოკიდებულება წილის ხარჯზე

ჩვენ მიერ შემოთავაზებულია ეგზოთერმული წილის ხარჯი 200 ტონა თხევადი ფოლადის დესულფურაციისათვის საწარმოო პირობებში. თუ გამოშვების წინ ფოლადში გვექნება 0,08 % გოგირდი, ხოლო დამუშავების შემდეგ – 0,02 %, გამოსაშვები ფოლადის ტემპერატურა უნდა იყოს 1660 °C, ხოლო დამუშავების

შემდეგ კი – 1650 °C. მაშინ ეგზოთერმული წიდის ხარჯი იქნება:

$$G=0,08 \cdot (0,08-0,02) \cdot (1660-1650) \cdot 200=9,6 \text{ კგ/ტ ფოლადზე.}$$

აღწერილი ტექნოლოგიით თხევადი ფოლადის რაფინირებისათვის ჩვენს მიერ შემუშავებულ იქნა ღუმელსგარე დამუშავების საწარმოო ტექნოლოგიური სქემა და შესაბამისი უზანი (ნახ. 23).



ნახ. 23. ღუმელსგარე დამუშავების უზანი

1-7 – საკაზმემასალების ბუნკერები, 8 – კონვერები, 9 – შემრევი, 10 – წამკვეთი მოწყობილობა – «მაკრატელი», 11 – ციცხვი, 12 – ღუმელი, 13 – აირგაყვანილობა, 14 – სკრუბერი

დასკვნა

1. შესრულებულია რკინის მეტალურგიის თეორიული ანალიზი და გათვლილია რკინის ჟანგეულების აღდგენის თერმოდინამიკური და ტემპერატურული პარამეტრები.
2. მოცემულია რკინის პირდაპირი მიღების ტექნოლოგიების ანალიზი.
3. გათვლილია მონოკაზმის ბრიკეტების რაციონალური შედგენილობა.
4. გაანგარიშებულია რაციონალური აღმდგენლის თერმოდინამიკური პარამეტრები.
5. ექსპერიმენტულად დადგენილია მონოკაზმის ბრიკეტების დამზადების ძირითადი ტექნოლოგიური პარამეტრები და მათი მექანიკური თვისებები რკინის ჰემატიტური და მაგნეტიტის მადნების გამოყენების შემთხვევაში.

6. ლიტერატურული ანალიზით დადგინდა თხევადი ფოლადის ლუმელსგარე დამუშავებისთვის კომპლექსური შენადნობების გამოყენების უპირატესობა.
7. კომპლექსური შენადნობებით ციხვში თხევადი ფოლადის დამუშავება ქმნის მის განჟანგვისა და რაფინირების პროცესების პარალელური მსვლელობის შესაძლებლობას.
8. დადგენილია $MnAlSiCa$ -ის ტიპის შენადნობის თბოფიზიკური თვისებები ტემპერატურის ფართო ინტერვალში: 300-1500 K.
9. $MnAlSiCa$ - ის თბოტევადობის მნიშვნელობა დაბალი ტემპერატურისას (300-1200კ) მერყეობს (600-850ჯ/კგ.K) ინტერვალში, ხოლო $T > 1200$ K -ს დროს თბოტევადობის მნიშვნელობა მკვეთრად იზრდება, აღწევს მაქსიმუმს 1470 ჯ/კგ.K -ს, როდესაც $T = 1373$ K -ს, ამის შემდგომ იწყება მის მნიშვნელობის მკვეთრი ვარდნა.
10. ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტის ტემპერატურულ დამოკიდებულებას გააჩნია რთული ხასიათი გამოკვეთილი ექსტრემუმებით ტემპერატურის (900-1100K) ინტერვალში. დამჟანგველ გარემოში ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა პრაქტიკულად მთელ ტემპერატურულ დიაპაზონში უფრო მაღალია, ვიდრე ნეიტრალური გარემოს პირობებში.
11. $MnAlSiCa$ - ის თბოგამტარობის კოეფიციენტის მნიშვნელობები საკმაოდ მაღალია და ამიტომ კომპლექსური შენადნობით თხევადი ფოლადის ციხვში დამუშავება არ გამოიწვევს ლითონის გაციებას.
12. დადგინდა კომპლექსური შენადნობის $MnAlSiCa$ -ს დესულფურაციის უნარიანობა.
13. რაციონალური დესულფურაციისათვის დადგენილია ოპტიმალური პარამეტრები: $MnAlSiCa$ -ის ხარჯი 2% და პროცესის ტემპერატურა 1873K.
14. დადგინდა, რომ განჟანგვისათვის კომპლექსური შენადნობის ოპტიმალური რაოდენობაა 2-2,5 %.
15. შემოთავაზებული კომპლექსური შენადნობი უზრუნველყოფს ლითონის დესულფურაციის მაღალ ხარისხს 56,51-58,2 %.
16. ექსპერიმენტულად დადასტურებულია შემოთავაზებული კომპლექსური შენადნობის გამოყენებისას თხევადი ფოლადის დეოქსიდაციისა და დესულფურაციის ერთდროულად ჩატარება.
17. შემუშავებულია თხევადი ფოლადის დამუშავების ტექნოლოგია და საწარმოო ტექნოლოგიური სქემა.

პუბლიკაციები

1. 1. მ.სირაძე, ო.მიქაძე, თ.ბუჩუკური. კომპლექსური შენადნობის კაზმის დანაჭროვნების მახასიათებლების შესწავლა. ენერჯია (სამეცნიერო – ტექნიკური ჟურნალი). 2(66)/2013. გვ.58–61. თბილისი. ISSN 1512-0120.

2. 2. სირაძე მ.თ., მიქაძე ო.შ., გოგიჩაშვილი ბ.გ. კომპლექსური შენადნობის გამოყენებით ფოლადის განჟანგვის და დესულფურაციის ერთდროულად ჩატარების შესაძლებლობის გამოკვლევა. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი.No.2 (vol.66),გვ.110–113. 2103. GFID.GEN LTD. თბილისი. INDEX 74100.
3. 3. მ.სირაძე, ო.მიქაძე, ბ.გოგიჩაშვილი, თ.ბუჩუკური. ეგზოთერმული წიდაწარმომქმნელი ნარევით თხევადი ფოლადის ღუმელგარე დამუშავება. საქართველოს ახალგაზრდა მეცნიერთა საზოგადოებრივი აკადემია. საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალი „ინტელექტუალი,, N#26 .გვ.254–259. თბილისი. 2014.
4. დოქტორანტი მალხაზ სირაძე. „კომპლექსური შენადნობის გამოყენებით ფოლადის განჟანგვა და დესულფურაცია,, სტუდენტთა 82-ე ღია საერთაშორისო კონფერენცია. თბილისი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. 2014.

Abstract

The present work is dedicated to the steel industry wastes out furnance processing technology in the use of complex alloys from the theoretical and practical basis for the development of steel metallurgy and their application prospects .

The work described in the following series of studies and works carried out in the metallurgical , chemical , mining - Enrichment and household waste identification, has been developed for complex alloy of acceptable rational blend composition, the study proposed blend thermal parameters. A complex alloy making laboratory and semi- industrial smelting, the study proposed a complex alloy key elements of the diffusion coefficients of liquid steel , alloy deoxidation studied the ability of complex, complex -alloy steel processing carried out on proposed thermodynamic calculations. We conducted laboratory and semi -industrial conditions deoxidation steel, alloying and modification experiments , whose results also confirmed the proposed complex alloy processed metal to reduce the number of non-metallic inclusions and established morphological composition of non-metallic inclusions .

Developed in the metallurgical, chemical, mining - Enrichment industry and domestic waste using a complex alloy steel making technology and complex liquid alloys using liquid steel technology and manufacturing process flowsheet.