

## МАГНИТНИ СВОЙСТВА НА ХРОМСЪДЪРЖАЩИ ЛАТЕРИТИ

Константинос Христос Гудуляс

Technological Education Institute  
Tei Kozani, Hellas

### РЕЗЮМЕ

Изследвани са магнитните свойства на хромсодържащи латерити от Филипините и находище Вуринос, Гърция. С лабораторен Франц-изодинамичен магнетизатор са изследвани магнитните свойства на съдържащите се в рудата основни минерали: хромит и лимонит. Използвани са диференциален термоанализ, при различна температура и различна магнитна индукция, както и инфрачервена микроскопия, при различна дължина на вълната. Спектроскопията на Мьосбауер е използвана за установяване съотношението на различните форми на желязото в минералите. Показана е различната магнитна проникваемост на съдържащите се в пробата минерали.

Констатираната разлика в магнитните свойства на хромсодържащите минерали и лимонита показват, че рудата може да се обогатява с магнитни сепаратори, с подходящо напрежение на магнитното поле, след селективно смилане, за механично разделяне на минералите.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Извършените до сега геоложки и минераложки проучвания показват, че намиращите се на Филипините латерити, поради големите им запаси, биха били от голямо значение за бъдещото добиване на хром (1-5). Обогатяването на този вид руда чрез обогатителни методи е затруднено, поради тяхната специфичност като суровина, поради сложния им минерален състав. Обогатимостта на латеритите зависи преди всичко от установяване на различията в химическите и физическите характеристики на намиращите се в тях минерали. Голямо значение има различието в магнитните им свойства.

До този момент няма много изследвания за магнитна сепарация на латеритен хром, тъй като трябва да бъде проучена зависимостта между магнитните свойства и строежа на минералите, съответно химичният им състав и поведението им в магнитно поле.

В настоящата работа са изложени резултатите от изследванията на магнитните свойства на съдържащите се в латеритите минерали, а получените резултати могат да се използват за магнитно обогатяване на рудата.

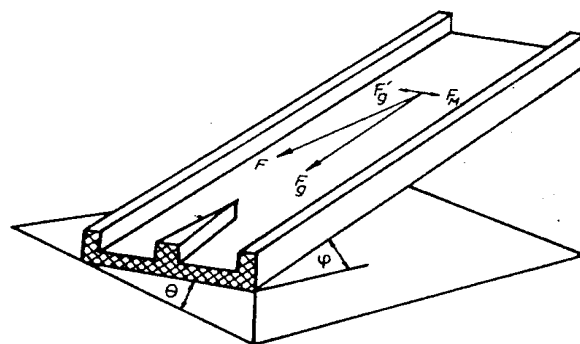
### МЕТОДИКИ И АПАРАТУРА

За изследване на магнитните свойства на рудата е използван лабораторен Франц-изодинамичен магнетизатор. Изучени са магнитната проникваемост на минералите, съдържащи се в рудата. Чрез диференциален термоанализ са анализирани лимонитови агрегати,

получени при различна магнитна индукция. Изучен е и тяхният инфрачервен спектър. Приложена е спектроскопия на Мьосбауер, за да се установи съотношението  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  в железните минерали

### Инсталация, използвана при опитите

Схема на използвания при опитите апарат е показан на фиг. 1. В случая се касае за лабораторен Франц-изодинамичен магнетизатор, при който магнитната индукция може да бъде определяна без нива до 2 тесла (Т). Той е използван за проучване на магнитните свойства на минералите. Разделянето се осъществява във вибриращ улей, на който дължината и напречното сечение са установени предварително. В сортирацията улей действат две сили: магнитната сила и силата на гравитацията. На фиг. 1 е представено схематично устройството на апарата.



Фигура 1. Представяне на силите, действащи в класификатора

Магнитната сила  $F_m$  за частичка с маса  $m$  и магнитна проницаемост  $\chi = k/Qq$  действа намаляващо по оста на улея и се изразява чрез следната формула:

$$F_m = \mu_0 \cdot \chi \cdot m \cdot H \cdot \text{grad } H, \quad [\text{N}], \quad (1)$$

където  $m$  - маса [kg];  $H$  – сила на полето [ $\text{A m}^{-1}$ ].

Същевременно действа и силата на триене  $F'g$  :  

$$F'g = m \cdot g \cdot \sin \theta, \quad [\text{N}] \quad (2)$$

където  $g$  – гравитационна константа,  $g = 9,81 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$ ;  $\theta$  - ъгъл на наклона на улея.

За равновесието на силите е в сила:

$$F_m = F'g$$

и 
$$\chi = g \sin \theta \frac{1}{H \text{Grad} H^2 \mu_0} \quad (3)$$

С помощта на тази формула е възможно да се определи магнитната проницаемост на минералните зърна. Напречният наклон е  $\theta = 15^\circ$ , а надлъжният -  $\varphi = 30^\circ$ . За опитите бе използвана суровина с едрина 100 – 200  $\mu\text{m}$ . Определянето на минералите, като магнитни става чрез микроскопски наблюдения.

#### Магнитни свойства на минералите

**Магнитна проницаемост на по-важните минерали**

Когато поставим една частица в магнитно поле, елементарните магнити във веществото веднага се намагнитват под действието на силите на външното поле. Едно външно магнитно поле действа на поставените в него вещества с различна сила  $H$  и пропорционално намагнитване  $M$ . Това намагнитване се дефинира, като индуциран магнитен момент на единица обем. Константата на пропорционалност се определя, като магнитна проницаемост, и участва в следната формула:

$$M = k \cdot \mu_0 \cdot H, \quad (4)$$

където  $\mu_0$  е индукционна константа ( $\mu_0 = \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ ).

Величината  $k$  може да се определи като параметър, характеризиращ магнитните свойства на веществата. За различните вещества тя зависи от силата на потока или от силата на полето. Изразява се със следната зависимост:

$$\mu_r = 1+k \quad (5)$$

Според големината на магнитната проницаемост веществата се делят на диамагнити, парамагнити и феромагнити. При сортиране в магнитно поле се използва разликата в проницаемостта.

Магнитната проницаемост на минералите трябва да бъде осреднена, за да може да повлияе решаващо на магнитната сила на полето. По тези резултати се определя

най-подходящата сила на магнитното поле за разделяне на хромита от жилните минерали.

#### РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗМЕРВАНИЯТА

На фиг. 2. е представена осреднената магнитна проницаемост на по-важните минерали. Проницаемостта на магнетита е в границите 1.280.000 до  $25.990 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ . Проницаемостта на частично намагнитизираните магнетити и частично мартитизираните зърна е в същите граници.

Докато игления железен гьотит и лепидокрита са главни съставни части на лимонита и съответно имат слабопарамагнитно поведение и малка проницаемост, лимонитовите агрегати от латеритни участъци се колебаят в големи граници и имат относително висока проницаемост. От това може да се направи заключението, че в силно намагнитизираните лимонитни агрегати има налични феромагнитни и феримагнитни вещества. Хематитът притежава сравнително висока магнитна проницаемост в сравнение с хромита. Срастналите с хематита хромитни зърна имат малко по-висока намагнитизираност, тяхното разделно поведение на класификатора е много сходно.

Минерал	Магнитна проницаемост $\chi$ [ $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$ ]			
	10 000	1000	100	10
Магнетит	25990			
Лимонит	6530			
Илменит	3220		1620	
Хематит	2980			104
Хромит	1740			93
Енстатит			106	38
Серпентин			102	26

Фигура 2. Обща магнитна проницаемост на по-важните минерали.

Илменитовите зърна имат магнитна проницаемост, колебаеща се в големи граници. Тя зависи от съдържанието на  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Силикатите с малко съдържание на желязо каквито са енстатита и серпентина имат по-малка проницаемост в сравнение с парамагнитните оксиди; съдържанието на желязо в тези проби е по-малко от 10 %.

Тъй като жилните минерали, каквито са гибсита и монтморилонита, имат по-малка проницаемост от другите минерали и те не създават проблеми в процеса на разделяне.

Магнитната проницаемост на сулфидни никелови минерали, рутил и варианти на кварц бяха много рядко разглеждани.

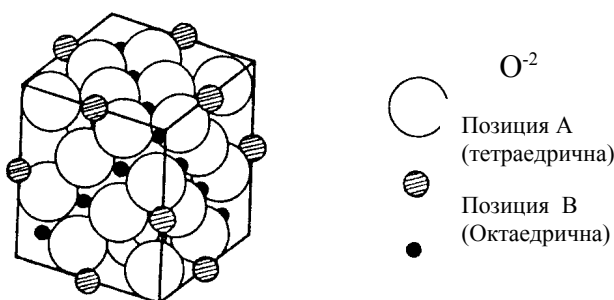
### Магнитни свойства на хромита

Смесеният кристал на хромита, подобно на магнетита принадлежи към групата на феримагнитните вещества. Такива феримагнитни минерали показват феромагнитно поведение чрез едно слабо спонтанно магнитизиране. Хромитът съдържа повече различни йони, които са или химически различни, или имат физически различни кристални решетки. Този вид решетка е представена в перспектива на фиг. 3. Шпинелната структура образува плътна кубическа форма от  $O^{2-}$  – йони, на чиито октаедрични и тетраедрични места има прилепнали катиони. Чрез кристализационната разлика различни метални йони разместват местата си, така че при хромита са възможни множество субституирани кристали.

В една елементарна клетка на хромита участват 32 кислородни и 24 метални атома. На един единичен възел се полагат 16 тривалентни метални йони, като  $Cr^{3+}$ ,  $Al^{3+}$  и  $Fe^{3+}$  на две различни места. 8 атома са тетраедрични тип А, а останалите 8 атома, като Fe, Mn и Mg са от тип В. Диполите на тези 16 тривалентни йони компенсират разпределението им в кристала. 8 двувалентни йона, каквито са  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  се намират на останалите места тип В и допринасят за магнитизирането на хромитните шпинели. Едно такова насочване на магнитният момент в твърдите вещества се определя, като антиферомагнетизъм.

Спонтанният момент на хромита сам може да се опише от двувалентните метални йони. Антипаралелно подредените метални атоми показват по правило парамагнитно поведение в магнитно поле.

Въз основа на тези теоретични наблюдения магнитните свойства на хромита се колебаят в зависимост от минералния строеж и химичния състав.



Фигура 3. Перспективна представа на шпинелна структура.

Микроскопското проучване показва, че хромитните зърна често пъти са срастнали с жилни минерали. Тъй като жилните минерали в повечето случаи имат високо съдържание на желязо, могат да окажат влияние върху магнитните свойства на хромитните зърна. Разпределението на масата на някои минерали при магнитизиране е в зависимост от магнитната индукция. Използваните латеритни и първични хромитни руди произлизат от еднакви находища. Техните концентрати от тежки минерали

бяха обогатявани чрез сортиране в класификатор. При разделянето в класификатора напречният наклон бе  $15^{\circ}$ , а надлъжният  $30^{\circ}$ . Табл. 1 показва, че наблюдаваните латеритни хромити са по-силно магнитизирани в сравнение с първичните руди. При магнитна индукция от 240 mT магнетизирането на латеритната руда е около 33,1 %, докато на първичните хромити е само 4,4 %. Първичната руда се разделя магнитно най-вече в границата 320 – 480 mT.

Различните магнитизирани участъци на латеритните хромити ( $\rho > 4,19 \text{ g/cm}^3$ ) бяха анализирани химично (табл. 2 и 3). Оказа се, че нарастващата магнитна индукция на FeO значително спада, докато съдържанията на  $Cr_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  и MgO се увеличават. При магнитна индукция 480 mT съдържаните желязо силикати се разделят, така че съдържанието на  $Cr_2O_3$  намалява.

Таблица 1. Магнитно разделен първичен и латеритен хромит, лимонитови агрегати и силикати в зависимост от магнитната индукция

100      100      100      100

От резултатите се установява, че латеритната маса на слабомагнитизирани хромити е срастнала със силно магнитизирани минерали, каквито са например магнетит и махимит и други непознати минерали, които не могат да

бъдат идентифицирани под микроскоп. За да се установи влиянието на химическия състав върху магнитните свойства на хромита бяха проведени химични опити с къси индукционни интервали от 15 mT. С увеличаващата се магнитна индукция намалява съдържанието на FeO като цяло, докато съдържанието на MgO се увеличава. При това съдържанието на оксиди като  $Cr_2O_3$  и  $Al_2O_3$  силно се колебае във всички класи. Това означава, че тези параматнитни компоненти на веществото само в малка степен допринасят за магнитния момент, така че тяхното влияние върху магнитизирането не е значително.

Известно е, че спонтанният магнитен момент на атомите е зависим от броя на електроните в 3 d и 4 f слоеве. Манганът, който може да има в d слоя 4 или 5 електрона може решително да допринесе за цялостното магнитизиране. Тъй като съдържанието на MnO е много малко във всички класи и се колебае между 0,06 и 0,1 %

магнитният момент на мангана не е от значение за цялостното магнитизиране на хромита. При желязото 4 електрона в d слоя са решаващи за магнитния момент. На цялостното магнитизиране не оказват влияние и елементи като титана.

#### **Магнитни свойства на лимонитовите агрегати**

Повечето минераложки проучвания на обогатяването на природен железен оксид, респ. железен хидрооксид, са направени с помощта на рентгенов анализ и диференциален термоанализ (ДТА). Те показват, че в рудата се съдържат почти всички досега познати кристалографски железноокисни и железнохидроокисни минерали. Срещат се дори оксиди без OH група ( $\alpha$  -  $Fe_2O_3$ ) хематит и магхемит ( $\gamma$  -  $Fe_2O_3$ ), както и оксиди, съдържащи OH група, каквито са гътит ( $\alpha$  -  $FeOOH$ ) и лепидокрит ( $\gamma$  -  $FeOOH$ ). Останалата част на оксидите е ренгеноаморфна.

Таблица 2. Тегловно разпределение и разпределение на метала за латеритна хромитна руда на магнитните продукти при различна магнетизираност ( $\rho > 4.1$ )

Таблица 3. Химичен състав на латеритния хромит за отделните магнитни продукти

Условията на образуване на рудата, като например климат, стойности на Eh и pH, първични скали са фактори, от които зависи вида на връзката в железните оксиди, респ. хидрооксиди. Главно съставените от железни хидрооксиди лимонитови агрегати в латеритната руда, каквито са показани на фиг. 2 доказват колебаеща се в големи граници магнитна проникваемост в магнитното поле. Това затруднява приложението на магнитизирането при обогатяването на хромит от латеритни почви.

В лимонитовите агрегати могат да бъдат открити различни метали. Първо бе анализиран химическият състав на различно магнитизираните лимонитни агрегати. Бяха определени съдържанията на Fe, Cr, Mn, Ni и Co, които влияят върху магнитизирането на агрегатите (табл. 4).

Не може да бъде доказано, че съществува връзка между магнитизирането и съдържанието на никел и кобалт, която би довела до феромагнитни свойства на веществата. Съдържанието на никел се колебае между 0,3 и 0,6 %, а съдържанието на кобалт - между 0,02 и 0,05 %.

Различното съдържание на хром и манган не оказва влияние върху общия магнитен момент. Съдържанието на хром се променя в границите между 0,8 и 1,2 %, а съдържанието на манган между 0,2 и 0,4 %.

Съществува зависимост между магнитизирането и съдържанието на желязо. С увеличаващата се магнитна индукция на разделяне съдържанието на желязо намалява от 57,4 на 39,2 %. Това доказва, че в силно магнитизираните лимонитови агрегати е възможно да се съдържат железни минерали. Такива са магнетита и магхимита. В силно магнитизираните агрегати, които са разделени при магнитна индукция варираща между 80-95 и 160-175 mT, магнетитът не може да се определи микроскопски.

Суровината бе проучена и за магхимит. Възникването на магнетизъм може да бъде вследствие на оксидация на магнити, нагриване на лепидокрити или други железни триоксиди, какъвто е гьотитът. Всички тези начини на възникване могат да бъдат наблюдавани в природата. Тъй като магхимитът показва екзотермична реакция при диференциалния термо анализ (ДТА), този минерал без проблеми може да бъде различен от останалите железни минерали.

Таблица 4 Химически състав на лимонитовите агрегати при различните магнитни продукти

Магн. индукция mT	Съдържание, %				
	Cr	Fe	Mn	Ni	Co
80-95	0.9	57.4	0.2	0.5	0.04
160-175	1.2	53.8	0.2	0.6	0.03
240-255	1.1	51.2	0.3	0.3	0.05
320-335	1.0	47.7	0.2	0.6	0.02
400-415	0.8	45.4	0.4	0.4	0.04

480-495	0.8	39.2	0.2	0.3	0.03
---------	-----	------	-----	-----	------

#### Диференциален термоанализ

Температура °C

*Фигура 4. Диференциален термоанализ на различните лимонитови агрегати, разделени при различна магнитна индукция.*

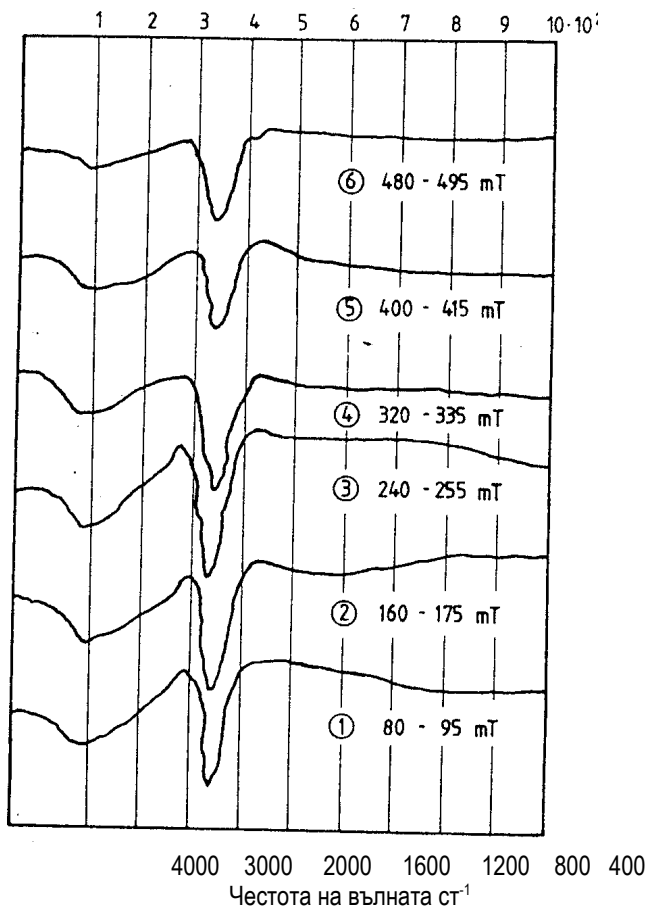
За това проучване бе използван химически анализиран материал. На фиг. 4 са показани кривите, получени при ДТА. Оказа се, че в нискотемпературната област възникват два различни ендотермични пика – при 90°C и 340°C. Първият показва отделянето на абсорбционна вода, а вторият - образуването на кристална вода и образуването на хидроксилни групи в гьотита, както и тяхното превръщане в хематит. Според Гайт екзотермичната реакция на магхимита протича при степен на кристализация между 350 и 600°C. Очакваната екзотермична реакция не се показва в тази температурна област. Тази реакция не бе установена и в по-високи температурни интервали.

За по-нататъшно проучване минералите бе приложена инфрачервена спектроскопия. При това бе използван същият материал, който бе използван и за ДТА. Във всяка една от показаните криви може да бъде намерена инфрачервена абсорбция на гьотит и лепидокрит (фиг. 5). Характерният брой на вълните на гьотита – около 904 и 803 cm<sup>-1</sup> е точно определена във всяка проба. При дължина на вълната около 1028 cm<sup>-1</sup> съществува слаба инфрачервена абсорбция, която е типична за лепидокрита. В спектрите не могат да се разпознаят характерните линии на инфрачервена абсорбция на магнетита и магхимита. Особеност на кривите 3-5 са малко острите върхове между 3700 и 3400 cm<sup>-1</sup>. При честота на вълната 1600 cm<sup>-1</sup> абсорбцията не може да бъде определена еднозначно, тъй като в тази област се абсорбират различни хидроксидни минерали.

Фигура 5. Инфрачервен спектър на различните лимонитови агрегати, разделени при различна магнитна индукция.

От резултатите, получени при ДТА и инфрачервения анализ се оказва, че лимонитовите агрегати са съставени главно от гьотит.

В крайна сметка бе приложена спектроскопия на Мьосбауер, за да се установи съотношението  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  в железните минерали. При изменение на скоростта на  $\gamma$ -източника всяка проба показва различно изометрично отклонение и различна адсорбция на лъчението. Шест линейния спектър, който е необходим за оценка на съотношението  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  не може да бъде наблюдаван и по този начин този спектроскопски метод в случая не е подходящ за определяне на минералите.



#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Извършените изследвания на магнитните свойства на хромсъдържащи латерити, чрез използване на съвременни и ефективни методики показва, че съществува различие в магнитните свойства на хромита и другият основен минерал – лимонита.

При подходяща магнитна индукция, 320 – 480 mT би могло да се получи добро разделяне на двата минерала. Отделеният хромитов продукт достига над 40 % съдържание на  $Cr_2O_3$ , при съдържание на  $FeO$  около 17 %. Тези резултати могат да служат като база за изследвания, целящи получаването на хромитов концентрат.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Friedrich, G. Unveroffentl. Bericht Aachen (1979)  
 Friedrich, G. Erzmetall 33(1980), S. 414/420 u. a.  
 Schellman, W. Bulletin du BGRM Sect. III, (1981)  
 Friedrich G. Tagungsbericht Bd. I Athen, S. 257/277 u. a. (1981)  
 Hovorka, D., Savvidis, S., 1997. Serpentinities in the Ophiolite complexes of the Vourinos and Kamvounia Mts. (Northern Greece), Geologica Carpathica, 48, 18-26.

*Препоръчана за публикуване от  
катедра "Минерални технологии" на МТФ*



# MAGNETIC PROPERTIES OF CHROMIUM-CONTAINING LATERITES

Konstantinos Hristos Gudulas

Tecnological Education Institute  
Tei Kozani, Hellas

## ABSTRACT

Magnetic properties of chromium-containing laterites from the Philippines and Vourinos deposit, Greece, were investigated. Magnetic properties of the main minerals in the ore, chromite and limonite, were investigated by means of laboratory Franz – isodynamic magnetizer. Differential thermoanalysis at different temperatures and magnetic induction was used, as well as infrared spectroscopy at different wavelengths. Moessbauer spectroscopy was used for determination the ratio of different iron forms in the minerals. The different magnetic permeability of the different minerals in the sample is shown.

The established difference in the magnetic properties of chromium-containing minerals and limonite shows that the ore can be processed by magnetic separators for mechanical separation of the minerals; in suitable magnetic field strength, after selective grinding.

## INTRODUCTION

Geological and mineralogical investigations implemented so far have shown that Philippine's laterites, due to their large reserves would be of great importance for the future chromium production (1-5). However, the processing of this kind of ore by mineral processing methods is complicated due to their peculiarities and complex mineral composition. Laterite processability depends mainly on the establishment of the differences in physical and chemical characteristics of the constituted minerals. The difference in the magnetic properties has a great significance.

So far, there are not many investigations on magnetic separation of laterite chromium, because it should be studied the dependence between the magnetic properties and the structure of the minerals; respectively their chemical composition and their behavior in magnetic field

The present study shows the results from the investigations of the magnetic properties of laterite minerals. These results could be useful in magnetic processing of the ore.

## METHODS AND EQUIPMENT

To investigate the magnetic properties of the ore a laboratory Franz-isodynamic magnetizer was used. Magnetic permeability of the ore minerals was investigated. The limonite aggregates, obtained at different magnetic induction, were analyzed by means of differential thermoanalysis. Their infrared spectrum was studied too. Moessbauer spectroscopy was applied for the estimation of  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  ratio in iron minerals

### Equipment used in the experiments

Fig.1 shows the equipment used. This is a laboratory Franz-isodynamic-magnetizer, in which the magnetic induction can be determined without levels up to 2 tesla (T). It is used for an investigation of the magnetic properties of the minerals. The separation is performed in a vibrating channel which the length and cross-section have been established preliminary.

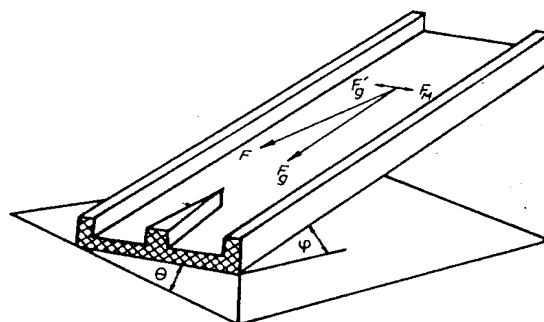


Figure 1. Presentation of the forces acting in the classifier

Two forces act in the sorting channel: magnetic force and gravitational force. The magnetic force  $F_m$  for a particle with a mass  $m$  and magnetic permeability  $\chi = \kappa/Qq$  acts decreasingly upon the axis of the channel. It can be expressed by the formula:

$$F_m = \mu_0 \cdot \chi \cdot m \cdot H \cdot \text{grad } H, \quad [N], \quad (1)$$

Where  $m$  is the mass [kg];  $H$  is the field strength,  $[A \cdot m^{-1}]$ .

Simultaneously acts the friction force  $F'g$ :

$$F'g = m \cdot g \cdot \sin \theta, \quad [N] \quad (2)$$

Where  $g$  is gravitational constant,  $g = 9,81 [m \cdot s^{-2}]$ ;  $\theta$  - is the angle of the slope of the channel.

In the case of equilibrium of the forces it is fulfilled:

$$F_m = F'g$$

$$\text{and } \chi = g \sin \theta \frac{1}{H \text{Grad } H^2 \mu_0} \quad (3)$$

By this formula one can determine magnetic permeability of the mineral grains. Transverse slope  $\theta = 15^\circ$ , while longitudinal  $\varphi = 30^\circ$ . The initial size of the raw materials was 100 – 200

µm. The determination of the materials as magnetic ones was made by microscopic observations.

**Magnetic properties of the minerals**

**Magnetic permeability of the most important minerals**

If we place a particle in a magnetic field, the elementary magnets in the substance get magnetized due to the action of the external magnetic field. External magnetic field acts upon the substances placed in it with different force H and proportional magnetization M.

This magnetization can be defined as induced magnetic moment per unit volume. Proportionality constant is determined as magnetic permeability and participates in the formula:

$$M = \kappa \cdot \mu_0 \cdot H, \tag{4}$$

where  $\mu_0$  is induction constant ( $\mu_0 = \pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am).

The quantity k can be defined as a parameter characterizing the magnetic properties of the substances. For different substances it depends on the flux density or the field strength. It can be expressed in terms of:

$$\mu_r = 1 + \kappa \tag{5}$$

Depending on the value of the magnetic permeability the substances can be classified as diamagnetic, paramagnetic and ferromagnetic. It is the difference in the permeability which is used in the process of sorting in magnetic field.

The magnetic permeability of the minerals should be averaged in order to influence crucially the magnetic force of the field. The most suitable magnetic field force for separation of chromite from the vein minerals can be determined on the basis of these results.

**MEASUREMENT RESULTS**

Fig. 2 displays average magnetic permeability of the major minerals. Magnetite permeability varies within 1.280.000 до 25.990.10<sup>-9</sup> м<sup>3</sup>/kg. The permeability of partially magnetized magnetites and partially martitized grains is within the same limits.

While needle-shaped ferric goetite and lepidocrite are the main constituents of limonite, showing thus weak paramagnetic behavior and low permeability, the limonite aggregates from laterite areas vary widely and possess relatively high permeability. It can be concluded thereby, that, there are ferromagnetic and ferrimagnetic substances in strongly magnetized limonite aggregates. Hematite possesses relatively high magnetic permeability in comparison to chromite. Accreted to hematite chromite grains have slightly higher magnetization and their separation behavior during classification is very alike.

Ilmenite	3220	1620
Chematite	2980	104
Chromite	1740	93
Enstatite		106 38
Serpentine		102 26

Figure 2. Total magnetic permeability of major minerals

Magnetic permeability of ilmenite grains varies widely. It depends on the content of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

The silicates with less iron content such as enstatite and serpentine have lower permeability compared to paramagnetic oxides; iron content in these samples is less than 10 %.

Because vein minerals, such as gypsum and montmorillonite, possess lower permeability than the other minerals, they also do not initiate problems in the process of separation.

Magnetic permeability of sulphidic nickel-base minerals, rutile and forms of quartz have been very rarely reviewed.

**Magnetic properties of chromite**

Chromite mingled crystal, like magnetite, is categorized as ferrimagnetic substance.

Ferromagnetic behavior of such ferrimagnetic minerals is exhibited by weak spontaneous magnetization. Chromite contains in larger extent different ions, which are either chemically different or have physically different crystal lattices. Such kind of lattice is presented on fig. 3. The spinel structure forms a dense cubic cell of O<sup>2-</sup> ions in whose octahedric and tetrahedric sites adhere cations. Different metallic ions interchange their places due to crystallization difference, so chromite allows the existence of many substituted crystals.

Thirty two oxygen and 24 metallic atoms participate in one elementary chromite cell. For one single junction it is allowed 16 trivalent ions, as Cr<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup> and Fe<sup>3+</sup> in two different places. Eight atoms are tetrahedric of type A, and the remaining eight atoms, such as Fe, Mn and Mg are of type B. The dipoles of these 16 trivalent ions compensate their distribution in the crystal. Eight divalent ions, such as Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> occupy the remaining sites of B type and they contribute for the magnetization of chromite spinels. Such orientation of magnetic moment in solids is determined as antiferromagnetism.

The spontaneous magnetic moment of chromite can be described by its own from the divalent metallic ions. As a rule, metallic atoms ordered in antiparallel way exhibit paramagnetic behavior in magnetic field.

Based on these theoretical observations, magnetic properties of chromite vary depending on the mineral structure and the chemical composition.

Mineral	Magnetic permeability $\chi$ [ 10 <sup>-9</sup> m <sup>3</sup> /kg]			
	10 000	1000	100	10
Magnetite	25990	'	'	
Limonite	6530			74

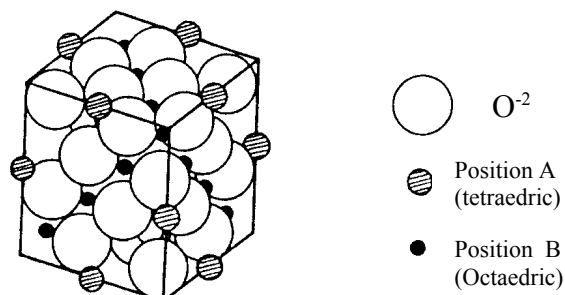


Figure 3. Perspective drawing of spinel structure

Microscopic study shows that chromite grains are frequently accreted with vein minerals. Because the vein mineral in most of the cases have high iron content, they can influence the magnetic properties of chromite grains. Mass distribution of some minerals in magnetization depends on the magnetic induction. As-used laterite and primary chromite ores originate from alike deposits. Their heavy mineral concentrates were processed by sorting in classifier. During the separation, the cross slope of the classifier was 15° and longitudinal slope 30°. Table 1 shows that the observed laterite chromites are more strongly magnetized in comparison to the primary ores. In magnetic induction of 240 mT the magnetization of the laterite ore is around 33.11 %, while the magnetization of the primary chromites is only 4.4 %. The primary ore is magnetically separated mainly in the 329-480 mT limit.

Table 1. Magnetically separated rudimentary and laterite chromite, limonite aggregates and silicates, depending on magnetic induction

Magnetic induction, mT	Primary chromite	Weight part, %		
		Laterite chromite	Limonite aggregates	Silicates
80	0.2	13.5	2.5	--
80-160	0.6	12.4	17.6	--
160-240	3.6	7.2	29.3	--
240-320	5.4	19.6	33.7	--
320-400	59.8	40.1	15.6	--
400-480	29.1	6.7	1.2	0.2
480	1.3	0.5	0.1	99.8
	100	100	100	100

The different magnetized areas of the laterite chromites ( $\rho > 4,19 \text{ g/cm}^3$ ) were analyzed chemically (table 2 and 3). It was found that the increasing magnetic induction of FeO decreases significantly, while the contents of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and MgO increase. In magnetic induction of 480 mT, iron-containing silicates separate, thus  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  content decrease.

It is found from the results that the laterite mass of weakly magnetized chromites has accreted to strongly magnetized minerals, such as magnetite, maghemite and other unknown minerals, which could not be identified by means of microscope. In order to determine the influence of the chemical composition upon magnetic properties of chromite, chemical experiments with short induction intervals of 15 mT were conducted. In increasing magnetic induction FeO content decreases in general, while MgO content increases. Furthermore, oxide content, such as  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , varies widely in all classes. This means that these paramagnetic

components of the substance contribute in a low degree to the magnetic moment, therefore, their influence upon magnetization is not significant.

It is known that the spontaneous atomic magnetic moment depends on the number of electrons in 3d and 4f layers. Manganese which might have 4 or 5 electrons in its d layer could contribute crucially for the overall magnetization. Since MnO content is very low in all classes, varying between 0.06 and 0.1 %, manganese magnetic moment is irrelevant to the overall magnetization of chromite. Four electrons in d layer in iron are crucial for the magnetic moment. Elements like titanium do not influence the overall magnetization.

#### Magnetic properties of the limonite aggregates

Most of the mineralogical studies upon mineral processing of natural iron oxide, respectively iron hydroxide have been made by means of x-ray diffraction analysis, and differential thermoanalysis (DTA). They show, that the ore contains almost all, so far known crystallographic, iron oxide-base and iron hydroxide-base minerals. There are even oxides without OH-group ( $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), hematite, and maghemite ( $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) as well as oxides which contain OH-group, such as goetite ( $\alpha$ - $\text{FeOOH}$ ) and lepidocrite ( $\gamma$ - $\text{FeOOH}$ ). The remaining part of the oxides is x-ray amorphous.

The conditions of ore formation, such as climate, Eh and Ph values, primary rocks, are factors, on which depend the type of bond in iron oxides, respectively hydroxides. The limonite aggregates shown on fig. 2, consisting mainly of iron hydroxides, exhibit widely varying magnetic permeability in magnetic field. This hinders the application of magnetization in mineral processing of chromite from laterite soils.

Different metals could be found in the limonite aggregates. At first, it was analyzed the chemical composition of limonite aggregates, magnetized in a different degree. The contents of Fe, Cr, Mn, Ni and Co, which influence the magnetization of the aggregates were measured (table 4).

It could not be proved, that there is a connection between the magnetization, and Ni and Co content which would lead to ferromagnetic properties of the substances. Ni content varies between 0.3 and 0.6 %, while Co content between 0.02 and 0.05 %.

The different content of chromium and manganese does not affect the overall magnetic moment. Cr content varies between 0.8 and 1.2%, while Mn content between 0.2 and 0.4 %.

There is dependence between magnetization and iron content. In increasing magnetic induction of separation, iron content decreases from 57.4 to 39.2 %. This shows possible presence of iron minerals (magnetite, maghemite) in strongly magnetized limonite aggregates. In strongly magnetized aggregates, separated in magnetic induction varying between 80-95 and 160-175 mT, magnetite could not be identified by means of microscope.

Table 2. Weight distribution and distribution of the metal for laterite chromite ore of the magnetic products in

different magnetization ( $\rho > 4.1$ )

Table 3. Chemical composition of laterite chromite for specific magnetic products

Table 4 Chemical composition of the limonite aggregates in different magnetic products

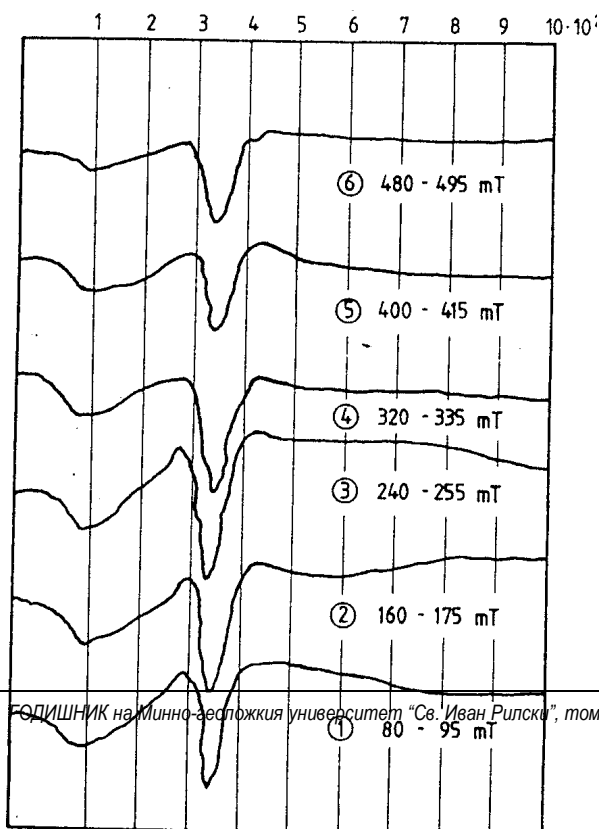
The raw material was investigated for maghemite also. The creation of magnetism can be attributed to oxidation of magnets, heating of lepidocrites or other iron trioxides, such as goetite. All these ways of creation could be observed in the nature. Since maghemite shows exothermic reaction in differential thermoanalysis (DTA), this mineral can be easily distinguished from the other iron minerals.

#### Differential thermoanalysis

Temperature, °C

Figure 4. Differential thermoanalysis of different limonite aggregates, separated at different magnetic induction

Chemically analyzed material was used for this study. Fig. 4 shows DTA curves. It was found that two different endothermic peaks occur in the low temperature region – at 90° C and at 340° C. The first one expresses the release of absorption water, while the second one – the formation of crystalline water and OH-groups in goetite, as well as their transformation to hematite. According to Geit, the exothermic reaction of maghemite occurs in degree of crystallization between 350 and 600° C. The expected exothermic reaction was not found in this temperature interval. This reaction was not observed in higher temperature intervals too.



Infrared spectroscopy was applied to study further the minerals (fig 5). For that purpose, the same material which has been used for DTA, was used. In each of the curves, shown in Fig. 5, one can find infrared absorption of goetite and lepidocrite (fig. 5). The characteristic wave number of goetite – around 904 and 803  $\text{cm}^{-1}$  is measured precisely in each sample. At around 1028  $\text{cm}^{-1}$  wavelength, there is weak infrared absorption, typical for lepidocrite. The characteristic lines of infrared absorption of magnetite and maghemite can not be traced in these spectra. Peculiarity of curves 3-5 are the slightly sharp peaks between 3700 and 3400  $\text{cm}^{-1}$ . In wave frequency 1600  $\text{cm}^{-1}$  the absorption could not be unambiguously determined, because different hydroxide minerals are absorbed in this region.

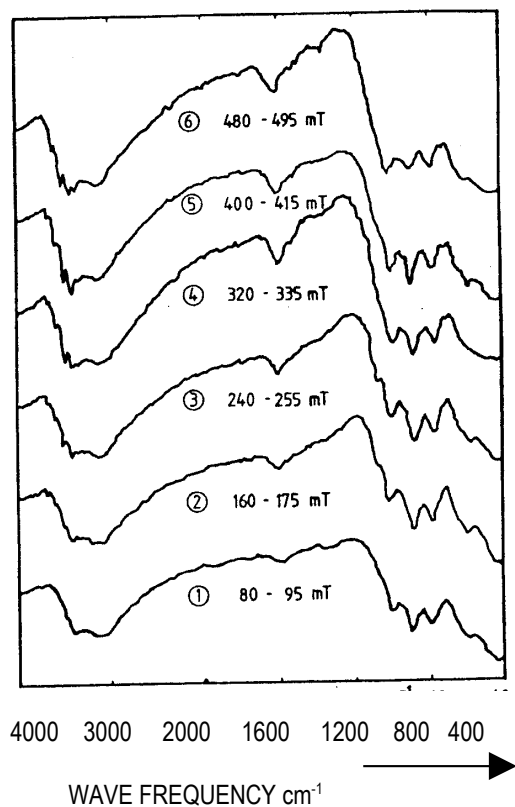


Figure 5. Infrared spectra of different limonite aggregates, separated in different magnetic induction

The results of DTA and infrared analysis show, that the limonite aggregates consists mainly of goetite.

Finally a Moessbauer spectroscopy was applied, to measure  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  ratio in the iron minerals. In changing the  $\gamma$ -source speed, each sample showed different isometric deviation and different radiation adsorption. The six lines spectrum, necessary for estimation of  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  ratio could not be observed, meaning that this spectroscopy method is not suitable for determination of minerals in this case.

## CONCLUSIONS

The present studies of magnetic properties of chromium-containing laterites, incorporating modern and effective methods, show that there is a difference in magnetic properties of chromite and the other basic mineral – limonite.

In suitable magnetic induction, within 320-480 mT, a good separation of these two minerals could be achieved.

The chromite product obtained reaches over 40 %  $Cr_2O_3$  content, at  $FeO$  content around 17 %. These results could be a base for future research aimed at obtaining a chromite concentrate.

REFERENCES

Friedrich, G. Unveroffentl. Bericht Aachen (1979)  
Friedrich, G. Erzmetall 33(1980), S. 414/420 u. a.  
Schellman, W. Bulletin du BGRM Sect. III, (1981)

Friedrich G. Tagungsbericht Bd. I Athen, S. 257/277 u. a.  
(1981)  
Hovorka, D., Savvidis, S., 1997. Serpentinites in the Ophiolite complexes of the Vourinos and Kamvounia Mts. (Northern Greece), Geologica Carpathica, 48, 18-26.

*Recommended for publication by Department  
of Mineral Processing, Faculty of Mining Technology*