



ОСОБЕНОСТИ ПРИ ИНДУКЦИОННО НАГРЯВАНЕ НА МЕТАЛИ В ЦИЛИНДРИЧЕН ИНДУКТОР

CHARACTERISTICS BY INDUCTION HEATING OF METALS IN CYLINDRICAL INDUCTOR

Иван Н.Митев*

кат. "Мениджмънт" ТУ - Габрово

Статията е постъпила на 20 септември 2013 г.; приета за отпечатване на 10 октомври 2013 г.

Abstract

In this paper presents the main technological characteristics on heating pure metals in a cylindrical inductors. Definitely permeability in solid and liquid state of Ni; Zn; Mn; Al u Fe. Was calculated penetration depth of electromagnetic waves when heated the study metals. Are presented graphically for the depth of penetration into addition the frequency of electromagnetic waves.

Keywords: permeability; electromagnetic waves; penetration; frequency; induction heating.

ВЪВЕДЕНИЕ

В основата на работата с индукционни тигелни пещи е застъпен принципа за трансформирано предаване на индукционната енергия от първичната верига на вторичната. Във всички случаи подаваната към първичната верига енергия от променлив ток се превръща в електромагнитна, която във втората верига се превръща отново в електрическа, а в следствие и в топлинна [1].

В индукционните пещи без метална сърцевина за първична намотка служи индуктор, по който протича променлив ток. Вторичната намотка се явява самият разтопен метал, който е поставен в тигел, поместен във вътрешността на индуктора. Магнитният поток в този тип индукционни пещи в една или друга степен протича по самата шихта. За това при работа с такова оборудване от съществено значение са магнитните свойства, а също така размера и формата на съответната шихта. В случаите, когато в качеството на шихта се използват феромагнитни материали, то до момента, когато тяхната температура не е достигнала точката на Кюри, тяхната магнитна проникваемост запазва своите стойности. В този случай шихтата играе ролята не само на втора намотка, но и на липсващата метална сърцевина. Следователно при топене в пещи на феромагнитни материали загряването на шихтата до точката на Кюри, произтича не само за сметка на отделената топлина в резултат циркулацията в нея на вихровите токове, но и за сметка на загубите на пренамагнитване, които в този период се наблюдават в шихтата [4,5].

След точката на Кюри феромагнитните тела загубват своите феромагнитни свойства и работата на индукционните пещи става аналогична на тази на въздушния трансформатор – трансформатор без сърцевина.

В следствие закона за електромагнитната индукция електродвижеща сила се определя от израза [6];

$$e = \alpha \cdot \Phi \cdot f \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

където: α – коефициент на формата на кривата, по която се изменя променливият ток, предизвикващ появата и изменението на магнитното поле.

Следователно може да се твърди, че стойностите на електродвижещата сила за индукцията са пропорционални на:

- ✓ честотата на изменение на магнитния поток по време;
- ✓ стойността на самия магнитен поток – броя на силовите линии, свързани с навивките на индуктора [2,3].

Трябва да се има предвид, че при отсъствието на стоманена сърцевина проводимостта на магнитните силови линии значително се понижава, приближавайки се до проводимостта на въздуха. Следователно броя на силовите линии зацепени в този случай с навивките на индуктора ще бъде безкрайно малко, т.е. стойностите на коефициента на взаимна индукция – M в системата индуктор – товар, при отсъствието на стомана ще бъде много малко.

Това обстоятелство налага необходимостта за увеличаване честотата f , така че да се компенсира намаляването на стойностите на M . Следователно топлината, отделена от вихровите токове, които се намират и циркулират в мрежата, зависи от честотата на променливото магнитно поле.

При промишлена честота 50Hz, даже при индукция от няколко хиляди галуси – при голям диаметър на товара, концентрацията на енергия отделена от вихровите токове, е незначителна и не превишава няколко W/cm^2 . При това положение, за осигуряване ефективната работа на индукционни тигелни пещи е необходимо последните да бъдат захранвани с токове с повишена, а в някои случаи с висока честота. Това може да се постигне посредством генератори, които образуват токове с необходимата честота [2,3].

* Тел.: 066827426; e-mail: imitev@tugab.bg

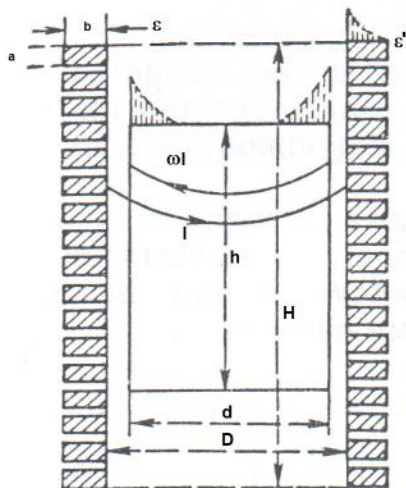
От казаното следва, че посредством теоретични и експериментални изследвания честотата на захранващия ток в индукционните тигелни пещи може да бъде повишавана или намалявана в зависимост от диаметъра на товара – вместимостта на пещта и отделеното съпротивление на разтопения метал. В частност тези опити позволяват да се направят следните заключения, които значително да опростят пресмятането на проникването в индукционните тигелни пещи:

- ✓ Всяка вместимост на пещта и съпротивлението на шихтата изискват своя оптимална честота на захранващия ток. При честота по-ниска от оптималната коефициента на полезно действие силно се понижава, а при по-висока от оптималната почти не се изменя;
- ✓ С увеличаване вместимостта на пещта честотата на тока може съответно да се понижи;
- ✓ За получаване на удовлетворително КПД на пещите, може да бъде използвана значително по-ниска честота.

Следствие анализа на отбелязаните по-горе фактори – диаметър на товара и съпротивление на шихтата, които влияят на честотата на захранващия ток, е получено уравнение, което дава минималното значение за честотата при зададен диаметър на товара и вида метал:

$$f_{\min} \geq 25 \cdot 10^8 \cdot \rho_2 / d^2 \quad (2)$$

където: $f_{\min}$ – минимална честота на тока - Hz;
 d – диаметър на товара – cm;
 ρ_2 – съпротивление на разтопения материал - Ω / cm^2 .



Фиг. 1. Принципна схема на индукционна пещ без метална сърцевина

Токът с повишена честота, преминаващ през индуктора на пещта обезпечава необходимата за товара електродвижеща сила на индукция, която в равнини, успоредни на равнините на намотките, предизвикват вихрови токове - I , фиг. 1.

В резултат на повърхностният ефект тези въведени в товара токове достигат максимални стойности по външната повърхност и значително намаляват от края към сърцевината на товара. Това намаляване плътността на тока от повърхността към сърцевината се осъществява по сложни закони.

Първоначално пресмятането им се е осъществявало по формулата [1,6]:

$$\delta_x = \delta_e \cdot e^{-x/\epsilon} \quad (3)$$

където: ϵ – разстояние от повърхността на проводника по направление към центъра, при която плътността на тока се намалява – $e = 2,71$ пъти в сравнение плътността на тока по повърхността.

Това разстояние се нарича условно дълбочина на проникване на тока и се определя по формула 4. [1]

$$\epsilon^2 = (1 / 4 \cdot \pi^2) \cdot (\rho / f \cdot \mu) \quad (4)$$

където: μ – относителна магнитна проницаемост.

Трябва да се отбележи, че това понятие дълбочина на проникването ϵ , е справедливо само за полуограничителни тела, а не за цилиндри. Под полуограничителни тела се разбират тези, при които е налице външният контур, а центърът им е отдалечен в безкрайността. За товари с формата на цилиндър намаляването на плътността зависи още и от аргумента.

$$A^2 = 2 \cdot r_0^2 / \epsilon^2 \quad (5)$$

При цилиндрични тела със значително голям радиус, при които е в сила условието $A \geq 10$, е доказано, че плътността на тока пада по същият закон, както при полуограничени тела.

Формула (4) е в сила в случаите, когато ρ се изразява в теоретични единици. Ако плътността се изразява в дименсия Ω / cm^2 равенство (4) добива вида [6]:

$$\epsilon^2 = 5030^2 \cdot (\rho / f \cdot \mu) \quad (6)$$

Тези формули показват, че дълбочината на проникване или дебелината на повърхностния слой, в която основно циркулират вихровите токове при топене в индукционни тигелни пещи, е право пропорционална на плътността на материала и обратно пропорционална на честотата и относителната магнитна проницаемост.

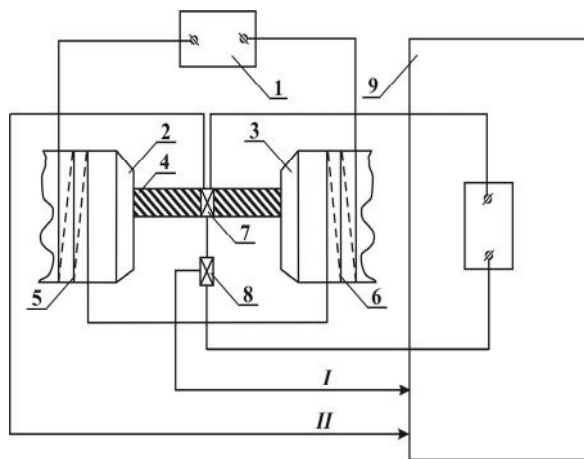
От казаното следва, че топенето на метали в индукционни тигелни пещи е сложен електрофизичен процес. За оптимизирането му се налага да се конкретизират някои от технологичните му характеристики като магнитната проницаемост, специфичното електросъпротивление и дълбочината на проникване. Това се явява и цел на настоящото изследване.

ИЗЛОЖЕНИЕ

От разгледаните теоретични въпроси се вижда, че за ефективната работа на индукционните тигелни пещи от съществено значение се явяват стойностите на магнитните характеристики на подлежащия за разтопяване метал.

В настоящото изследване се цели да се определят стойностите на магнитната проницаемост за някои чисти метали, което в последствие да ни позволи да пресметнем и дълбочината на проникване в материала при топенето му в индукционни тигелни пещи.

За определяне на магнитната проницаемост е използвана опитната установка (фиг. 2), състояща се от измервателно устройство и устройство за обработване на данните.



Фиг. 2. Принципна схема на установката за определяне на магнитната проницаемост
1 – захранване; 2, 3 – концентратори;
4 – образец; 5, 6 – бобини; 7, 8 – датчици;
9 – устройство за обработване на сигналите.

На изследване са подлагани образци, които се намират както в твърдо, така и в течно състояние.

Изследвана е магнитната проницаемост на мед, алуминий, цинк, никел, манган и желязо. Проведени са по пет последователни измервания, като в табл. 1 са представени осреднените стойности.

Експериментални резултати Таблица 1

Състояние на метала	Магнитната проницаемост, μ_{cp}					
	Cu	Al	Zn	Ni	Mn	Fe
1	2	3	4	5	6	7
твърдо	1,021	1,042	1,102	1,021	1,112	16,14
течно	0,997	0,992	1,060	0,993	1,004	1,025

От проведените изследвания и получените резултати се налага извода, че магнитната проницаемост на изследваните материали няма съществена разлика при изследваните цветни метали. Във всички случаи на измерването й - в твърдо и течно състояние, се наблюдават стойности, които клонят към единица или са малко над тази стойност.

Прави впечатление обаче, че относителната магнитна проницаемост в твърдо състояние за железните образци е приблизително с 15÷16 пъти по-голяма в сравнение с тази в течно състояние. Това се обяснява с факта, че до точката на Кюри желязото е магнитно и притежава голяма магнитна проницаемост. След точката на Кюри – 768°C, то губи магнитните си свойства и магнитната му проницаемост пада рязко и започва да клони към единица, подобно на другите изследвани немагнитни материали.

При всички изследвани материали измерените стойности за магнитната проницаемост в течно състояние са по-малки в сравнение със стойностите им в твърдо състояние. За разлика от желязото обаче тези разлики са пренебрежимо малки и не оказват съществено влияние при пресмятането на дълбочината на проникване в индукционни тигелни пещи.

По аналогичен начин е определена и другата основна технологична характеристика - специфичното електросъпротивление, а получените резултати са представени в табл. 2

Експериментални резултати Таблица 2

Състояние на метала	Специфично електросъпротивление $\rho_{cp}, \cdot 10^{-6} \Omega/\text{cm}^2$					
	Cu	Al	Zn	Ni	Mn	Fe
1	2	3	4	5	6	7
твърдо	0,018	0,0263	0,053	11,021	0,003	0,0182
течно	2,260	0,2881	33,47	108,99	0,060	1,0250

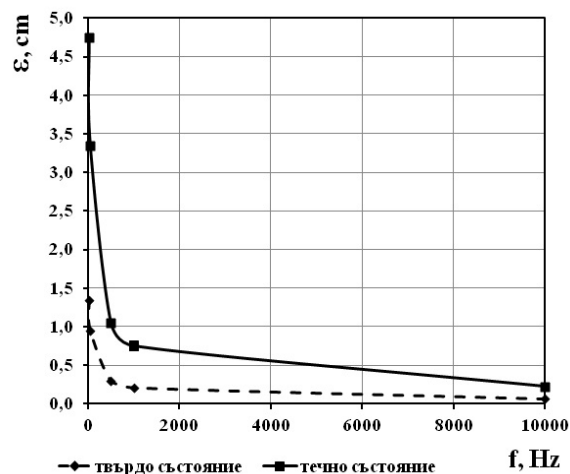
Базирайки се на получените експериментални резултати е пресметната дълбочината на проникване при индукционно нагряване на чисти метали в цилиндричен индуктор. Пресмятанията са извършени за най-често използваните в промишлеността честоти – 25÷10 000Hz.

Резултатите от пресмятанията са представени в табл. 3, а графичната им интерпретация - на фиг. 3÷8.

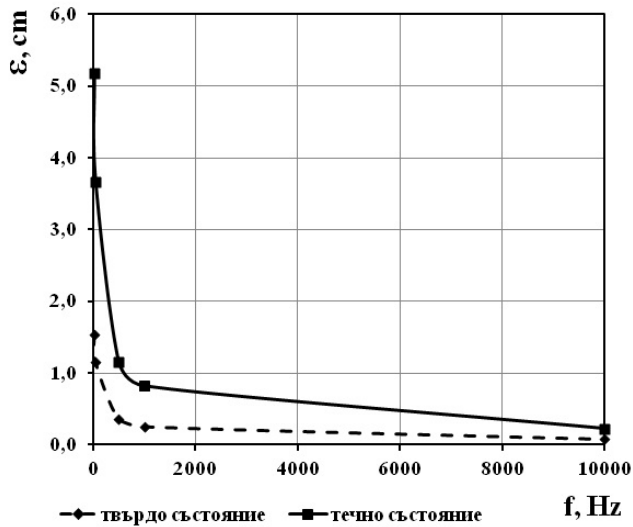
Експериментални резултати Таблица 3

Честота, F, Hz	Дълбочина на проникване, ϵ, cm					
	Cu	Al	Zn	Ni	Mn	Fe
1	2	3	4	5	6	7
25	1,349	1,531	2,327	3,300	0,251	0,252
	4,751	5,186	5,820	10,520	7,792	2,845
50	0,954	1,154	1,645	2,340	0,123	0,178
	3,352	3,665	4,115	7,430	5,510	2,012
500	0,302	0,365	0,520	0,729	0,038	0,056
	1,055	1,158	1,301	2,350	1,724	0,636
1 000	0,213	0,258	0,368	0,503	0,027	0,039
	0,750	0,820	0,920	1,660	1,232	0,450
10 000	0,067	0,082	0,116	0,160	0,009	0,012
	0,225	0,225	0,291	0,503	0,386	0,142

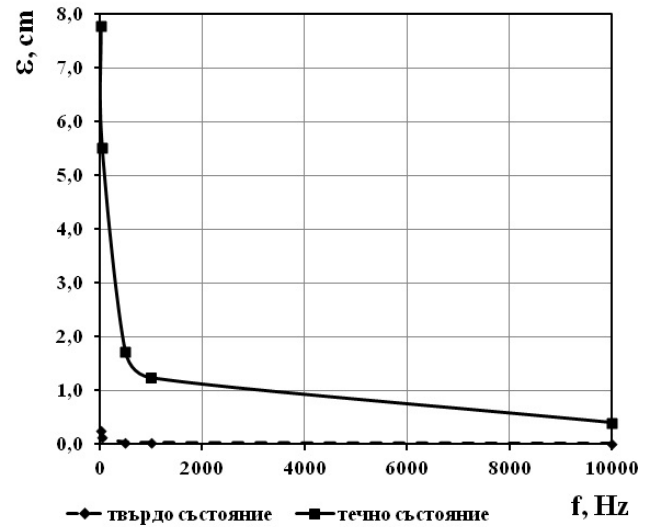
Забележка: Стойностите над черта са за твърдо състояние на метала, а тези под черта за течно състояние.



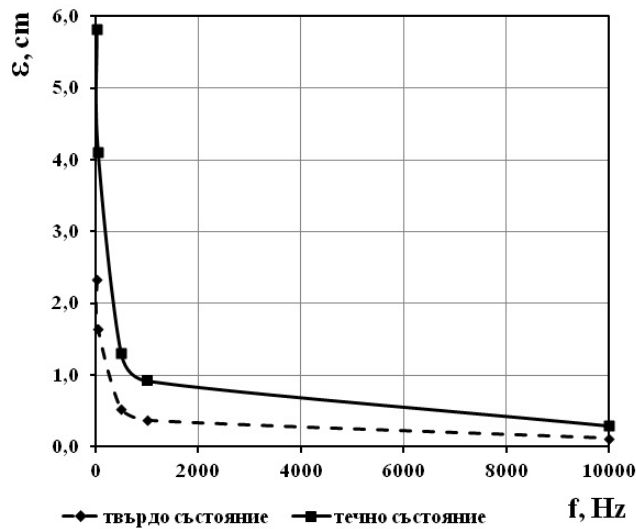
Фиг. 3. Изменение на проникването в зависимост от честотата при нагряване на мед



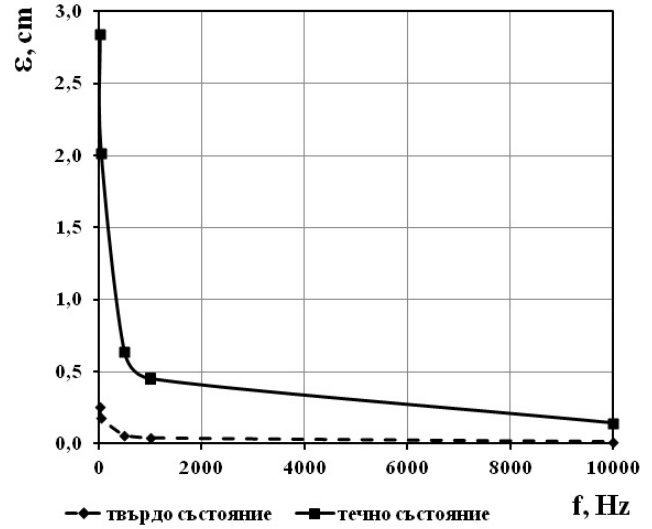
Фиг. 4. Изменение на проникването в зависимост от честотата при нагряване на алуминий



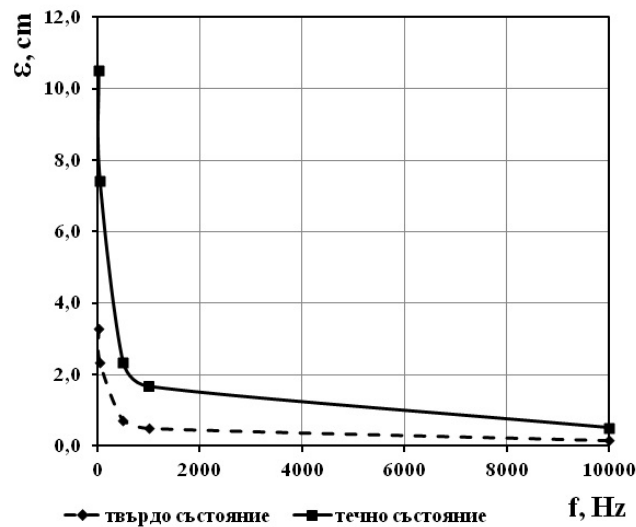
Фиг. 7. Изменение на проникването в зависимост от честотата при нагряване на манган



Фиг. 5. Изменение на проникването в зависимост от честотата при нагряване на цинк



Фиг. 8. Изменение на проникването в зависимост от честотата при нагряване на желязо



Фиг. 6. Изменение на проникването в зависимост от честотата при нагряване на никел

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Проектирано и изработено е устройство за измерване магнитната проницаемост на материалите.
- Определена е магнитната проницаемост на следните материали – мед, алуминий, никел, цинк, манган и желязо, както в твърдо, така и в течно състояние.
 - ✓ Във всички случаи при измерването на магнитната проницаемост на цветните метали - в твърдо и течно състояние, се регистрират стойности, които клонят към единица или са малко над тази стойност.
 - ✓ Относителната магнитна проницаемост в твърдо състояние за железните образци е приблизително с 15÷16 пъти по-голяма в сравнение с тази в течно състояние. Това се обяснява с факта, че до точката на Кюри желязото е магнитно и притежава голяма магнитна проницаемост. След точката на Кюри то губи магнитните си свойства и магнитната му про-

нищаемост пада рязко и започва да клони към единица, подобно на другите изследвани немагнитни материали.

- Изследвани са стойностите на специфичното електросъпротивление и са представени таблични зависимости за стойностите му, както за твърдо, така и при течно състояние на изследваните метали.

- Базирайки се на получените резултати, за магнитната проникваемост и специфичното електросъпротивление са пресметнати стойностите за дълбочината на проникването на електромагнитните вълни в изследваните метали и са разработени графични зависимости за дълбочината на проникване във функция от честотата на захранващите устройства.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Динев П., Електротехнология, София, Технически университет, 2000, с.420.
- [2] Митев, И., И.Винев, Оптимизиране на индукционният нагрев чрез импулсно обработване – част I, Международна научна конференция „Унитех, 10”, Габрово, 2010, том II, с.206÷209, ISSN 1313-230X
- [3] Митев, И., И.Винев, Оптимизиране на индукционният нагрев чрез импулсно обработване – част II, Международна научна конференция „Унитех, 10”, Габрово, 2010, том II, с.210÷214, ISSN 1313-230X
- [4] Палатника Л. и др., Структура и физически свойства твърдого тела, Киев, Выща школа, 1983, с. 254.
- [5] Славов Р., М.Манолов, В. Атанасова. Наръчник по цветни метали и сплави, София, Техника, 1996, с.453.
- [6] Слуходски А., Применение токов высокой частоты в электротермии, Ленинград, Машиностроение, 1983, с.277.