

## Новые магнитно-текстурованные сплавы с линейной зависимостью индукции от поля

Канд. физ.-мат. наук А. И. ЗУСМАН

ЦНИИЧермет им. И. П. Бардина

В последнее время для изготовления магнитных сердечников с минимальными нелинейными искажениями получил широкое распространение сплав 47НК [Л. 1 и 2]. Характерные свойства этого сплава: высокая степень постоянства проницаемости в диапазоне индукций от 0 до 1—1,2 тл при уровне проницаемости 1 000—1 200 и низкая остаточная индукция, — формируются в результате термомагнитной обработки (ТМО) в поперечном магнитном поле. В связи с потребностью в уменьшении веса и габаритов магнитных сердечников была выдвинута задача разработать сплавы со свойствами, подобными свойствам сплава 47НК, но отличающиеся более высоким уровнем проницаемости.

В настоящей статье приводятся свойства новых сплавов подобного типа 47НКХ и 64Н, разработанных в последние годы в Институте прецизионных сплавов ЦНИИЧермета.

**Основные магнитные свойства сплавов 47НКХ и 64Н.** Сплав 47НКХ получен на основе тройного железо-никель-кобальтового сплава 47НК путем легирования последнего Cr (2%). Цель легирования — повышение проницаемости и удельного электросопротивления. Сплав 64Н относится к бинарной железо-никелевой системе и содержит 64% Ni. Помимо основных компонентов сплавы содержат до 0,5% Mn и 0,3% Si. Они производятся в виде холоднокатаной ленты толщиной от 0,1 до 0,01 мм. Сплавы являются магнитно-текстурованными и приобретают свои специфические свойства в результате ТМО в поперечном поле; методика проведения обработки описана в [Л. 3].

На рис. 1 приведены кривые зависимости индукции и проницаемости от напряженности магнитного поля для сплавов 47НК, 47НКХ и 64Н, взятых в состоянии после обработки в поперечном поле по оптимальному режиму. Для всех сплавов вплоть до 70—75% индукции насыщения зависимости  $B(H)$  близки к прямым линиям. По уровню проницаемости сплавы 47НКХ и 64Н превосходят 47НК соответственно в 1,5 и 2 раза. Сплавы имеют узкие, пологие петли гистерезиса с малым значением остаточной индукции, как правило, меньше 5% индукции насыщения.

В начальной области полей, граница которой составляет 0,1—0,15 а/см, зависимость проницаемости от напряженности поля подчиняется соотношению Рэлея:

$$\mu = \mu_0(1 + \alpha_H H).$$

В этой области наименьшие нелинейные искажения, мерой которых является коэффициент амплитудной нестабильности

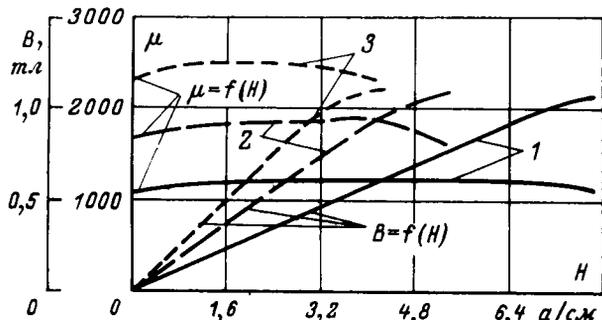


Рис. 1. Зависимости индукции и проницаемости от напряженности магнитного поля для сплавов 47НК, 47НКХ и 64Н. 1 — 47НК; 2 — 47НКХ; 3 — 64Н.

проницаемости  $\alpha_H$ , имеет сплав 47НК, однако для всех трех сплавов величина коэффициента  $\alpha_H$  существенно меньше по сравнению с другими известными ферромагнетиками, имеющими тот же уровень проницаемости [Л. 4].

На рис. 2—5 приведены некоторые зависимости, характеризующие свойства сплавов в динамическом режиме намагничивания. Для сплавов 47НКХ и 64Н значения граничных частот, выше которых наблюдается спад проницаемости, оказываются несколько более низкими, чем для сплава 47НК. Тем не менее при толщине ленты 0,01—0,02 мм сплавы 47НКХ и 64Н вплоть до частот 100—150 кгц имеют проницаемость примерно в 1,5 раза большую, чем 47НК (рис. 2).

Важной характеристикой линейных ферромагнитных сердечников, обычно применяемой при расчетах, является зависимость  $tg \delta$  от поля и частоты. В области Рэлея эта зависимость подчиняется известному соотношению Иордана [Л. 5]:

$$tg \delta = \delta_r H + \delta_{в.т} f + \delta_{ц},$$

где  $\delta_r$ ,  $\delta_{в.т}$ ,  $\delta_{ц}$  — коэффициенты потерь от гистерезиса, вихревых токов и последствия (величины этих коэффициентов приведены в таблице).

В полях, выходящих за пределы области Рэлея,  $tg \delta$  возрастает с полем медленнее, чем это следует из приведенного соотношения. В широком диапазоне индукций от 0 до 0,8—1,0 тл значения  $tg \delta$  сплавов 47НКХ и 64Н невелики, хотя

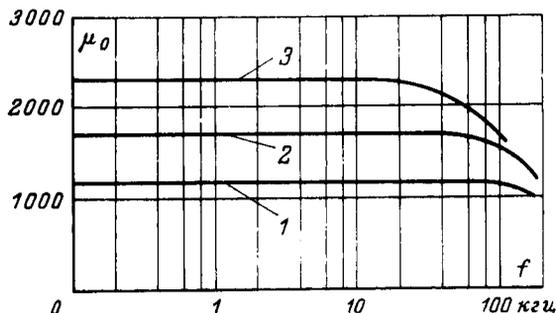


Рис. 2. Зависимость начальной проницаемости от частоты перематывания для сердечников из сплавов 47НК (1), 47НКХ (2) и 64Н (3), изготовленных из ленты толщиной 0,02 мм.

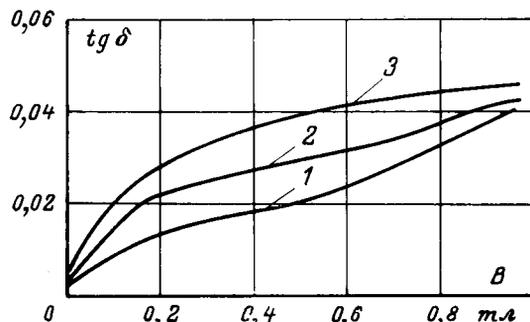


Рис. 3. Зависимость  $tg \delta$  от индукции при частоте перематывания 1 кгц для сердечников сплавов 47НК (1), 47НКХ (2) и 64Н (3), изготовленных из ленты толщиной 0,02 мм.

и превышают соответствующие значения для сплава 47НК (рис. 3); удельные потери сплавов 47НКХ и 64Н также невелики, при высоких индукциях они несколько меньше по сравнению со сплавом 47НК (рис. 4).

Для многих применений требуется, чтобы динамическая проницаемость сердечников относительно мало менялась и сохраняла высокое значение при подмагничивании постоянным током. Из трех сплавов наименьшие изменения обратимой проницаемости при подмагничивании наблюдаются для сплава 47НК, что связано с его лучшей линейностью в слабых полях. Абсолютная величина обратимой проницаемости сплавов 47НК и 64Н в широком интервале полей от 0 до 3,5–4 а/см сохраняется более высокой по сравнению со сплавом 47НКХ (рис. 5).

Вследствие малой величины остаточной индукции сплавы 47НКХ и 64Н магнитно стабильны, их свойства слабо зависят от условий размагничивания и мало меняются в результате воздействия сильных магнитных полей. Магнитные свойства сплавов относительно слабо зависят от температуры. В климатическом интервале от  $-60$  до  $+60^\circ\text{C}$  величина среднего температурного коэффициента начальной проницаемости  $\beta_0 = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta\mu_0}{\Delta T}$  составляет  $2 \cdot 10^{-4}$  1/град для сплава 47НКХ и  $4,5 \cdot 10^{-4}$  1/град для сплава 64Н. С усилением поля величина температурного коэффициента еще более уменьшается и при 3–3,5 а/см (область  $\mu_{\text{max}}$ ) составляет для сплавов 47НКХ и 64Н соответственно  $0,8 \cdot 10^{-4}$  и  $3 \cdot 10^{-4}$  1/град.

Сопоставление свойств сплавов 47НК, 47НКХ и 64Н. Сплавы 47НК, 47НКХ и 64Н образуют группу магнитно-текстурованных линейных ферромагнетиков и не имеют аналогов среди других ферромагнитных материалов. По своим свойствам эти сплавы ближе всего приближаются к магнитодиэлектрикам, отличаясь от последних значительно более высоким уровнем проницаемости.

Магнитные свойства сердечников из сплавов 47НК, 47НКХ, 64Н, изготовленных из лент толщиной 0,02 и 0,01 мм, и магнитодиэлектрика ТЧ-180

Характеристика	Марка сплава			
	47НК	47НКХ	64Н	ТЧ-180
$\mu_0$	1 000—1 200	1 500—1 800	2 000—2 500	160—200
$\mu_{\text{max}}/\mu_0$	1,05—1,10	1,10—1,15	1,02—1,10	1,4
$B_r/B_m$	0,02—0,05	0,02—0,05	0,02—0,05	
$H_c, \text{ а/см}$	<0,4	<0,25	<0,15	
$H_{\mu_{\text{max}}}, \text{ а/см}$	4—6,5	2,5—3,5	1—3,5	
$\alpha_n, \text{ см/а}$	0,04—0,05	0,1—0,2	0,1—0,2	0,035
$\delta_r \cdot 10^3, \text{ см/а}$	20—25	35—75	35—75	<15
$\delta_v \cdot \tau \cdot 10^6, \text{ сек.}$				
при толщине:				
0,02 мм	1,1—1,5	0,8—1,2	1,8—2,5	1,4
0,01 мм	0,4—0,5	0,4—0,6	0,5—1,0	
$\delta_n \cdot 10^3$	<0,5	<0,5	<1	<2
$\beta_0 \cdot 10^4, \text{ 1/град}$	5	2	4,5	4
$\rho, \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$	0,2	0,48	0,2	
$\theta, ^\circ\text{C}$	700	600	600	

Примечание. Характеристики сплавов приведены на основании измерения большого числа сердечников различных плавок, характеристики магнитодиэлектрика ТЧ-180 взяты из [Л. 5].

В таблице приведены основные магнитные свойства сплавов 47НК, 47НКХ и 64Н в сопоставлении со свойствами магнитодиэлектрика ТЧ-180 [Л. 5]. Характерными особенностями указанной группы сплавов являются высокий уровень прони-

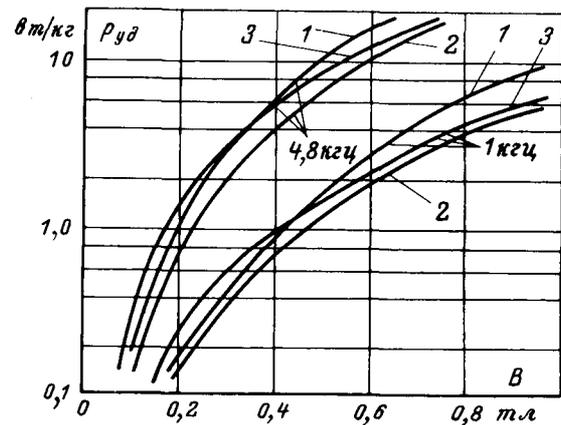


Рис. 4. Зависимость удельных потерь от индукции для сердечников из сплавов 47НК (1), 47НКХ (2) и 64Н (3), изготовленных из ленты толщиной 0,02 мм.

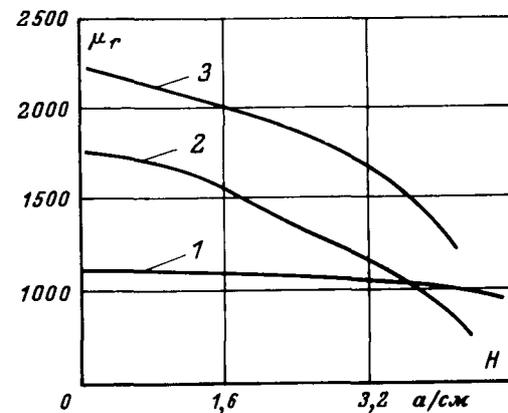


Рис. 5. Зависимость обратимой проницаемости при частоте перемагничивания 1 кГц от напряженности подмагничивающего поля сердечников сплавов 47НК (1), 47НКХ (2) и 64Н (3).

цаемости, высокие характеристики линейности кривой намагничивания вплоть до индукций порядка 1–1,2 тл, высокая стабильность по отношению к воздействию температуры и магнитного поля. Основные особенности отдельных сплавов следующие:

**Сплав 47НК** — из указанной группы сплавов имеет наилучшие характеристики линейности в области слабых полей (коэффициенты  $\alpha_n$  и  $\delta_r$ ) и наиболее широкую область полей, в которой сохраняется линейная зависимость индукции от поля (от 0 до 7–8 а/см). В сравнении с магнитодиэлектриком ТЧ-180 сплав 47НК имеет в 5–7 раз более высокую проницаемость при близких значениях коэффициентов  $\alpha_n$ ,  $\delta_r$ ,  $\delta_n$  и  $\beta$ . Сплав рекомендуется применять в схемах, где основным требованием является высокая степень линейности как в слабых, так и в сильных полях, в том числе в схемах с подмагничиванием.

**Сплав 47НКХ** — из указанной группы сплавов имеет наилучшую температурную стабильность. По уровню проницаемости он примерно в 1,5 раза превосходит сплав 47НК, однако характеристики линейности в слабых полях  $\alpha_n$  и  $\delta_r$  у сплава 47НКХ ниже. Сплав рекомендуется для изготовления линейных сердечников, от которых требуется сочетание высокого уровня проницаемости в полях до 3,5–4 а/см с высокой температурной стабильностью.

**Сплав 64Н** — имеет наивысший уровень проницаемости при близких к сплаву 47НКХ характеристиках линейности в слабых полях. Сплав предназначен для изготовления линейных сердечников с возможно более высоким уровнем проницаемости, работающих в полях до 3–3,5 а/см, в том числе в схемах с подмагничиванием.

Верхняя граница частот, в пределах которых сплавы могут работать, сохраняя свои специфические свойства, зависит от