

## АМОΡФНЫЕ СПЛАВЫ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В БЛОКАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РАСЦЕПИТЕЛЕЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Павленко Т.П., к.т.н, доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", каф. "Электрические машины"  
тел. (057) 707-66-01.

*У роботі розглянуті питання основних властивостей і можливості застосування аморфних сплавів в різних областях техніки. Враховуючи особливості нового магнітотяжкого матеріалу, з'явилася необхідність їх використання в магнітопроводах елементів конструкцій низьковольтних електричних апаратів. а саме, як показали дослідження, в блоках напівпровідникових розчіплювачів автоматичних вимикачів серії ВА.*

*В работе рассмотрены вопросы основных свойств и возможности применения аморфных сплавов в различных областях техники. Учитывая особенности нового магнитотяжкого материала, появилась необходимость их использования в магнітопроводах элементов конструкции низьковольтных электрических аппаратов. а именно, как показали исследования, в блоках полупроводниковых расцепителей автоматических выключателей серии ВА.*

### ВВЕДЕНИЕ

Современный научно-технический прогресс немалым без создания и применения принципиально новых материалов. К таким материалам следует отнести новый класс магнитомягких сплавов для магнітопроводов, не имеющих кристаллического строения – металлических стекол или аморфных сплавов. Их получают различными методами, в основе которых лежит сверхбыстрый переход компонентов сплавов из жидкого состояния в твердое. Промышленное применение получил самый распространенный способ прокатки расплава в быстро вращающихся валках с получением ленты толщиной 0,01-0,100 мм.

Наибольшее распространение получили сплавы на основе металлов переходной группы (Fe; Ni; Co) с металлоидами (B; Si; C), которые понижают температуру плавления и обеспечивают более легкое достижение температуры стеклования при охлаждении.

Известно [1], что физические и химические свойства материала определяются его электронной структурой. Отсутствие дальнего порядка, а следовательно, и периодичности в расположении атомов в аморфных сплавах приводят к особенностям их электронной структуры и, соответственно, физико-химических свойств.

Заметим, что электронная структура зависит также от количества и вида аморфизирующих металлоидов.

Аморфные сплавы обладают высокой прочностью и твердостью (до 1000 HV). В то же время большинство ленточных образцов аморфных сплавов можно согнуть и разогнуть не опасаясь их разрушения, однако степень деформации при испытании на растяжение очень мала, т.к. образец претерпевает сильно локализованную сдвиговую деформацию. За меру пластичности аморфных сплавов принимают остаточный угол загиба после изгиба образца на 180°. Испытания свидетельствуют о том, что аморфные сплавы достаточно пластичны.

Считалось, что структура аморфных тел изотропна, поскольку отсутствует кристаллографическая анизотропия. Однако изучение свойств аморфных сплавов показало, что они обладают магнитной анизотропией.

Магнитная анизотропия аморфных сплавов связана с макроскопической анизотропией структуры, которая возникает при получении аморфных сплавов

всеми способами непосредственно перед стеклованием, когда вязкость резко возрастает, вызывая сдвиговые напряжения и деформации. При этом пары атомов или их группы располагаются в соответствии с направлением деформации из-за различий в силах химического взаимодействия и размерах. Анизотропия наводится также внутренними напряжениями, образующимися при стекловании.

Анизотропия структуры аморфных сплавов и остаточных напряжений определяют магнитную анизотропию, формирующую доменную структуру, от которой и зависят магнитные свойства аморфных сплавов (как и от стабилизации доменов на границах дефектов атомной структуры или дефектах, связанных с технологией получения). В частности от соотношения различных доменов зависят максимальная магнитная проницаемость  $\mu_{\max}$ , индукция насыщения  $B_s$ , коэрцитивная сила  $H_c$ , начальная магнитная проницаемость  $\mu_n$ .

Величину магнитной анизотропии можно существенно снизить или изменить путем термической (отжиг), термомагнитной или термической с наложением механических напряжений обработок.

В целом в аморфных сплавах достигаются весьма высокие для магнитомягких материалов характеристики:

- высокие значения магнитной проницаемости ( $\mu_n$  – до 8000;  $\mu_{\max}$  до 300000-700000);
- низкая коэрцитивная сила ( $H_c$  менее 8 А/м);
- достаточная магнитоотрицательная насыщения, регулируемая в широком диапазоне значений;
- высокое удельное сопротивление ( $\rho = 1-1,5 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2$ );
- низкий коэффициент температурной зависимости и малые потери на гистерезис и вихревые токи (в 3-5 раз ниже лучших кристаллических сплавов).

По данным аморфные сплавы обладают и повышенной коррозионной стойкостью, высоким сопротивлением адгезионному износу.

Однако аморфные сплавы имеют ряд существенных недостатков, затрудняющих их использование и делающих не совсем перспективными их применение. К основным недостаткам можно отнести:

- крайняя хрупкость после термообработки (при несоблюдении режима);
- высокая твердость, затрудняющая резку;
- малая толщина ленты (до 50 мкм), что делает практически невозможной шихтовку;
- большая неравномерность толщины ленты по сече-

нию, что значительно уменьшает эффективное сечение элементов магнитных систем; - большая чувствительность к напряжениям, что крайне нежелательно в случае применения аморфного сплава как магнитомягкого материала.

К этому можно отнести и отсутствие сведений о сохранении свойств аморфных сплавов при длительной (порядка 10-20 лет эксплуатации) в условиях достаточной высоких температур (равных или более 100 °С).

Благодаря своим уникальным электромагнитным свойствам и несмотря на недостатки аморфные сплавы могут и уже находят применение в различных областях техники.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рекомендуется использовать аморфные сплавы в источниках питания для устройств силовой электроники, в дросселях и трансформаторах повышенной частоты [2]. Наряду с экономией материала, сердечник из аморфного сплава позволяет снизить число витков и внутреннюю емкость. Это особенно важно для помехоподавляющих дросселей, где требуются максимальная индукция при минимальных габаритах.

В США считают перспективным применение аморфных сплавов на основе железа в трансформаторах взамен традиционно используемой кремнистой стали. Сравнительные данные и анализ потерь энергии при трансформации  $100 \cdot 10^9$  кВт/ч за год показывают преимущества аморфных сплавов (табл. 1).

Таблица 1  
Сравнительные данные магнитопроводов из кремнистой стали и аморфного сплава (*Fe-B-Si*) трансформаторов мощностью 30 кВА

Наименование характеристик	Сравнительные данные магнитопроводов	
	шихтованный	из аморфного сплава
Потери в сердечнике	90 Вт	30 Вт
Коэффициент заполнения	0,97	0,78-0,8
Ширина ленты	95 мм	10-20 мм
Температура при непрерывной эксплуатации	250 °С	125 °С
Магнитная индукция насыщения	2,03 Тл	1,6 Тл
Электросопротивление	45 мкОм·см	125 -130 мкОм·см

В трансформаторах с частотой 400 Гц, в основном используемых в бортовой аппаратуре и военной технике, низкий уровень потерь, свойственный аморфным сплавам, можно использовать для уменьшения их материалоемкости. Более чем пятикратное превосходство аморфных сплавов над железокремнистой сталью по уровню потерь при частоте 400 Гц и индукции 1,0 Тл, очевидно позволяет в трансформаторах с сердечниками из аморфных существенно повысить уровень потерь в медных обмотках без превышения максимально допустимой температуры. В результате объем обмотки может уменьшиться за счет использования более тонкой проволоки, что позволяет снизить массогабаритные параметры трансформатора.

Измерение мощности в тороидальных сердечниках (90x50x25), изготовленных из аморфного сплава и железокремнистой стали (толщиной 0,3 мм) при ограничении максимальной температуры 75 К над температурой окружающей среды 40 °С, показало, что эта мощность при использовании аморфного сплава на 60% выше.

В свете изложенного, были проведены исследования

целью которых являлось – определение возможности применения аморфных сплавов в узлах магнитных систем низковольтных электрических аппаратов.

В данной статье показана возможность применения аморфных сплавов в трансформаторах тока по схеме с импульсным стабилизатором напряжения, применяемой в полупроводниковых расцепителях автоматических выключателей серии ВА. Трансформаторы тока выполняют функцию датчиков тока и источников питания полупроводниковых релейных органов и импульсного питания отключающего электромагнита автоматического выключателя. Специфика работы трансформатора тока в такой схеме заключается в том, что перемагничивание его магнитопровода в зоне малых токов производится по смещенной частной петле гистерезиса, что обусловлено несимметрией нагрузки трансформатора по полупериодам тока и, приводит в конечном счете, к погрешностям измерения тока первичной обмотки и к появлению существенных погрешностей установок защитного отключения. Наиболее сильно указанный эффект проявляется в блоках защиты полупроводниковых расцепителей на 400 Гц, где перемагничивание сердечника трансформатора осуществляется по частной петле гистерезиса с заходом в область насыщения. В этом случае прибегают к установке в цепь вторичной обмотки трансформатора дополнительных балластных резисторов, что приводит к увеличению рассеиваемой мощности. Существенно уменьшить погрешности измерения тока первичной обмотки может только применение магнитопровода из материала с узкой петлей гистерезиса и малыми потерями на перемагничивание.

В данном случае испытывались образцы трансформаторов тока (ТТ) на номинальный ток 160 А, номинальный вторичный ток 1600 А, с сечением магнитопровода 1 см<sup>2</sup> (для автоматических выключателей серии ВА 50). Испытания трансформаторов проводились от стендов-имитаторов сигналов частоты 50 и 400 Гц, генерирующих относительно небольшие токи (20 А). Поэтому трансформаторы выполняли с многовитковой первичной обмоткой – с количеством витков 160, что позволило снизить приведенный номинальный первичный ток ТТ до 1 А.

Тороидальные магнитопроводы для ТТ наматывались лентой шириной 10 мм, толщиной 0,025 мм без нанесения изоляционного покрытия на алюминиевые каркасы с использованием намоточного станка модели ОГА фирмы "Микафил" с натяжными устройствами ME-485 той же фирмы при усилии натяжения ленты 3-4 кг. Сечение магнитопровода – 1 см<sup>2</sup>; коэффициент заполнения (с учетом неравномерности толщины ленты по длине и местных неровностей – 0,79-0,84.

Термомагнитная обработка выполнялась в камерной печи при температуре 400 °С, с нагревом 10-12 мин и выдержкой – 4 мин, быстрым охлаждением на воздухе без снятия магнитного поля. Ток в намагничивающую обмотку подавался от источника постоянного тока Б5-21; сила тока – 6 А, напряженность магнитного поля – 1200-2500 А/м.

Продольное (по длине ленты) магнитное поле создавалось обмоткой (38 витков) термостойкого медного провода ПСКД-25, намотанного на контейнер (каркас с крышкой), при пропускании постоянного тока 6-9,5 А от источника В5-21.

После отжига магнитопроводы изолировались от стенок контейнера шайбами из электрокартона марки ЭВ толщиной 5 мм. Снаружи контейнер изолировался лакотканью ЛИМ-105-010 в полнахлеста.

Первичная обмотка наматывалась из провода

ПЭВ-2 диаметром 0,2 мм, вторичная – проводом ПЭТВЛ-АМ диаметром 0,64 мм.

При исследовании ТТ нагружали на схему, состоящую из накопительных конденсаторов и ключевого стабилизатора напряжения (рис. 1).

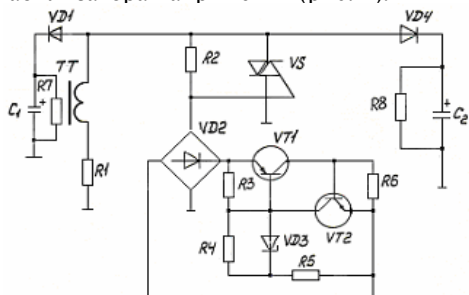


Рис. 1. Электрическая схема стабилизатора напряжений

Такая схема стабилизатора применяется в устройствах защиты серии БПР 11 для автоматических выключателей ВА 50.

В ходе испытаний исследовалась зависимость минимального значения величины первичного тока, при которой обеспечивается включение ключевого стабилизатора напряжения (транзисторы VT1, VT2, тиристор VS). При включении этих элементов обеспечивается замыкание вторичной обмотки ТТ на измерительный резистор R1.

Напряжение, выделяемое на резисторе R1, пропорционально первичному току I и используется для запуска релейных органов защиты.

В процессе испытаний определялась также зависимость дополнительной погрешности ТТ, обусловленной наличием стабилизатора напряжения. Эта погрешность  $\delta$  определялась как отношение сигналов на измерительном резисторе при работе стабилизатора и при его закорачивании, когда ТТ работает только на измерительный резистор R1. Результаты исследований приведены в табл. 2-3.

В табл. 2. приведены значения тока включения ( $I_{вкл}$ ) стабилизатора напряжения при частоте тока 50 Гц в зависимости от величины тока нагрузки  $I_n$ , отбираемой от накопительных конденсаторов с резисторами R7 и R8 для испытуемого ТТ на основе аморфного сплава. Здесь же приведены аналогичные данные для ТТ с шихтованным магнитопроводом.

В табл. 3 приведены данные погрешностей для ТТ с магнитопроводом из аморфного сплава и шихтованного магнитопровода при различных значениях токов нагрузки. Испытания проводились при напряжении стабилизации на накопительных конденсаторах C1, C2 при напряжении сети  $U_c = 40$  В, которое устанавливалось соответствующим выбором величины резисторов R4 и R5.

Таблица 2

Зависимость тока включения стабилизатора напряжения от тока нагрузки при частоте первичного тока 50 Гц

Магнитопровод ТТ	Номинальный ток, $I_n$ , мА						
	Ток включения, А	4	5	7	10	15	20
АС 7421	$I_{вкл}$	17	20	30	39	51	67
ТТ с шихтованным магнитопроводом	$I_{вкл}$	21	25	31	40	50	67

Из приведенных данных видно, что значение токов включения ключевого стабилизатора у обеих схем для больших токов нагрузки близки, поскольку ток

включения в основном определяется величиной тока нагрузки и слабо зависит от характеристик магнитопровода. При малых токах нагрузки ток включения у ТТ на основе аморфного сплава меньше, что объясняется влиянием тока намагничивания ТТ, который у ТТ из аморфного сплава меньше, чем у ТТ с шихтованным магнитопроводом.

Таблица 3

Погрешности ТТ при различной нагрузке

Магнитопровод из аморфного сплава 7421							
$I, A$	25	30	40	50	60	80	$I_n=5$ мА
$\delta, \%$	1,2	<1	<1	<1	<1	<1	
$I, A$	40	50	60	70	80	100	$I_n=10$ мА
$\delta, \%$	1,4	1	<1	<1	<1	<1	
$I, A$	50	60	70	80	90	100	$I_n=15$ мА
$\delta, \%$	1,6	1,3	1	<1	<1	<1	
$I, A$	25	30	40	50	60	80	$I_n=60$ мА
$\delta, \%$	3,0	3,0	2,7	2,5	2,0	1,8	
Магнитопровод из стали 3421 (шихтованный)							
$I, A$	40	50	60	70	80	100	$I_n=10$ мА
$\delta, \%$	4,5	4,0	3,5	3,2	3,0	2,0	
$I, A$	50	60	70	80	90	100	$I_n=15$ мА
$\delta, \%$	9,0	7,0	6,5	6,0	5,0	3,0	

Из табл. 3 видно, что ТТ на основе аморфного сплава дает существенный выигрыш в уменьшении погрешностей измерения первичного тока, особенно в области больших токов нагрузки, снимаемых с накопительных конденсаторов.

В табл. 4 приводится зависимость амплитуды напряжения на измерительном резисторе R1 от величины  $I/I_n$  (где I – текущее значение тока,  $I_n$  – номинальное значение тока).

Таблица 4

Зависимость напряжения от отношения токов (сплав 7421)

$I/I_n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, B$	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30

Из таблицы следует, что в диапазоне кратностей токов 1-10  $I_n$  зависимость линейна. Такой диапазон токов взят исходя из того, что в полупроводниковых распределителях, применяемых для защиты низковольтной аппаратуры (НВА), максимальная калибруемая кратность токов короткого замыкания равна 10  $I_n$ .

На рис. 2 приведена осциллограмма вторичного тока ТТ или кратности тока 10  $I_n$ . Из приведенной осциллограммы можно определить угол насыщения магнитопровода ТТ. Он равен 0,55π.

Отсюда можно определить величину индукции насыщения магнитопровода из известного соотношения:

$$\omega_2 S B_S f_1 = R I_m (1 - \cos \alpha), \quad (1)$$

где  $\omega_2$  – количество витков вторичной обмотки ( $\omega_2=1600$ );  $f_1$  – циклическая частота в сети; S – сечение магнитопровода ( $S=1,0$  см<sup>2</sup>); R – суммарное сопротивление вторичной цепи ТТ ( $R=100$  Ом);  $I_m$  – амплитудное значение вторичного тока ТТ при 10  $I_n$  ( $I_m=1,4$  А);  $\alpha$  – угол насыщения ТТ ( $\alpha=0,55\pi$ ).

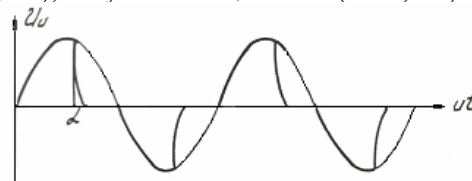


Рис. 2. Осциллограмма напряжений на при  $I/I_n = 10$

Отсюда получаем  $B_S = 1,5$  Тл. Зная значения  $B_S$ , можно подсчитать амплитудное значение вторичного тока ТТ при больших величинах первичного тока, в

том числе и при предельных значениях тока короткого замыкания по формуле:

$$I_a = \sqrt{1 - \left[ 1 - \frac{\omega S B_S f_1}{R I_m'} \right]^2}, \quad (2)$$

где  $I_a$  – амплитудное значение вторичного тока ТТ;  $I_m'$  – приведенное ко вторичной обмотке значение первичного предельного тока короткого замыкания.

В табл. 5 приведена зависимость токов включения ключевого стабилизатора напряжения от величины тока нагрузки для ТТ на основе аморфного сплава с нетермообработанным и термообработанным сердечником, а также для ТТ с шихтованным магнитопроводом соответственно. Испытания проводились при номинальном токе 160 А.

Таблица 5

Зависимость тока включения от величины тока нагрузки при частоте первичного тока 400 Гц

Значения токов, А	Номинальный ток нагрузки, мА						
	5	7	10	12	15	17	20
Магнитопровод из сплава 7421 без термообработки							
$I_{вкл1}$	24	30	42	50	56	70	80
$I_{вкл2}$	70	78	98	110	120	13	140
Магнитопровод из сплава 7421 с термомагнитной обработкой							
$I_{вкл1}$	38	44	50	53	56	68	91
$I_{вкл2}$	38	44	50	53	57	69	92
Магнитопровод шихтованный из стали 3421							
$I_{вкл1}$	30	38	46	53	60	68	75
$I_{вкл2}$	52	60	70	76	81	125	144

Из таблицы видно, что при работе ТТ от источника тока 400 Гц при нагрузке на ключевой стабилизатор напряжения наблюдается зона токов, нижняя граница которой  $I_{вкл1}$  характеризуется тем, что стабилизатор включается только в один из полупериодов тока, а при верхней границе токов  $I_{вкл2}$  стабилизатор включается в работу в оба полупериода тока.

Осциллограмма сигнала на измерительном резисторе в этом диапазоне токов представлена на рис. 3.

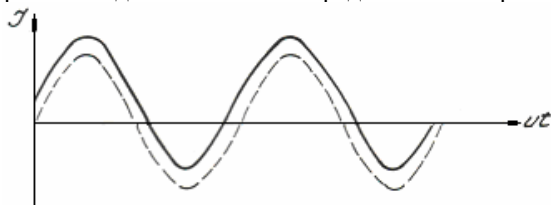


Рис. 3. Осциллограмма напряжений при частоте 400 Гц

Здесь же пунктиром представлена необходимая осциллограмма тока, которая должна быть на измерительном резисторе для обеспечения получения минимальной токовой погрешности ТТ.

Как видно из этой осциллограммы, ТТ обладают в этом диапазоне токов существенной токовой погрешностью, что неприемлемо для устройств защиты. Указанный эффект объясняется тем, что при частоте 400 Гц сердечник магнитопровода получает малое приращение индукции, вследствие чего он перемагничивается вблизи зоны насыщения, как показано на рис. 4.

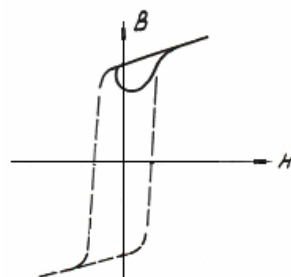


Рис. 4. Перемагничивание магнитопровода ТТ при частоте 400 Гц

Если в этой зоне характеристика перемагничивания существенно отличается от прямоугольной, то в одном полупериоде первичного тока ток намагничивания складывается с приведенным ко вторичной обмотке ТТ первичным током, а во втором полупериоде вычитается из него, что создает значительную асимметрию вторичного тока по полупериодам, как показано на рис. 3. Причем, эта асимметрия и ширина зоны существенно зависят от магнитных свойств материала магнитопровода. Именно этим обстоятельством можно объяснить тот факт, что ширина токовой зоны работы ТТ с большой токовой погрешностью у ТТ с термообработанным сердечником на основе аморфного сплава значительно уже, чем у ТТ с шихтованным магнитопроводом и неотожженным сердечником на основе аморфного сплава. Для устранения этой токовой зоны у ТТ с магнитопроводом из аморфного сплава необходимо несколько увеличить приращение индукции ТТ. Этого можно достичь уменьшением сечения магнитопровода – до  $0,4 \text{ см}^2$ . При такой величине сечения магнитопровода зона работы ТТ с увеличенной погрешностью практически отсутствует. Минимальная величина сечения магнитопровода ТТ ограничена требованием обеспечения линейности ТТ во всем калибруемом диапазоне токов короткого замыкания и для ТТ при частоте 400 Гц составляет величину  $0,15-0,25 \text{ см}^2$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования свойств и характеристик магнитопроводов трансформаторов тока (ТТ) устройств защиты низковольтных автоматических выключателей, выполненных из аморфного сплава 7421, показали целесообразность его применения в датчиках переменного тока, в особенности для работы в цепях с частотой тока 400 Гц. В результате исследования были определены основные соотношения параметров магнитопроводов из аморфного сплава, обеспечивающего минимальную погрешность срабатывания защиты, вносимую собственно трансформаторами тока, выполненными на основе таких магнитопроводов. Повышение точности срабатывания устройств защиты за счет использования в составе ТТ ленточных магнитопроводов из аморфного сплава с уменьшенным сечением по сравнению с ТТ, содержащими шихтованные магнитопроводы, оценивается приблизительно в 1,5 раза.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Аморфные металлические сплавы. Под ред. Люборского Ф.Е.: Пер с англ.-М: Металлургия, 1987, 584 с.
- [2] Д. Раскин, С.Х. Смит. Применение аморфных сплавов: настоящее и будущее. Allied Corporation Mettglas Products, 6 Eastmens Road. Parsiffary, New Yersey, 07054, USA.

Поступила 14.03.2007