



ВЛИЯНИЕ ФОСФОРА НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОГО НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

И. И. РЯБЦЕВ, инж., Ю. М. КУСКОВ, д-р техн. наук, Д. П. НОВИКОВА, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты исследований влияния фосфора при его содержании 0,3...3,5 мас. % на трещиностойкость углеродистого низколегированного наплавленного металла системы Fe–Mn–Si–Cr. Показано, что холодные трещины в наплавленном металле исследованного типа образуются при содержании фосфора > 1,2 %. Очагами зарождения и распространения холодных трещин являются хрупкие фосфидные эвтектики. В многослойном наплавленном металле трещины могут распространяться из слоя в слой, но не переходят в основной металл.

Ключевые слова: дуговая наплавка, низколегированный наплавленный металл, легирование фосфором, трещиностойкость, технологическая проба, фосфидные эвтектики

На триботехнические характеристики низкоуглеродистого низколегированного наплавленного металла фосфор оказывает положительное влияние [1, 2]. Однако широкому применению фосфора в качестве легирующего элемента в наплавочных материалах препятствует устойчивое мнение о его отрицательном влиянии на трещиностойкость наплавленного металла, хотя, как правило, речь идет о материалах с относительно низким содержанием фосфора — не более 0,05 % [3–6]. Цель настоящих исследований — проведение оценки влияния фосфора при его содержании 0,3...3,5 мас. % на трещиностойкость низкоуглеродистого наплавленного металла системы легирования Fe–Mn–Si–Cr. Содержание марганца, кремния и хрома в наплавленном металле не изменялось, а общее содержание этих элементов не превышало 5 %.

Для исследования склонности наплавленного металла к образованию трещин разработано значительное количество методик и технологических проб [7]. В наших исследованиях для оценки трещиностойкости наплавленного металла использована жесткая технологическая проба, предложенная Центральным институтом сварочной техники (ЦИС) в г. Галле (рис. 1) [8]. Она проста в использовании и позволяет установить отличие в трещиностойкости металлов, имеющих в структуре хрупкие составляющие. По этой методике производят наплавку одного – трех валиков в один или несколько слоев без или с подогревом. После охлаждения до комнатной температуры по заданным режимам охлаждения при необходимости производится зачистка или шлифовка поверхности наплавленного металла. Обнаружение трещин производится контролем с использованием лупы с четырехкратным увеличением, применяется так-

же цветная дефектоскопия или магнитопорошковый метод. При этом подсчитывают количество трещин и замеряют их длину и ширину. Для оценки склонности наплавленного металла к образованию трещин разработана шкала баллов: наименьшую склонность имеет металл без трещин (балл 1); при наличии трещин (ширина более 0,1 мм), доходящих до основного металла и имеющих общую протяженность более 60 мм, наплавленный металл оценивается баллом 5. Промежуточными баллами (2...4) оценивается металл с трещинами меньшей ширины ($\leq 0,1$ мм) и меньшей общей длины.

Для экспериментов использовали пластины из стали Ст3 размером 40×150×250 мм, на которых производили дуговую автоматическую наплавку опытными порошковыми проволоками под флюсом АН-348. Пластины перед наплавкой не подогревали. На них наплавливали одиночные валики длиной примерно 200 мм в четыре слоя. После наплавки пластины остывали на воздухе. Для наплавки использовали порошковые проволоки диаметром 2,0 мм при следующем режиме: ток 220...240 А; напряжение 26...28 В; скорость наплавки 20 м/ч.

После полного остывания образцы контролировали на наличие трещин с использованием лупы с четырехкратным увеличением. Горячих трещин при наплавке всеми опытными проволоками не обнаружено. По-видимому, значительное количество легкоплавких фосфидных эвтектик, содер-

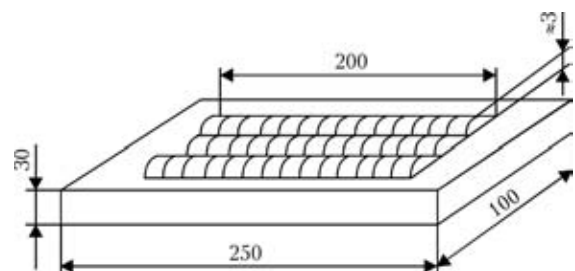


Рис. 1. Схема технологической пробы для оценки трещиностойкости наплавленного металла [8]



Оценка склонности наплавленного металла к образованию трещин

Марка порошковой проволоки	Массовая доля фосфора в наплавленном металле, %	Твердость наплавленного металла <i>HB (HRC)</i>	Количество трещин шириной, мм		Балл трещиностойкости металла в зависимости от ее общей длины, мм				
			>0,1	≤0,1	0	1...20	21...40	41...60	>60
ПП-0-Ф	0,035	229	0	0	1	—	—	—	—
ПП-0.3-Ф	0,32	229	0	0	1	—	—	—	—
ПП-0.6-Ф	0,59	302	0	0	1	—	—	—	—
ПП-0.9-Ф	0,98	302	0	0	1	—	—	—	—
ПП-1.2-Ф	1,23	321	0	0	1	—	—	—	—
ПП-1.6-Ф	1,58	(38)	0	8	—	—	3	—	—
ПП-2.0-Ф	2,02	(41)	2	8	—	—	—	—	5
ПП-2.5-Ф	2,46	(44)	2	11	—	—	—	—	5
ПП-3.5-Ф	3,35	(46)	2	12	—	—	—	—	5

жащихся в наплавленном металле, способствует «залечиванию» зародышей горячих трещин [9].

Первые поперечные холодные трещины зафиксированы в наплавленном металле, содержащем 1,58 % фосфора (таблица, ПП-1.6-Ф). При наплавке образцов порошковыми проволоками с более высоким содержанием фосфора количество и общая длина трещин соответственно увеличивались. В наплавленных валиках подсчитывали трещины, их максимальную ширину оценивали с помощью шупов, а длину замеряли штангенциркулем. Затем проводили балльную оценку склонности наплавленного металла к образованию трещин (таблица).

После визуального осмотра и подсчета трещин наплавленные пластины разрезали анодно-механической резкой по центру вдоль оси наплавленных валиков. Полученные образцы шлифовали и травили с целью более точного определения количества трещин и установления характера их распространения в наплавленных слоях металла (рис. 2), производили также цветную дефектоскопию шлифов. Новых трещин по сравнению с первичной оценкой выявлено не было. Не было также отмечено распространения трещин из наплавленного в основной металл.

При содержании фосфора примерно 1,2 % трещин в наплавленном металле не было и его склонность к их образованию оценивали баллом 1 (таблица, рис. 2, макрошлифы № 2...5). Первые холодные трещины в наплавленном металле появились при содержании фосфора 1,58 %. На длине примерно 200 мм обнаружено восемь трещин шириной не менее 0,1 мм, не переходящих из основного металла в наплавленный (таблица и рис. 2, макрошлиф № 6). В соответствии с рекомендациями используемой методики склонность к трещинам такого металла оценена баллом 3. В наплавленном металле, содержащем 2,02, 2,46 и 3,35 % фосфора, отмечено появление трещин шириной более 0,1 мм и общей длиной более 60 мм. Склонность такого металла к трещинам оценива-

ется баллом 5 (таблица, рис. 2, макрошлифы № 7...9).

Для определения причин образования трещин проведены металлографические исследования металла, наплавленного всеми опытными порошковыми проволоками (рис. 3), а также металла с содержанием фосфора 2,46 и 3,35 % в местах образования трещин (таблица, проволоки ПП-2.5-Ф и ПП-3.5-Ф; рис. 4, *a-z*). Как показали металлографические исследования, структура наплавленного металла без фосфора (рис. 3, *a*) состоит из

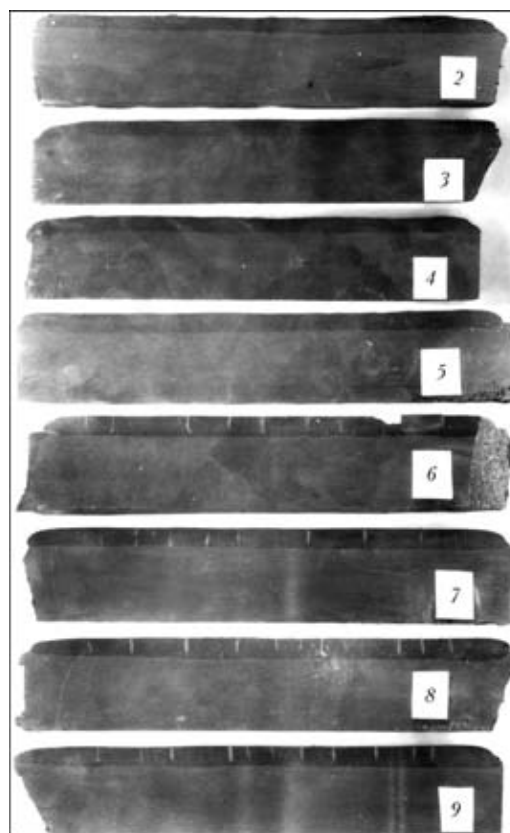


Рис. 2. Макрошлифы продольного сечения пластин, наплавленных порошковыми проволоками с различным содержанием фосфора, мас. %: № 2 — 0,32; 3 — 0,59; 4 — 0,98; 5 — 1,23; 6 — 1,58; 7 — 2,02; 8 — 2,46; 9 — 3,35

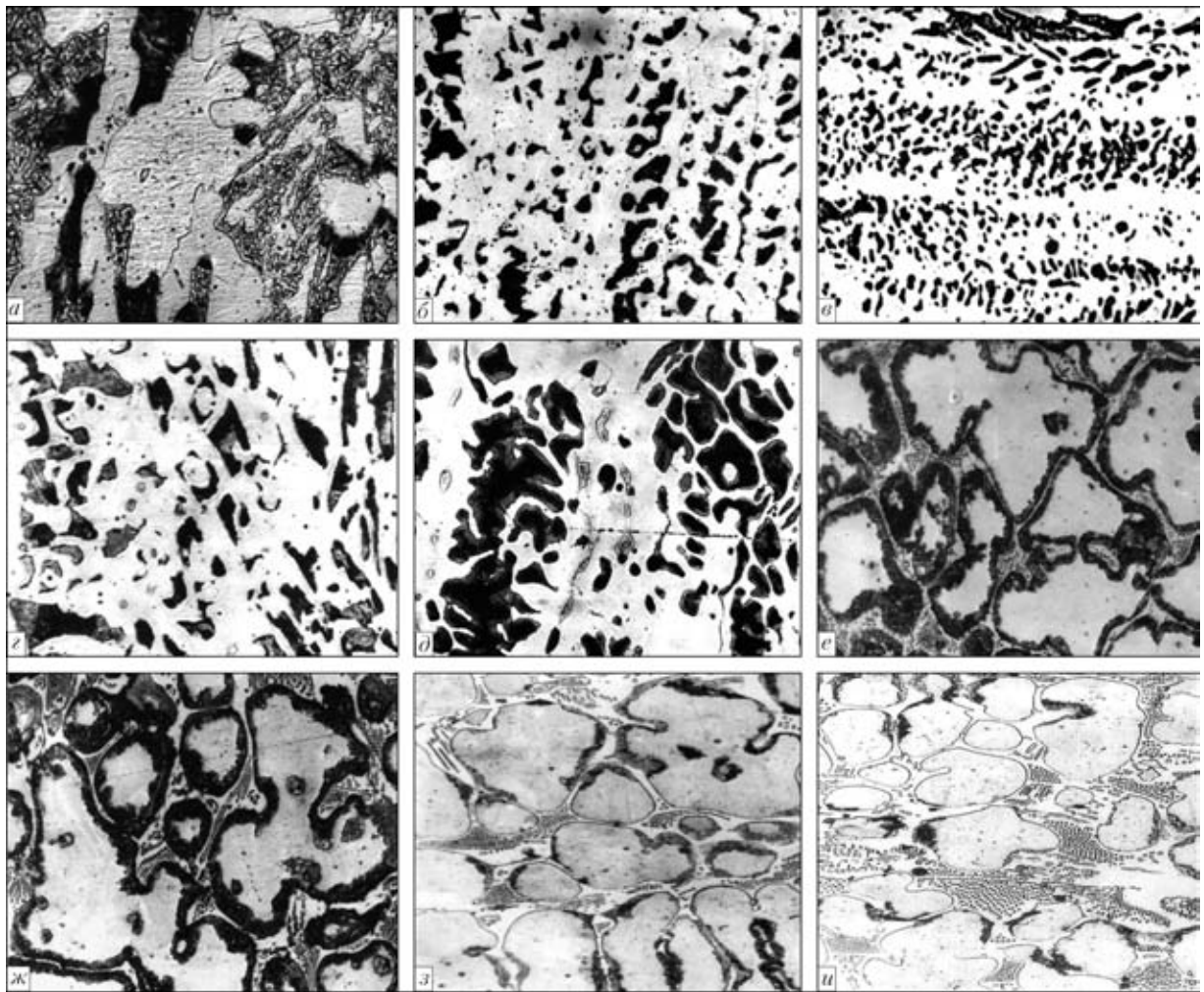


Рис. 3. Микроструктуры наплавленного металла 20ХГСП с различным содержанием фосфора: а — без фосфора; б — 0,32; в — 0,59; г — 0,98; д — 1,23; е — 1,58; ж — 2,02; з — 2,46; и — 3,35; а-в, $\times 400$; г-и, $\times 800$

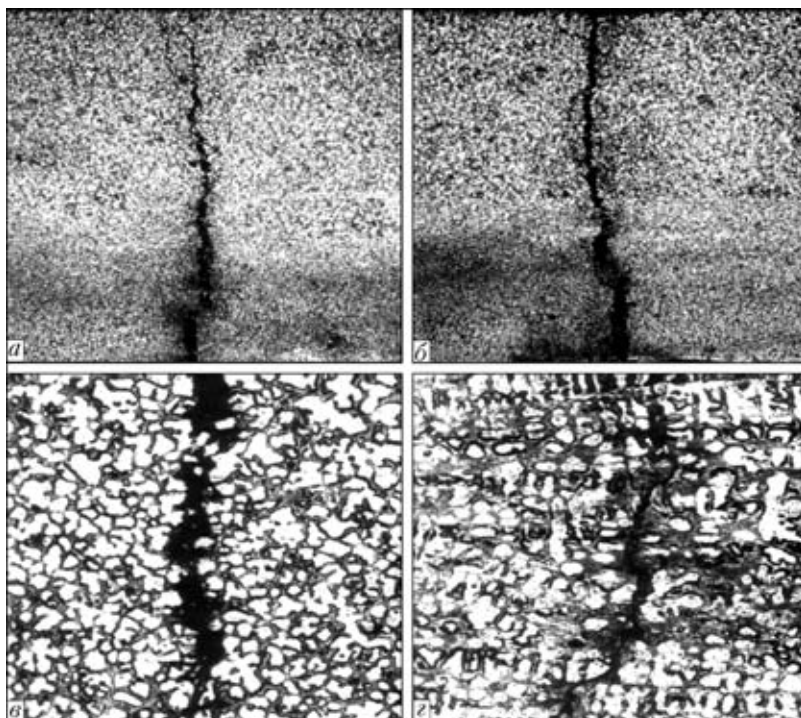


Рис. 4. Макро- (а, б) и микроструктуры (в, г) наплавленного металла типа 20ХГСП с содержанием фосфора: 2,46 (а, в) и 3,35 % (б, г); а, б — $\times 50$; в, г, $\times 250$

феррита (микротвердость HV 0,01–185...199), перлита (HV 0,01–205...228) и участков бейнита (HV 0,01–205...254). При содержании фосфора 0,32 % структура наплавленного металла измельчается (рис. 3, б). Как и в предыдущем случае, она состоит из смеси феррита (HV 0,01–201...205), перлита (HV 0,01–257...290) и бейнита (HV 0,01–257...290). Кроме того, появляются участки, которые идентифицированы как бейнитно-мартенситная смесь с микротвердостью HV 0,01–378. Свободных фосфидов не обнаружено, по-видимому, весь фосфор растворен в матрице наплавленного металла.

С увеличением содержания фосфора до 0,59 % (рис. 3, в) структура наплавленного металла еще более измельчается. Микротвердость отдельных структурных составляющих увеличивается: HV 0,01–205...239 (феррит), HV 0,01–283



(перлит), HV 0,01–482...515 (бейнитно-мартенситная смесь). Одновременно до HV 302 увеличивается макротвердость (см. таблицу). При содержании 0,98 % фосфора существенных изменений в структуре наплавленного металла не происходит (рис. 3, *з*). Однако увеличивается микротвердость структурных составляющих: HV 0,01–299...309 (феррит), HV 0,01–330...378 (перлит), HV 0,01–591...613 (бейнитно-мартенситная смесь). При металлографических исследованиях включений свободных фосфидов при содержании 0,59 и 0,98 % фосфора не обнаружено. Строчечные включения фосфидов зафиксированы при содержании в наплавленном металле 1,23 % фосфора (рис. 3, *д*). Микротвердость основных структурных составляющих (феррита, перлитно-бейнитной и бейнитно-мартенситной смесей) осталась на прежнем уровне, микротвердость фосфидных включений составляет HV 0,01–330...378. Существенно изменяется структура наплавленного металла при содержании фосфора 1,58 % (рис. 3, *е*). В структуре наблюдается сплошная сетка фосфидной эвтектики с высокой микротвердостью HV 0,01–876...916. Увеличилась микротвердость ферритной матрицы (HV 0,01–358), макротвердость наплавленного металла возросла до HRC 38. Аналогичный характер имела структура наплавленного металла, содержащего 2,02 % фосфора (рис. 3, *ж*).

С дальнейшим увеличением содержания фосфора до 2,46 (рис. 3, *з*), а затем до 3,35 % (рис. 3, *и*) наблюдается утолщение сетки фосфидной эвтектики по границам зерен и изменение ее строения. Ее микротвердость сохраняется на достаточно высоком уровне (HV 0,01–860...916), а макротвердость наплавленного металла составляет HRC 44...46.

В местах образования трещин в наплавленном металле с содержанием фосфора 2,46 и 3,35 % провели металлографический анализ, который подтвердил (рис. 4, *а–з*) образование холодных трещин. Трещины появлялись в верхнем наплавленном слое, проходили через все наплавленные слои, но не распространялись в основной металл (рис. 4, *а, б*). Разрушение шло по границам зерен (рис. 4, *в, з*) и, видимо, образование и распространение таких трещин связано с выделением по границам первичных зерен сплошной сетки хрупкой фосфидной эвтектики достаточно высокой твердости.

Таким образом, при содержании фосфора в пределах 0,3...3,5 % в низкоуглеродистом наплавленном металле типа Fe–Mn–Si–Cr горячие трещины не образуются. При содержании фосфора менее 1,0 % трещины также не образуются, поскольку весь фосфор растворен в матрице и свободных фосфидов, которые могли бы служить зародышами горячих трещин в структуре наплавленного металла, практически нет. При более высоком содержании фосфора (>1,2 %) легкоплавкие фосфидные эвтектики «залечивают» образующиеся микропустоты и трещины также не образуются.

Холодные трещины в наплавленном металле исследованного типа образуются при содержании фосфора свыше 1,2 %. Исследования показали, что очагами зарождения и распространения холодных трещин являются хрупкие фосфидные эвтектики, выделяющиеся при таком содержании фосфора по границам зерен. В многослойном наплавленном металле трещины могут распространяться из слоя в слой, но не переходить в основной металл.

1. *Рябцев И. И., Кусков Ю. М.* Перспективы использования фосфора в наплавочных материалах на основе железа // Автомат. сварка. — 2003. — № 1. — С. 12–16.
2. *Влияние* фосфора на триботехнические характеристики и структуру наплавленного металла системы легирования Fe–Cr–Si–Mn / И. И. Рябцев, Ю. М. Кусков, В. Ф. Грабин и др. // Там же. — 2003. — № 6. — С. 20–24.
3. *Кирьяков В. М., Дегтярь А. А., Подгаецкий В. В.* Влияние содержания серы и фосфора в проволоке Св-08Г2С на свойства швов // Там же. — 1970. — № 12. — С. 19–21.
4. *Потапов Н. Н.* Влияние серы и фосфора на пластичность и ударную вязкость металла шва // Там же. — 1973. — № 1. — С. 8–11.
5. *Влияние* фосфора на структуру и свойства металла швов при сварке низколегированных сталей / А. А. Алексеев, И. Р. Явдошин, В. Г. Войткевич, Ю. Д. Морозов // Там же. — 1989. — № 4. — С. 7–10.
6. *Влияние* фосфора на ударную вязкость и химическую микронеоднородность металла сварных швов / И. К. Походня, В. Г. Войткевич, А. А. Алексеев и др. // Там же. — 1992. — № 2. — С. 3–7.
7. *Шоршоров М. Х., Чернышова Т. А., Красовский А. И.* Испытания металлов на свариваемость. — М.: Металлургия, 1972. — 240 с.
8. *Кречмар Э.* Методы испытаний наплавленного металла // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1979. — С. 3–22.
9. *Особенности* плавления и кристаллизации наплавленного металла типа стали 20ХГС, легированного фосфором / Ю. М. Кусков, И. И. Рябцев, Л. К. Дорошенко, В. Г. Васильев // Автомат. сварка. — 2002. — № 8. — С. 24–27.

The paper presents the results of studying the influence of phosphorus at its content of 0.3...3.5wt. % on crack resistance of carbon low-alloyed deposited metal of Fe–Mn–Si–Cr system. It is shown that cold cracks in the deposited metal of the studied type are formed at phosphorus content of less than 1.2%. Brittle phosphide eutectics are the sites of cold crack initiation and propagation. In a multilayer deposited metal the cracks can propagate from layer to layer, but do not go over into the base metal.

Поступила в редакцию 31.03.2005



ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С РАЗВИТЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОТОКАМИ РАССЕЯНИЯ И МАГНИТНЫМ ШУНТОМ

С. В. РЫМАР, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложена оптимизационная модель однофазного трансформатора с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния и подвижным магнитным шунтом для обеспечения плавного регулирования сварочного тока. Модель позволяет рассчитывать оптимальные по массе, объему и стоимости трансформаторы при обеспечении заданных минимальных и максимальных значений индуктивности рассеяния.

Ключевые слова: трансформаторы, оптимизационная модель, потоки рассеяния, магнитный шунт, индуктивность рассеяния, параметры сварки, сварочная техника

Однофазные трансформаторы с развитыми поперечными магнитными потоками (далее потоками рассеяния), проходящими от стержня к стержню магнитопровода, и магнитным шунтом широко применяются в источниках питания для сварки штучными электродами. Достоинством трансформатора является его компактность и возможность плавного регулирования индуктивности рассеяния самой конструкцией. Теория расчета трансформатора разработана в ИЭС им. Е. О. Патона В. К. Лебедевым [1]. Развитием теории индуктивности рассеяния стала работа [2]. Оптимизация трансформаторов с поперечным рассеянием с возможным учетом магнитного шунта рассмотрена в [3], однако для этого требуется рассчитать большое количество промежуточных вариантов.

Известно, что при полном разделении зависимых и независимых переменных в оптимизационной модели оптимальный вариант трансформатора определяется однозначно. При аналитическом подходе оптимизации трансформатора с жесткой внешней характеристикой такая задача решена в работах [4–7], но применительно к рассматриваемому трансформатору оптимизационная модель не гарантирует получения оптимального варианта трансформатора с необходимым уровнем индуктивности рассеяния. Введение в указанную модель жесткозакрепленного параметра — заданного значения индуктивности рассеяния — приводит к возникновению проблемы при дифференцировании оптимизационной функции. Поэтому аналитическим методом эта задача не решалась. Ее удалось решить с помощью разработанной оптимизационной модели, предназначенной для численных методов оптимизации.

Целью настоящей работы является описание разработанной оптимизационной модели однофаз-

ного трансформатора с развитыми поперечными потоками рассеяния и магнитным шунтом, с жестким ограничением заданных минимального и максимального значений индуктивности рассеяния и полным разделением зависимых и независимых переменных. Модель позволяет однозначно рассчитать оптимальный трансформатор с минимумом массы, объема или стоимости его активных материалов. Эта статья является завершающей в ряде публикаций [8, 9] по оптимизации основных типов однофазных сварочных трансформаторов.

Развитые поперечные потоки рассеяния в рассматриваемом трансформаторе образуются путем разнесения первичной и вторичной обмоток по длине стержней магнитопровода, а плавное регулирование индуктивности рассеяния происходит за счет того, что магнитный шунт вдвигается и выдвигается между обмотками (рисунок). При этом потоки рассеяния проходят от стержня к стержню магнитопровода и через магнитный шунт. Если шунт вдвигается, то индуктивность рассеяния увеличивается (сварочный ток уменьшается), а при выдвигении — уменьшается (сварочный ток увеличивается).

Рассмотрим двухобмоточный трансформатор, питающийся от промышленной сети с синусоидальным напряжением. Примем, что вытеснение тока к поверхности проводников обмоток отсутствует и магнитный шунт не насыщен. При оптимизации учтем только активные материалы трансформатора — электротехническую сталь магнитопровода, медь или алюминий проводников обмоток.

Оптимизационная модель трансформатора с поперечным рассеянием и магнитным шунтом во многом повторяет аналогичную с поперечным рассеянием [9]. Поэтому приведенные здесь формулы и блоки оптимизационной модели читатель может найти в работе [9].