

примеры полученных численных решений для симметричного и несимметричного нагрева заготовок из углеродистой стали.

Таким образом, деформация при фазовых переходах в сильной степени определяется не только начальной деформацией (изменением объема и коэффициента линейного расширения), но также и изменением предела текучести при фазовых переходах. Неупругие деформации, возникающие в момент перехода, могут существенно изменить финальную картину деформации и увеличить кривизну заготовки и соответственно ее прогиб в несколько раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике:** Справ. / Под ред. Б. Е. Неймарк. – М.; Л.: Энергия, 1967. – 240 с.
2. **Черешин В. Т.** Экспериментальная техника в физическом металловедении. – Киев: Техніка, 1968. – 280 с.
3. **Головин С. А., Пушкар А., Левин Д. М.** Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. – М.: Металлургия, 1987. – 190 с.
4. **Демидович Б. П., Марон И. А.** Основы вычислительной математики. – М.: ГИФМЛ, 1960. – 670 с.

УДК 669.18 (07)

Д. Н. АНДРИАНОВ, канд. техн. наук, **В. Н. ПРОХОРЕНКО**,
А. С. ЗАЗЯН (РУП «БМЗ»)

ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ДСП НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАВКИ

Металлургия – одна из немногих отраслей промышленности, которая при резком снижении востребованности ее продукции в стране сумела быстро переориентироваться на мировые рынки. Продукция предприятий черной металлургии оказалась не только востребованной, но и конкурентоспособной. Для сохранения и упрочнения завоеванных позиций необходимо постоянное совершенствование и развитие отрасли с учетом мировых научно-технических достижений.

В настоящее время электрометаллургические предприятия в России и странах СНГ осуществляют крупномасштабную реконструк-

цию, ориентируясь на современные отечественные и зарубежные технологии производства.

Особая роль в металлургическом производстве отводится силовому электротехническому оборудованию: специальным электропечным трансформаторам, коммутационному оборудованию, измерительным устройствам, силовым фильтрам гармоник и т. д. От технических характеристик и надежности работы этого оборудования зависит себестоимость металла и экономические показатели металлургического производства.

Трансформатор является основным элементом высокомошной электропечной установки, от его параметров и надежности конструкции зависит эффективность работы электропечи. Помимо общих требований, предъявляемых к трансформаторам, электропечные трансформаторы должны обеспечивать [1] токи большой величины на вторичной стороне; сочетание очень малого напряжения на вторичной стороне со сверхвысоким напряжением на первичной стороне; регулирование напряжения под нагрузкой в широком диапазоне; надежную работу при резких изменениях нагрузки (от минимума при обрыве дуги до максимума при коротком замыкании электродов); малое значение напряжения короткого замыкания; возможность при необходимости раздельного регулирования значений трех фазовых напряжений.

В настоящее время выпускают два типа электропечных трансформаторов: стержневые и броневые (рис. 1). У стержневого

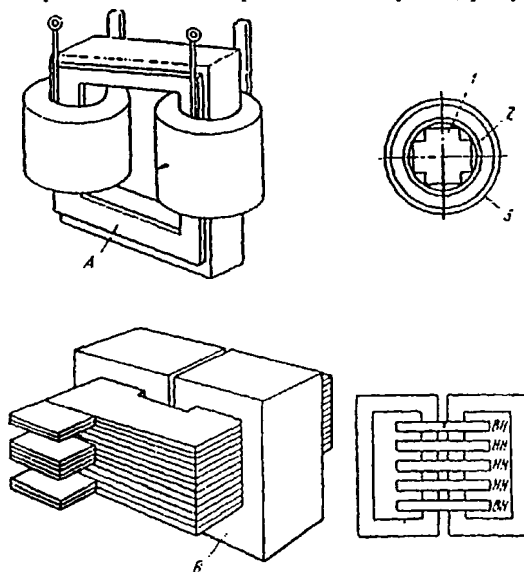


Рис. 1. Типы электропечных трансформаторов: А — стержневой трансформатор; Б — броневой трансформатор; 1 — сердечник; 2 — обмотка высокого напряжения; 3 — обмотка низкого напряжения

трансформатора катушки высшего и низшего напряжений выполнены в виде трубок, которые помещаются одна в другой. В отличие от распределяющих у печных трансформаторов вследствие высоких токов катушка низшего напряжения располагается снаружи.

У броневых трансформаторов катушки имеют пластинчатую (с выемкой по центру) форму; катушки высшего и низшего напряжения расположены внахлестку по высоте сердечника. Достоинством стержневых трансформаторов является удобство ремонта. Броневые трансформаторы обеспечивают более низкое реактивное сопротивление и возможность установки асимметричных напряжений по фазам.

Для питания дуговых печей используют трансформаторы с прямым и косвенным регулированием. У трансформатора с прямым регулированием в результате добавления витков при неизменном входном напряжении магнитный поток в железном сердечнике уменьшается, в связи с чем понижается напряжение вторичной обмотки. Диапазон регулирования вторичных напряжений может быть расширен еще более при схеме соединения обмотки высшего напряжения звезда – треугольник или по параллельно-последовательной схеме. Однако эти переключения должны осуществляться в обесточенном состоянии. При очень высоких первичных напряжениях широкий диапазон вторичных напряжений трансформатора с прямым регулированием получить невозможно.

Для таких случаев печной трансформатор выполняют по схеме с непрямым регулированием. Этот трансформатор объединяет два трансформатора в одном корпусе: основной и автотрансформатор. Автотрансформатор выполняют с переменным уровнем напряжения. Уровень напряжения выбирают таким образом, чтобы при заданном диапазоне регулирования напряжений можно было подобрать оптимальную конструкцию переключателя ответвлений по току и напряжению. Основной трансформатор имеет строго установленный коэффициент трансформации и дает основное вторичное напряжение. Вторичная обмотка автотрансформатора соединяется последовательно с вторичной обмоткой второго (основного) трансформатора. Изменяющееся вторичное напряжение автотрансформатора добавляется к постоянному вторичному напряжению основного трансформатора или вычитается из него.

Более экономично подключать к основному трансформатору автотрансформатор с прямым регулированием вследствие меньших его размеров и массы, а также более низкой стоимости. Однако в некоторых случаях необходимо использовать автотрансформатор с косвенным регулированием, например при использовании стержневого трансформатора, если требуется одинаковый интервал напряжений между ступенями или асимметричное регулирование напряжений по фазам. Трансформатор с косвенным регулированием также требуется, если подключение производится к сети с очень высоким напряжением, когда возникает проблема с изоляцией свободной части обмотки высокого напряжения или не имеется подходящего печного выключателя. При использовании трансформатора с непрямым регулированием печной выключатель может быть выполнен на среднее напряжение в случае, если его поместить в промежуточном контуре трансформатора.

Одним из требований к трансформаторам современных сверхмощных дуговых сталеплавильных печей является возможность обеспечения постоянной мощности на ряде верхних ступеней напряжения. Такое конструктивное решение, хотя и вынуждает иметь несколько завышенную мощность трансформатора, позволяет оптимизировать электрический режим плавки при работе печей в различных технологических условиях и улучшить производственные показатели. Наличие в печном трансформаторе высших ступеней постоянной мощности в достаточно широком диапазоне вторичного напряжения позволяет (в результате работы в период плавления на меньших, чем обычно, токах) уменьшить электрические потери и снизить расход электродов.

В последние годы некоторые зарубежные фирмы перешли к изготовлению трансформаторов с выводами, соответствующими использованию на псчс схемы короткой сети «триангулированная звезда» на электродах, что позволяет избежать установки шинного моста со сложной системой перешихтовки начал и концов всех трех обмоток трансформатора, необходимой для перехода от схемы «треугольник на выводах, трансформатора» к схеме «триангулированная звезда». При переходе на новую систему расположение выводов трансформатора осуществляется также по вершинам треугольника в соот-

ветствии с расположением кабельных гирлянд и подвижных токоподводов. В этом случае при некотором усложнении конструкции трансформатора существенно уменьшается длина вторичного токоподвода.

Одним из путей улучшения технико-экономических показателей работы ДСП является увеличение номинальной мощности печного трансформатора. Помимо роста производительности и сокращения токового времени плавки повышение энергонасыщенности печи путем увеличения вводимой активной мощности позволяет снизить удельный расход электроэнергии.

Полезная мощность (мощность дуг), вводимая в ДСП, рассчитывается по формуле [2]

$$P_d = S K_n \mu_3 \lambda, \quad (1)$$

где S – номинальная мощность печного трансформатора, МВ·А; K_n – средний коэффициент использования мощности в энергетический период плавки; $\mu_3 = P_d/P_a$ – электрический КПД установки, учитывающий потери мощности во вторичном токовом; $\lambda = P_a/S$ – коэффициент мощности ($\cos \varphi$), характеризующий отношение активной мощности цепи низкого напряжения к номинальной мощности трансформатора.

Теоретически ввод 1 МВт дополнительной активной мощности приводит к снижению энергопотребления на 2,2 кВт·ч/т [3].

Время энергетического периода плавки определяется [4] из частного баланса энергии по формуле

$$\tau_3 = (W_{\text{пол}})/(S K_n \mu_3 \lambda - P_{2\text{тп}}), \quad (2)$$

где $W_{\text{пол}} = W_{2\text{у.т}} m_{\text{ш}}$ – полезная энергия, МВт·ч; $W_{2\text{у.т}}$ – теоретическое удельное значение полезной энергии, МВт·ч/т; $m_{\text{ш}}$ – масса металлошихты, т; $P_{2\text{тп}} = k \cdot 0,14 m_0^{0,67}$ – мощность тепловых потерь ДСП за энергетический период [4], МВт; k_2 – коэффициент, учитывающий возможное изменение мощности тепловых потерь, для ДСП-100 $k_2 = 5$; m_0 – номинальная вместимость печи, т.

Согласно данным источника [4], $W_{2\text{у.т}} = 0,26$ МВт·ч/т; для 100-тонной ДСП $m_{\text{ш}} = 120$ т, $m_0 = 100$ т. Находим величину полезной энергии для такой печи:

$$W_{\text{пол}} = W_{2\text{ут}} m_{\text{ш}} = 0,26 \cdot 120 = 31,2 \text{ МВт}\cdot\text{ч.}$$

Рассчитаем мощность тепловых потерь:

$$P_{2\text{т.п}} = k_2 \cdot 0,14 m_0^{0,67} = 5 \cdot 0,14 \cdot 100^{0,67} = 15,3 \text{ МВт.}$$

Используя формулы (1) и (2), можно расписать сокращение времени плавки при замене трансформатора 75 МВ·А на трансформатор 95 МВ·А при его использовании на ДМП-100:

$$\Delta\tau_{\text{э}} = W_{\text{пол}}/(P_{\text{д}} - P_{2\text{т.п}}) - W_{\text{пол}}/(P'_{\text{д}} - P_{2\text{т.п}}),$$

где $P_{\text{д}}$ и $P'_{\text{д}}$ – мощность дуг соответственно до и после замены трансформатора, МВт.

Для ДСП, работающих в условиях РУП «БМЗ», путем снятия характеристик печного трансформатора и построения круговых диаграмм получены значения коэффициентов использования мощности, коэффициента мощности и коэффициента электропотерь (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики печных трансформаторов

Трансформатор 75 МВ·А	Трансформатор 95 МВ·А
$K_{\text{н}} = 1$	$K_{\text{н}} = 0,9$
$\mu_3 = 0,97$	$\mu_3 = 0,97$
$\lambda = 0,84$	$\lambda = 0,82$

Мощность дуг, рассчитанная по формуле (1):

$$P_{\text{д}} = S K_{\text{н}} \mu_3 \cdot \lambda = 75 \cdot 1 \cdot 0,97 \cdot 0,84 \approx 61,11 \text{ МВт,}$$

$$P'_{\text{д}} = S' \cdot K_{\text{н}} \cdot \mu_3 \cdot \lambda = 95 \cdot 0,9 \cdot 0,97 \cdot 0,82 \approx 68,01 \text{ МВт,}$$

откуда сокращение времени плавки

$$\Delta\tau_{\text{э}} = W_{\text{пол}}/(P_{\text{д}} - P_{2\text{т.п}}) - W_{\text{пол}}/(P'_{\text{д}} - P_{2\text{т.п}}) = 31,2/(61,11 - 15,3) - 31,2/(68,01 - 15,3) = 0,098 \text{ ч, или } 5,9 \text{ мин.}$$

В настоящее время дуговые сталеплавильные печи на РУП «БМЗ» реконструируются.

В ходе проведения реконструкции ДСП-2 ЭСПЦ-1 произведен монтаж и подключение нового печного трансформатора номиналь-

ной мощностью 95 + 10 МВ·А и установлена система управления электродами производства фирмы «SIEMENS» с оптимизацией процесса на базе нейронной сети; к печному трансформатору ДСП-2 подключен дроссель (реактор) дополнительной индуктивности.

Система регулирования SIMELT-AC-NEC выполнена на программируемом контроллере SIMATIK S7-400 и на промышленном компьютере Pentium. Самообучающаяся система регулирования SIMELT-AC-NEC эффективно управляет процессом благодаря использованию гибридной модели, являющейся комбинацией математической модели электропечного контура и нейронной сети. Использование данной системы позволяет автоматически поддерживать максимально допустимый уровень активной мощности на всем протяжении плавки при рациональном распределении излучения дуг внутри печи.

Система регулирования SIMELT-AC-NEC состоит из трех устройств-систем и имеет ряд функций, определяющих оптимальную работу регулятора с трансформатором, печью, электродами, обеспечивая точность регулирования рабочей точки дуги при плавлении металлошихты, состоит из следующих элементов:

1) устройство PLC (программно-локальный компьютер) контроллера S7-400 состоит из корзины «Симатика», в которой размещены ячейки процессора аналоговых и цифровых входов и выходов; в памяти ячейки процессора находится программа регулирования электродами. PLC контроллер осуществляет регулирование движения электродов;

2) устройство «NEC-компьютер» с установленной в нем программой осуществляет оптимизацию ввода мощности путем корректировки задаваемого PLC-контроллером управляющего напряжения на сервоклапан;

3) устройство «компьютер WinCC» с сервером осуществляет отображение настроек и протекающих процессов в PLC-контроллере S7-400 и компьютере NEC. В нем также хранятся архивы прошедших событий.

Начальное проплавление корзины с токами, по величине отличающимися от рабочих, обеспечивает возможность эффективно разбивать металлическую шихту и снижает вероятность поломок электродов в начале плавления металлошихты.

В системе оптимизации NEC для снижения теплового воздействия на стеновую футеровку используется возможность перераспре-

деления излучения фаз, а при достижении температурой стеновых панелей определенного значения (+70 °С) происходит автоматическое снижение рабочей ступени трансформатора для предупреждения перегрева панелей. Технические характеристики установленного оборудования приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сервисный реактор

Параметр	Показатель
Количество фаз	3
Проходная мощность, МВ·А	95
Максимальная реактивная мощность, МВ·А	21,5
Номинальное напряжение, В	33000
Номинальная сила тока, А	1662
Реактивность, Ом	0–0,65–1,274–1,664–2,106–2,6
Частота, Гц	50
Трансформатор 95МВ·А	
Номинальная мощность, МВ·А	95
Напряжение первичной обмотки, В	33000
Напряжение вторичной обмотки, В	420–960
Сила тока первичной обмотки, А	923–1662
Максимальная сила тока вторичной обмотки, А	72500
Частота, Гц	50

Основные технико-экономические показатели работы ДСП-2 до и после реконструкции с использованием трансформатора мощностью 75МВ·А и мощностью 95МВ·А с новой системой регулирования электродов показали снижение удельного расхода электроэнергии, электродов снижение времени под током (табл. 3) [5].

Таблица 3. Технико-экономические показатели работы ДСП-2 до и после реконструкции

Параметр	Трансформатор 75 МВ·А («Simelt»)»	Сервисный реактор, трансформатор 95 МВ·А («Simelt-AC-NEC»)»	Улучшение показателя, %
Время под током, мин	46,9	44,70	4,69
Удельный расход электроэнергии, кВт/ч	496,92	474,68	4,48
Удельный расход электродов, кг/т	2,246	2,148	4,36

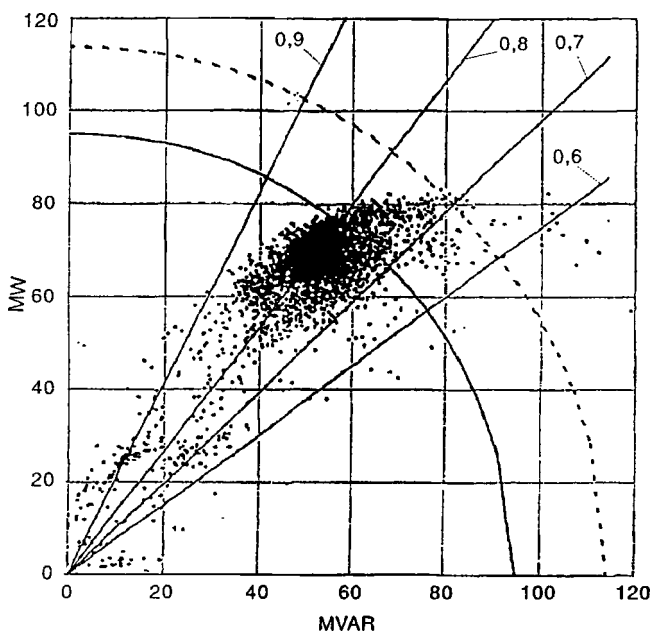


Рис. 2. Круговая диаграмма режима работы трансформатора и устойчивости электрической дуги

Круговые диаграммы режима работы трансформатора и устойчивости электрической дуги показывают, что произошел рост «кучности» рабочих точек, их более плотное группирование подтверждает способность новой системы на более высоком уровне поддерживать стабильность тока (рис. 2) [5]. Устойчивые режимы работы снизили тепловое воздействие на стеновую футеровку и температуру водоохлаждаемых панелей.

При увеличении мощности трансформатора (до 95 МВА) недостатком является малый диаметр рабочего пространства печи (пространства выше уровня откосов ванны, ограниченного внутренней поверхностью футеровки стены и свода), так как дуговая сталеплавильная печь построена и рассчитана для трансформатора мощностью 75 МВ·А. Дело в том, что основой тепловой работы ДП при заданном энергетическом режиме плавки является рациональное распределение в рабочем пространстве тепловых потоков излучения от

электрических дуг в соответствии с тепловоспринимающей способностью ванны, стены и свода.

Работоспособность огнеупорной футеровки, зависящая от механизма разрушения материала (оплавление либо растрескивание) или перегрева водоохлаждаемых элементов, определяется величиной тепловой нагрузки, температурными условиями, физико-химическим взаимодействием с печной атмосферой и т. п. Тепловая нагрузка футеровки стены является следствием теплообменных процессов в свободном пространстве печи и в первую очередь может быть оценена плотностью теплового потока q , падающего от дуги как «точечного» источника излучения на данную площадку футеровки стены в соответствии с законами направления и расстояния [6].

Это приводит к работе трансформатора не в полную мощность, простоям за счет перегрева водоохлаждаемых элементов печи в первую очередь против электродов, потерям тепловой энергии за счет перегрева охлаждающей жидкости, повышенному расходу огнеупорных изделий и низкой стойкости водоохлаждаемых элементов печи.

В результате анализа работы дуговой сталеплавильной печи с новым трансформатором мощностью 95 МВ·А и системой регулирования SIMELT-AC-NEC отмечено снижение времени под током, удельного расхода электроэнергии, удельного расхода электродов, однако до настоящего момента не полно используются возможности трансформатора мощностью 95 МВА. Для увеличения производительности и полного использования возможностей трансформатора мощностью 95 МВ·А необходимо дополнительно изменить конструкцию каркаса и свода ДСП для снижения облучаемости водоохлаждаемых элементов электрическими дугами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pfeiffer G. Elektrische Auslegung und Auszurustung von Lichtbogenhofen // Radex-Rundschau. – 1984. – N 2. – S. 359–377.
2. Смоляренко В. Д., Девитайкин А. Г., Попов А. Н., Бесчаснова М. А. Энерготехнологические особенности процесса электроплавки стали и инновационный характер его развития // Электromеталлургия. – 2003. – № 12. – С. 12–19.
3. Энергосбережение при электроплавке // Материалы рос.-герм. семинара, 21–30.04.1996 г. / Национальный комитет по электротехнологии, семинар по электроплавке и электропечам. АО «ВНИИЭТО». – 1996.

4. Егоров А. В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей: Учеб. пособие для вузов. – М.: МИСИС, 2000. – 272 с.

5. Патент ВУ 2182 У, 30.09.2005 г.

6. Егоров А. В. Электроплавильные печи черной металлургии: Учеб. для вузов. – М.: Металлургия, 1985. С. 50–55, 60–62, 68, 77–79, 85–88.

УДК 669.1.054.85

Д. Н. АНДРИАНОВ, канд. техн. наук (РУП «БМЗ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДОРОДА ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ НА КАЧЕСТВО КАТАНОЙ И НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

Одним из самых распространенных пороков непрерывнолитых и катаных трубных заготовок является образование флокенов. Флокены представляют собой беспорядочно расположенные трещины различной длины (рис. 1). Расположены они, как правило, в центральной части непрерывнолитой заготовки. В изломе закаленного образца флокены имеют вид светлых пятен округлой или овальной

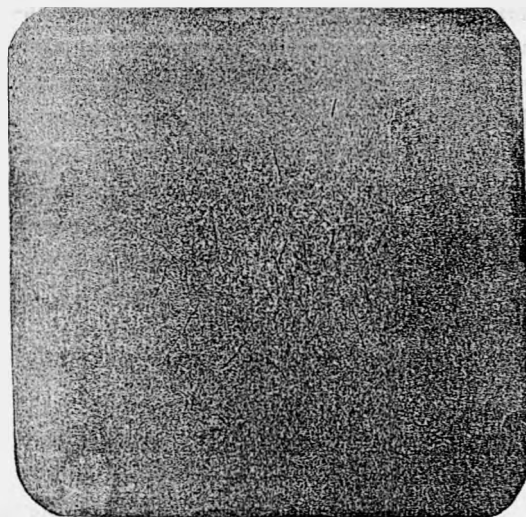


Рис. 1. Флокены – поперечный темплет

формы, отличающихся кристаллическим строением. Поверхность флокена блестящая, более крупнокристаллическая, излом же самого образца матовый, волокнистый. На микрошлифах флокены имеют вид зигзагообразных трещин.

Проблема флокенов в стали до настоящего времени является одной из актуальнейших проблем при получении качественных сталей и за-