

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного
технического университета им. Г. И. Носова

№ 3 (15) сентябрь 2006 г.

Издается с марта 2003 года

Редакционная коллегия:

Главный редактор:

Б.А. Никифоров – проф., д-р техн. наук.

Заместители:

Г.С. Гун – проф., д-р техн. наук;

М.В. Чукин – проф., д-р техн. наук (ответственный редактор).

Члены редколлегии:

В.А. Бигеев – проф., д-р техн. наук;

М.В. Бушманова – проф., канд. физ.-мат. наук;

К.Н. Еремин – проф., д-р техн. наук;

С.Е. Гавришев – проф., д-р техн. наук;

А.С. Карандаев – проф., д-р техн. наук;

В.М. Колокольцев – проф., д-р техн. наук;

О.В. Лешер – проф., д-р пед. наук;

И.Ю. Мезин – проф., д-р техн. наук;

С.И. Платов – проф., д-р техн. наук;

В.М. Салганик – проф., д-р техн. наук;

А.С. Сарваров – проф., д-р техн. наук (редактор номера).

© Журнал «Вестник МГТУ им. Г.И.Носова», 2006

Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Тел.: (3519) 29-85-17

Факс (3519) 23-57-60

E-mail: mgtu@mgtu.ru; nis@mgtu.ru

Журнал подготовлен к печати Издательским центром
МГТУ им. Г.И.Носова.

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ.

Подписано к печати 18.09.2006.

Заказ 730. Тираж 500 экз.



СОДЕРЖАНИЕ

<i>Сарваров А. С., Завьялов Е. А., Стригов А. Д.</i> Реализация специальных режимов асинхронного электропривода с тиристорным управлением при питании от однофазной сети	3
<i>Карандаев А. С., Корнилов Г. П., Храмшин Т. Р., Шеметов А. Н., Николаев А. А.</i> Анализ показателей качества электроэнергии в системе промышленного электроснабжения с мощными тиристорными электроприводами	6
<i>Копцев В. В., Морозов А. П.</i> Совершенствование и развитие конструкций нагревательных колпаковых печей	11
<i>Баранкова И. И., Носова Т. Н., Пермьякова О. В.</i> Использование наукоемких технологий управления качеством знаний в высшей школе по дисциплине «Информатика»	14
<i>Девятченко Л. Д., Тимиргалеева Л. Ш.</i> Анализ сопряженности технологических нарушений и состояний аварийности на машинах непрерывной разливки стали	15
<i>Дубский Г. А., Дубская Т. Я., Бутаков С. А., Егорова Л. Г.</i> Экспериментально-теоретическое исследование радиационного и пластодеформационного увеличения предела пластичности меди и никеля	23
<i>Евстигнеев В. Л., Майорова Т. В., Рябчиков М. Ю.</i> Применение балансовой модели для стабилизации показателей доменной плавки	30
<i>Игуменцев В. А., Малафеев А. В., Зиновьев В. В.</i> Расчет установившегося режима в задаче диспетчерского управления системой электроснабжения усовершенствованным методом последовательного эквивалентирования	33
<i>Ильясов Р. С., Главатских М. Ю., Савченко Ю. И.</i> Электромагнитная генерация акустических волн вблизи магнитных фазовых переходов 2-го рода «порядок–беспорядок» и «порядок–порядок»	37
<i>Боровкова М. А., Ильясов Р. С., Федорова Н. В., Бабкин С. Э., Загайнов А. В.</i> Динамические магнитные, магнитоупругие и упругие свойства аморфного сплава Fe–Cu–Nb–Si–В после термической кристаллизации	42
<i>Бабкин С. Э., Величко В. В., Боровкова М. А., Ильясов Р. С., Вострокнутова О. Н.</i> Учет температуры и приложенных напряжений при неразрушающем контроле методом ЭМАП поверхностных волн	46
<i>Кочкин Ю. П., Чернега А. Х., Шевченко С. Г.</i> Изменение термоэлектродвижущей силы, обусловленной упругой деформацией стальной проволоки при растяжении	49
<i>Логунова О. С., Нуров Х. Х., Павлов В. В., Суспицын В. Г.</i> Организация автоматизированного рабочего места для оценки качества макроструктуры непрерывнолитых сортовых заготовок	51
<i>Радионов А. А.</i> Автоматизированный электропривод совмещенного прокатно-волочильного стана: основные задачи и направления разработки	55
Рефераты	59
Сведения об авторах	62
Инновационные разработки энергетического факультета	64
Инновационные разработки факультета автоматики и вычислительной техники	66

УДК 621.313.333.07

А. С. Сарваров, Е. А. Завьялов, А. Д. Стригов

РЕАЛИЗАЦИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТИРИСТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ

Механизмы многих технологических агрегатов и общепромышленных установок нуждаются в осуществлении специальных режимов эксплуатации асинхронных электроприводов на пониженной частоте вращения и в отдельных случаях на «ползучей» скорости. Например, при снятии технологических нагрузок в условиях низких температур желательно сохранить ход механизмов на пониженной скорости с минимальным электропотреблением, что позволяет предотвратить смерзание смазки и облегчить последующий пуск электропривода. Кроме того, в процессе монтажа механического оборудования часто возникает необходимость прокрутки электропривода на «малом ходу». В этом же режиме достигаются наилучшие условия для обкатки подшипниковых узлов.

Потребность в подобных режимах имеет место при наладке агрегатов большой мощности, электроприводы которых реализованы на базе высоковольтных асинхронных и синхронных электродвигателей. К ним относятся шаровые мельницы, вращающиеся печи и другие механизмы горно-обогатительных предприятий и цементно-доломитового производства.

В данной работе исследована возможность осуществления указанных режимов при питании АД от однофазной сети пониженного напряжения, что позволяет в высоковольтных электроприводах использовать низковольтное оборудование. В основе работы тиристорного устройства (рис. 1, а) лежат алгоритмы формирования пониженной частоты напряжения на АД, реализованные при однофазном питании*. Наглядно алгоритмы управления вентилями представляются в системе результирующих векторов (рис. 1, б).

В зависимости от полярности полуволны сетевого напряжения любое положение обобщенного вектора формируется подачей управляющих импульсов на один или два тиристора. На-

пример, положение вектора «а» (см. рис. 1, б) может быть сформировано двумя способами: либо подачей питания от «положительной» полуволны на фазу «а» двигателя, либо на интервале «отрицательной» полуволны управляющие импульсы подать на тиристоры, обеспечивающие прохождение тока в фазных обмотках «в» и «с». При смене комбинаций тиристоров в определенной последовательности обеспечивается заданная частота и направление вращения результирующего вектора напряжения. Максимальная частота первой гармоники напряжения, которая может быть получена, при этом составляет $f_1/3$, где f_1 – частота сетевого напряжения. Другие возможные значения пониженной частоты определяются по формуле $f_1/3n$, где $n = 1, 2, 3, 4$ и т.д.

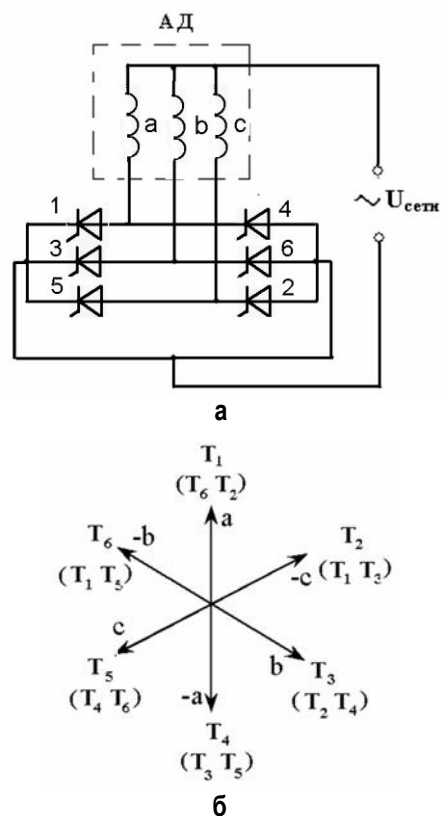


Рис. 1. Схема однофазного НПЧ и положения обобщенного вектора напряжения в зависимости от состояния тиристоров

* Пат. 2095933 Российская Федерация, МПК^б Н 02 Р 7/42. Способ регулирования скорости асинхронного двигателя [Текст] / И.А. Селиванов, А.С. Сарваров, Е.А. Завьялов; заявитель и патентообладатель Магнитогорск. гос. техн. ун-т. № 96104007/07; заявл. 28.02.96; опубл. 10.11.97, Бюл. № 31. 4 с.: ил.

В работе рассмотрены случаи формирования значений выходной частоты $f_1/3$, $f_1/6$, $f_1/9$ и $f_1/12$, которые поясняются временными диаграммами фазных напряжений, приведенными на рис. 2.

На основе известных в теории электрических машин уравнений была разработана компьютерная модель предложенной системы асинхронного электропривода в среде Delphi. Типовые исследования, проведенные на модели, показали реализуемость предложенных алгоритмов формирования указанных ступеней частоты.

В качестве примера на рис. 3 показан фрагмент расчетных осциллограмм напряжения, полученных на модели при формировании частоты $f_1/6$.

Необходимо отметить, что расчетные кривые и реальные осциллограммы токов и напряжений по характеру изменения во времени также достаточно близки. Они приведены в каче-

стве примера на рис. 4 для случая формирования частоты $f_1/3$.

Основные исследования АД в предложенной системе электропривода на модели и экспериментальной установке были проведены для случая питания пониженным напряжением $U=36$ В. Это обусловлено тем, что практическую значимость имеет реализация специальных режимов в высоковольтных электроприводах при питании напряжением (менее 1000 В). На рис. 5 приведены расчетные осциллограммы, соответствующие случаю питания АД пониженным напряжением. Исследования позволили оценить влияние питания пониженным напряжением на нагрузочную способность электропривода по моменту. По мере снижения частоты, как показали исследования, проведенные для ступеней значений частоты $1/6f_1$; $1/9f_1$ и $1/12f_1$ возможности системы

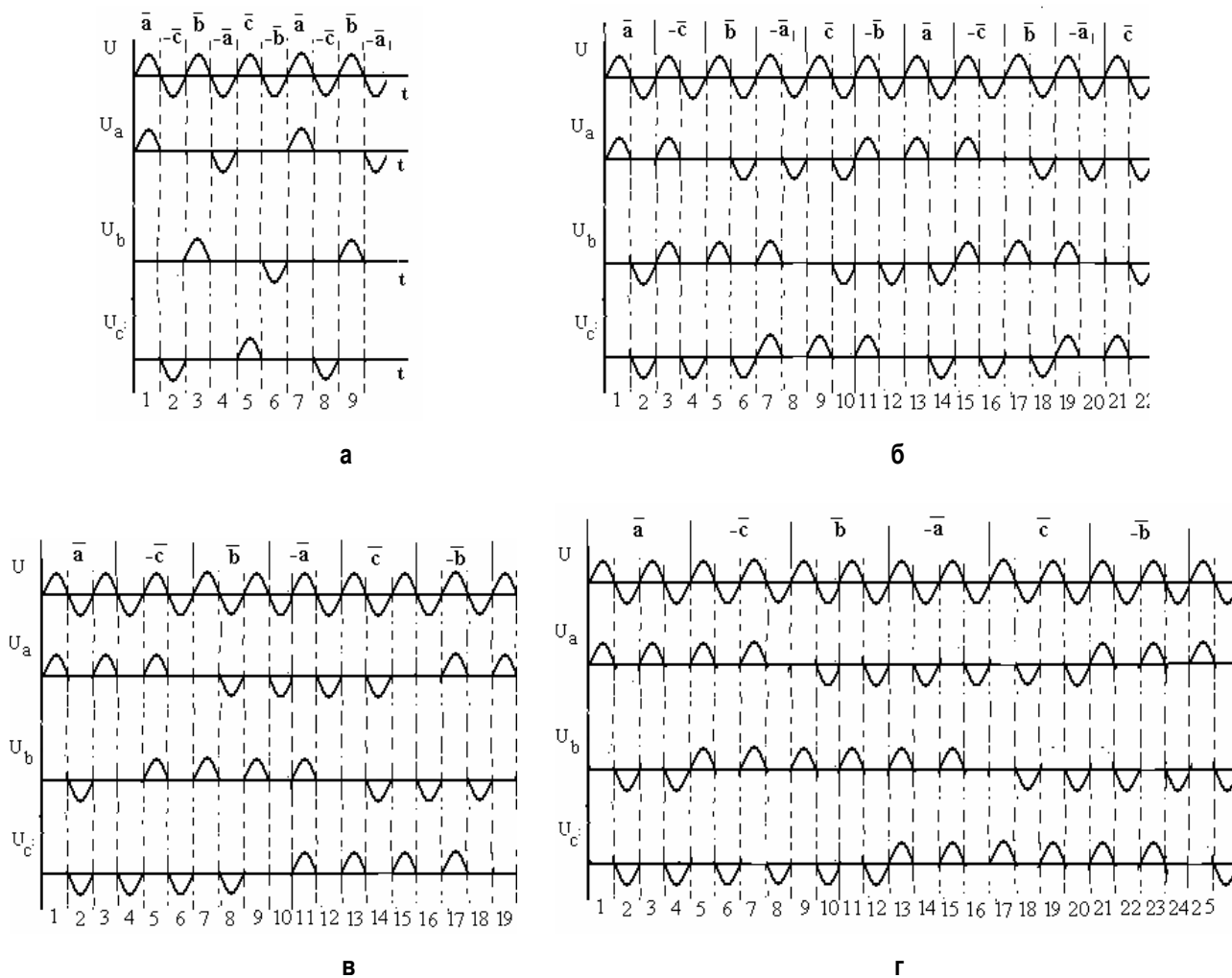


Рис. 2. Временные диаграммы напряжений:
 а – при формировании значения частоты $f_1/3$; б – $f_1/6$; в – $f_2=f_1/9$; г – $f_2=f_1/12$

электропривода по нагрузочной способности заметно возрастают.

При частоте $1/3 f_1$ режим работы электропривода соответствует закону частотного регулирования при вентиляторной нагрузке, а при более низких значениях частоты отношение U/f_1^2 заметно возрастает, что привело соответственно к росту нагрузочной способности АД. В частности, при частоте $1/6f_1$ допустимый момент нагрузки достигает значений $(0,18-0,2)M_n$, а при значениях частоты $1/9f_1$ и $1/12f_1$ его величина соответственно повышается до значений $0,27-0,3$ и $(0,33-0,35) M_n$.

В процессе моделирования был проведен также гармонический анализ токов и напряжений

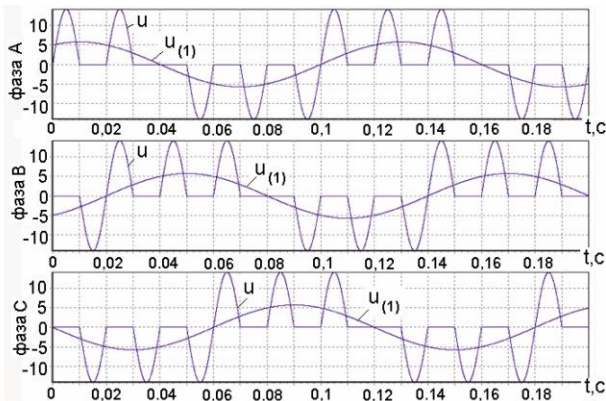
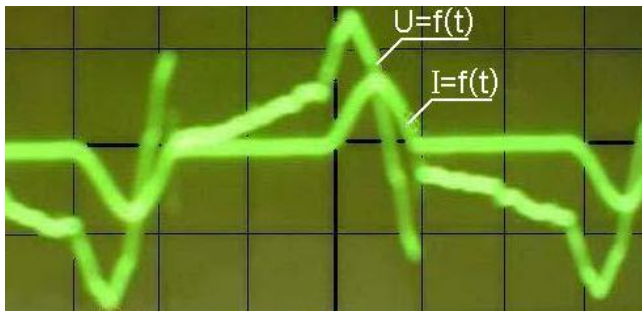
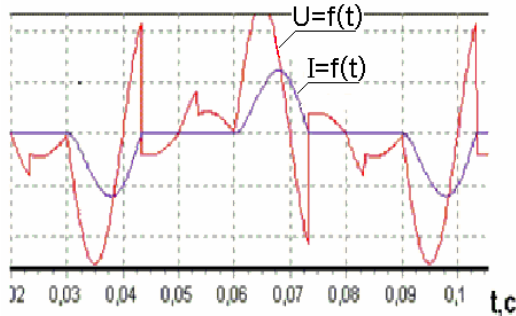


Рис. 3. Расчетные осциллограммы процесса формирования частоты $1/6f_c$

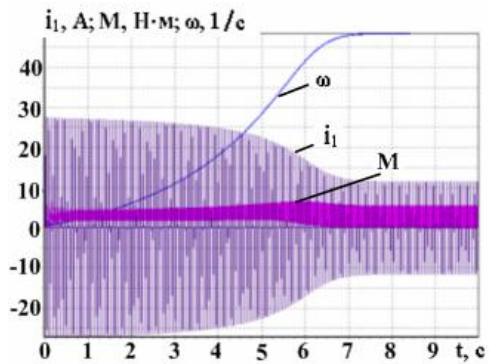


а

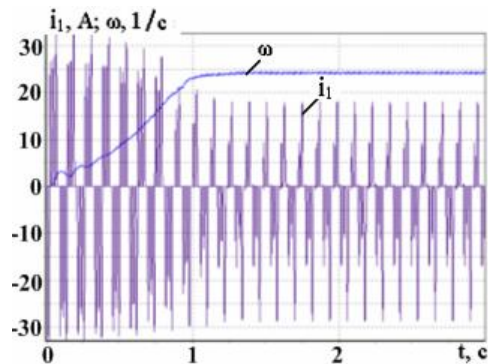


б

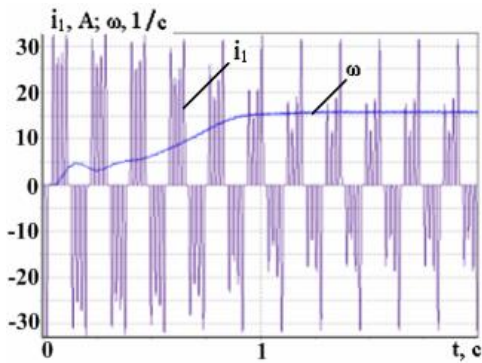
Рис. 4. Реальные и расчетные осциллограммы при формировании частоты $f_1/3$



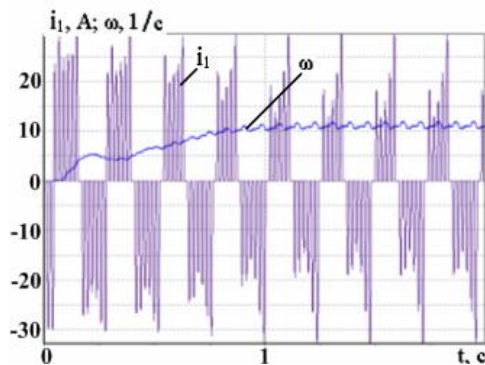
а



б



в



г

Рис. 5. Расчетные осциллограммы при формировании различных ступеней частоты: а – при $f_1/3$; б – при $f_1/6$; в – при $f_1/9$; г – $f_1/12$

двигателя как при питании номинальным, так пониженным напряжением. По результатам проведенных исследований установлено также, что в режиме питания пониженным напряжением отмечается улучшение гармонического состава тока и напряжения. Это обусловлено в первую очередь тем, что при пониженном напряжении работа тиристорного устройства осуществляется в области малых углов управления. В частности, все расчетные осциллограммы (см. рис. 5) были получены при задании угла управления $\alpha=5^\circ$. Независимо от величины питающего напряжения, соответствующие значениям частоты $1/6f_1$; $1/9f_1$ и $1/12f_1$ 6-я, 9-я и 12-я гармоники являются преобладающими. Коэффициенты искажения синусоидальности тока во всех рассмотренных случаях находятся в пределах 0,56–0,68, а величины действующих значений токов не превышают номинального значения тока статора АД. Наилучшая нагрузочная способность по моменту достигается при частоте $1/12f_1$, что позволяет использовать данный режим как основной для прокрутки механизмов в наладочных режимах. По результатам моделирования построены механические характеристики асинхронного электропривода (рис. 6). Там же для сопоставления построены и экспериментальные механические характеристики.

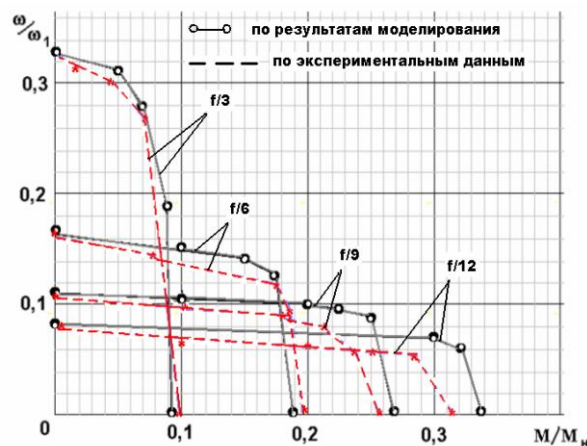


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные механические характеристики АД

Приведенные характеристики получены при задании угла $\alpha=0^\circ$. Сопоставляя расчетные и экспериментальные данные, можно отметить, что они практически совпадают. Отклонения в основных точках сопоставления не превышают 10%. Все это позволяет сделать вывод о том, что предложенные алгоритмы реализуемы и могут быть использованы для создания специальных режимов асинхронного электропривода с тиристорным управлением при питании от однофазной сети.

УДК [621.3.015.2 + 621.316.94 + 621.317.757]: 621.311.1

А. С. Карандаев, Г. П. Корнилов, Т. Р. Храмшин, А. Н. Шеметов, А. А. Николаев

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С МОЩНЫМИ ТИРИСТОРНЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Необходимым условием нормального электроснабжения промышленного предприятия является надежное обеспечение его электроприемников электрической энергией в необходимом количестве и определенного качества, которое регламентируется ГОСТ 13109-97 [1]. При этом основное влияние на качество электроэнергии оказывают электроприемники с нелинейными вольтамперными характеристиками – тиристорные преобразовательные агрегаты, применяемые для питания мощных электроприводов постоянного тока.

Характерным примером является система электроснабжения листопрокатных цехов (рис. 1), где от одного источника питания осуществляется электроснабжение «спокойных» (насосов гидро-

сбива, вентиляторов и т.п.), и резкопеременных нагрузок (клетей прокатного стана). Поэтому в распределительных сетях цеха наблюдаются колебания и отклонения напряжения, источниками которых являются тиристорные преобразователи главных приводов клетей. Кроме того, указанные агрегаты имеют невысокий коэффициент мощности, что вызывает дефицит реактивной мощности в системе.

Задачей данной работы является оценка качества электроэнергии в реальных условиях работы прокатного стана, а также обоснование применения и выбор оптимальных параметров фильтрокомпенсирующих устройств в распределительной сети напряжения 6–10 кВ на примере листопрокатного цеха № 10 (ЛПЦ-10) ОАО «ММК».

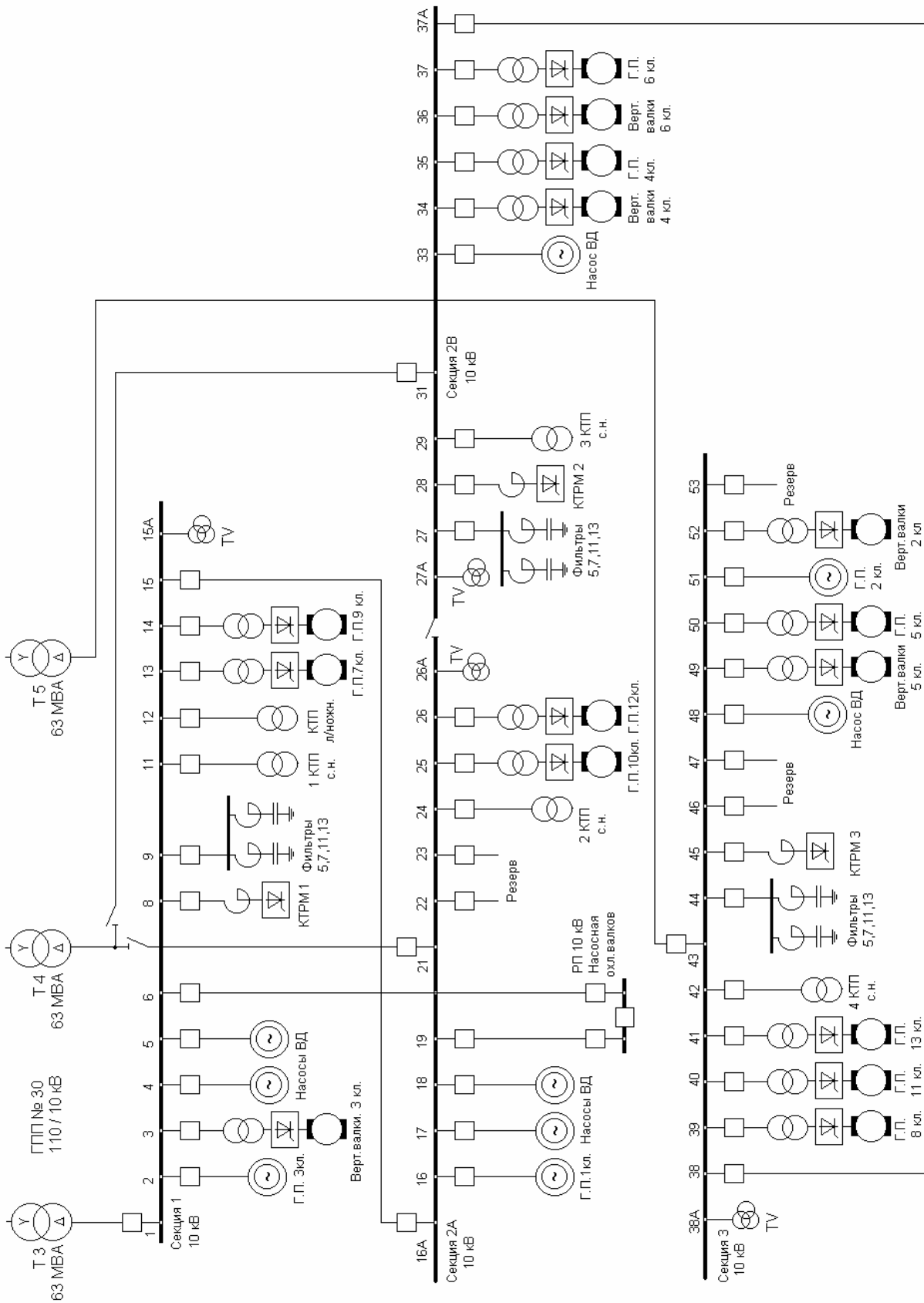


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения ЛПЦ-10 ОАО «ММК»

Для этого совместно со специалистами ЦЭТЛ производилась запись мгновенных значений тока и напряжения с использованием регистратора электрических сигналов «РЭС-3» (частота дискретизации 4,5 кГц) с последующей обработкой на ЭВМ. Схема подключения прибора и полу-

ченные с его помощью осциллограммы токов и напряжений показаны на рис. 2.

На рис. 2, б хорошо видно отклонение формы токов и напряжений на всех секциях РУ-10 кВ от синусоиды в результате преобладания нелинейной нагрузки – тиристорных преобразователей.

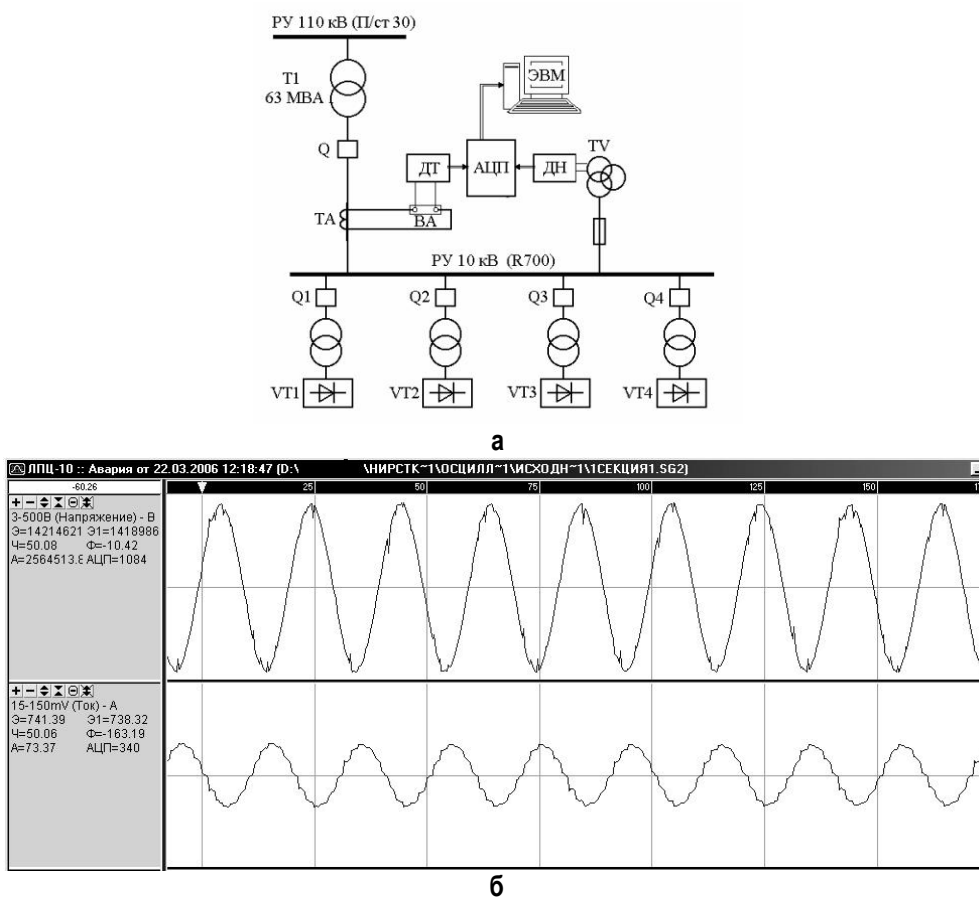


Рис. 2 Схема подключения прибора РЭС-3 (а) для записи осциллограмм токов и напряжений (б)

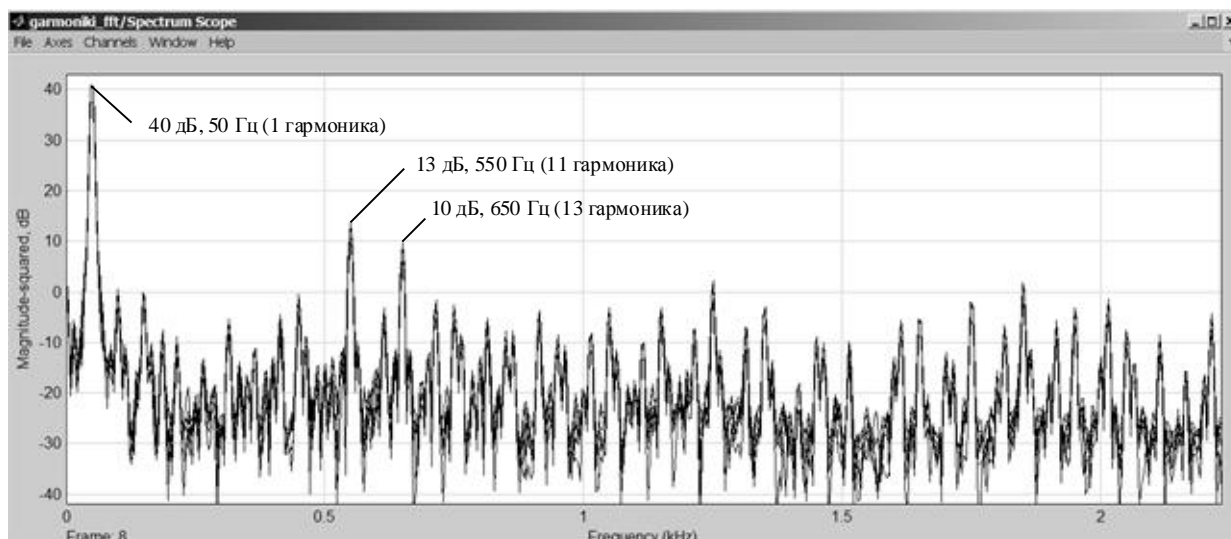


Рис. 3 Спектрограмма токов первой секции РУ-10 кВ

Искажения питающего напряжения неизбежно проявляются при работе вентиляльного преобразователя, поскольку в процессе коммутации вентилей соседних фаз происходит кратковременное короткое замыкание. В результате в кривой напряжения появляются коммутационные искажения, форма, величина и количество которых зависят от схемы выпрямления, мощности преобразователей и параметров питающей сети.

Как видно на графиках, эти искажения имеют периодический характер, что позволяет проводить их гармонический анализ. При этом любая периодическая функция времени $f(\omega t)$ может быть представлена тригонометрическим рядом Фурье:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{v=1}^{\infty} [a_v \cos(v\omega t) + b_v \sin(v\omega t)], \quad (1)$$

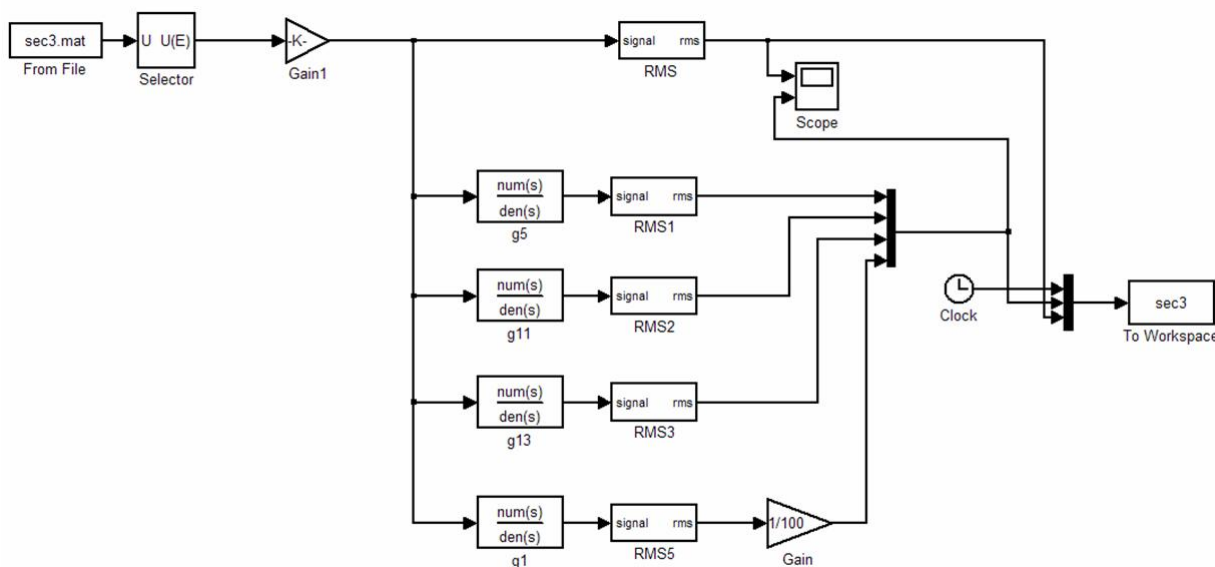


Рис. 4. Структурная схема выделения действующих значений токов высших гармоник в среде Matlab Simulink

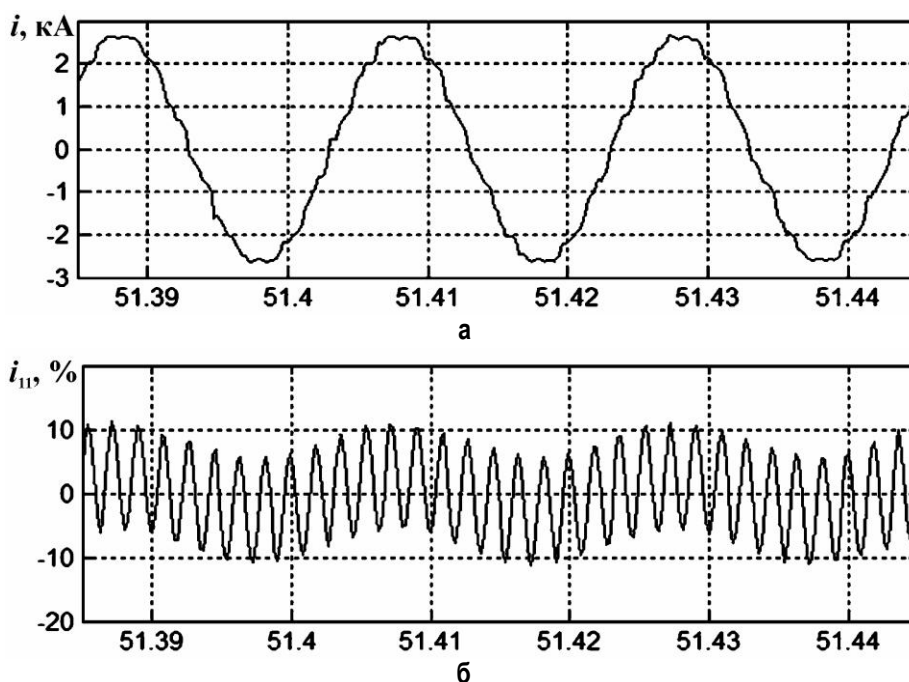


Рис. 5. Выделение высших гармонических составляющих несинусоидального периодического сигнала: а – исходный сигнал с частотой 50 Гц; б – выделенная синусоида 11-й гармоники

где A_0 – постоянная составляющая; ν – номер гармоники; a_ν, b_ν – коэффициенты ряда Фурье.

При $\nu=1$ из выражения (1) определяется первая (основная) гармоника. Остальные члены ряда с $\nu \geq 2$ называют высшими гармониками. На основании этих данных строится диаграмма спектра гармоник, по которой выделяются наиболее значимые частоты. Токи этих гармоник должны быть скомпенсированы за счет резонансных фильтров, настроенных на выделенные частоты. Подобные расчеты выполнялись в среде Matlab [2] по специально разработанным программам.

Так, с помощью спектроанализатора были установлены наиболее значимые гармоники, присутствующие в кривой тока, – это 5-я, 11-я и 13-я (рис. 3).

Принцип работы спектроанализатора основан на быстром преобразовании Фурье искомого сигнала на заданном интервале, длительность которого составляет 10–15 периодов основной частоты. Использование наложения на исходный сигнал так называемого «окна Хана» позволяет ослабить краевой эффект, возникающий при неравенстве периода основной частоты периоду выборки. Таким образом, спектроанализатор позволяет лишь выделить наиболее значимые гармоники, но не дает возможность проследить их изменение с течением времени.

Для решения этой задачи можно использовать резонансный фильтр, настроенный на частоту выделяемой гармоники. Структурная схема выделения действующих значений токов 5-й, 11-й и 13-й гармоник представлена на рис. 4.

Передаточные функции фильтра ν -й гармоники в общем виде:

$$W_\nu(p) = \frac{p^2 + 2\omega\nu\xi_1 p + (\omega\nu)^2}{p^2 + 2\omega\nu\xi_2 p + (\omega\nu)^2}, \quad (2)$$

где ξ_1 и ξ_2 – коэффициенты демпфирования; $\omega=314$ рад/с – круговая частота питающей сети.

Работу фильтра по выделению 11-й гармоники иллюстрирует рис. 5.

На рис. 6 приведены осциллограммы действующих значений тока (а) и его гармонических составляющих (б) на интервале времени, равном 5 мин, для одной из секций РУ-10 кВ ЛПЦ-10 ОАО «ММК». Их анализ позволил сделать следующие выводы:

1. В кривой тока основной гармоники наблюдаются циклические изменения с периодом 50–100 с, определяемым технологическим циклом прокатки. Причем на первой секции РУ-10 кВ четко прослеживается работа синхронного двигателя привода черновой клетки с характерным затуханием тока во времени.

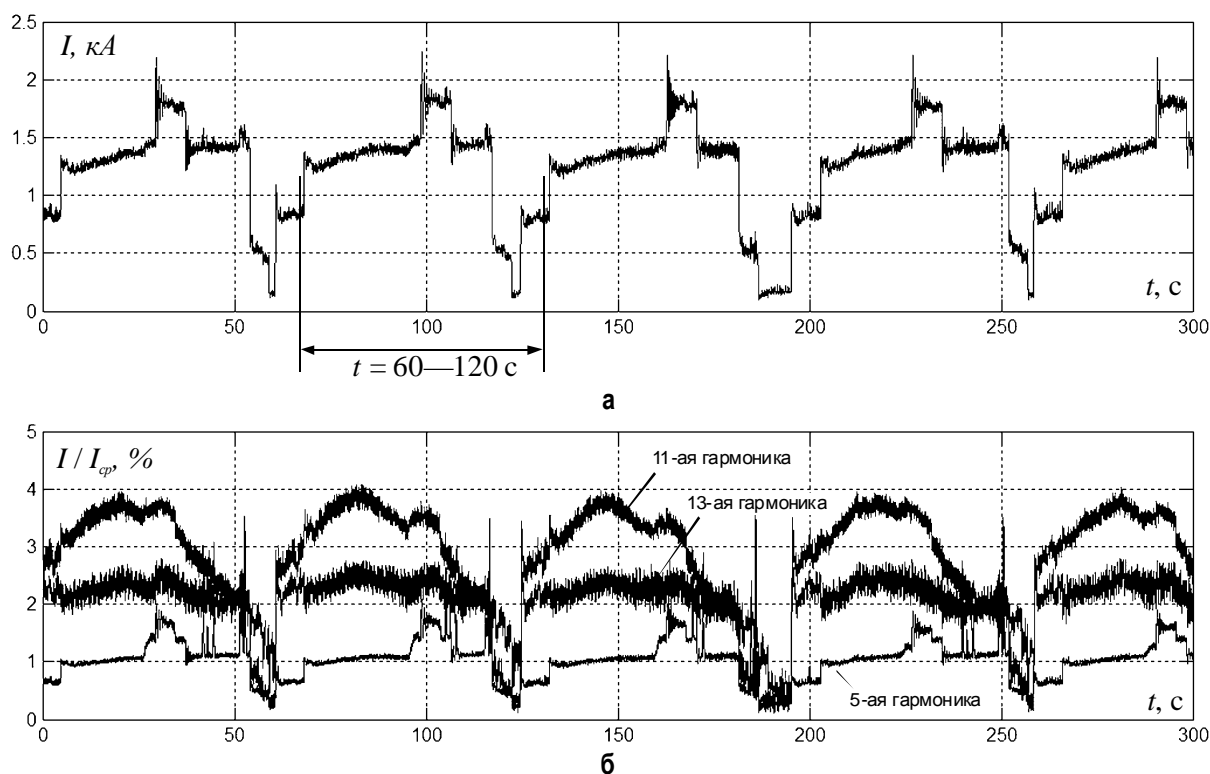


Рис. 6. Осциллограмма действующих значений тока (а) и его гармонических составляющих (б)

2. Характер изменения уровня высших гармонических в целом соответствует изменению тока основной гармоники. По всем секциям уровень 5-й гармоники не превышает 1%, 13-й – не более 2% и 11-й – не более 5%. Уровень 7-й гармоники – менее 1%, поэтому в процессе анализа она не исследовалась.

3. Наблюдается явная зависимость между токами 5-й и основной гармоник, однако на некоторых участках диаграммы при сбросе нагрузки возникают выбросы токов 5-й гармоники. При этом на 11-ю и 13-ю гармоники эти набросы нагрузки не оказывают никакого влияния. Поведение

13-й гармоники отличается большей стабильностью по отношению к 11-й, и соответственно выбор и настройка фильтров могут быть произведены по среднему току.

Таким образом, предложенный метод осциллографирования и обработки параметров узла нагрузки позволяет с помощью простейших программно-технических средств оценить не только общий уровень их несинусоидальности, но также отслеживать динамику процесса искажения тока и напряжения и использовать эти данные при управлении фильтро-компенсирующими устройствами в режиме реального времени.

Библиографический список

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети / Под общ. ред. А.А. Федорова. М.: Энергия, 1980.
3. Гультияев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс. СПб.: Питер, 2001.

УДК 662.942.2:621.783.245

В. В. Копцев, А. П. Морозов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИЙ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛПАКОВЫХ ПЕЧЕЙ

Технологические процессы, реализуемые на основе нагрева, занимают одно из ведущих мест в промышленном производстве. Развитие производства сопровождается высокими темпами потребления топлива и других видов энергии. В связи с этим проблема повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов приобретает важное значение. Сбережение теплоты энергии выступает как мощный рычаг совершенствования топливно-энергетического комплекса страны и как один из важнейших факторов, стимулирующих дальнейший общий прогресс промышленного производства.

Следовательно, стремясь обеспечить прогрессирующее энергосбережение, следует непрерывно оптимизировать процесс теплоотдачи к нагреваемому материалу, непрерывно совершенствовать тепловую работу и конструкции нагревательных устройств, используемых в металлургии и машиностроении [1].

На предприятиях черной металлургии РФ одним из крупнейших потребителей газообразного топлива (природного газа) являются колпаковые печи, в которых проходит термообработку значительная часть стали. Большое количество колпаковых печей делает невозможным их быструю

замену на новые агрегаты, реализующие более прогрессивную водородную технологию. Поэтому необходимо совершенствовать существующие технологии и агрегаты на основе их модернизации и реконструкции, разработки и внедрения методов и средств, обеспечивающих повышение эффективности их работы, и, прежде всего, снижение энергетических затрат.

Тепловой процесс, осуществляемый в колпаковых печах, формирует требования к рациональной конфигурации зоны теплообмена в районе горелочного пояса, которая в конечном счете определяет основные параметры горелочных устройств. Таким образом, при предлагаемом подходе технология закладывает необходимые требования к горелочным устройствам, в частности определяет их необходимые параметры.

Перспективы разработки конструкции и улучшения эксплуатации колпаковых печей для отжига рулонов сводятся к сокращению длительности нагрева и охлаждения садки рулонов. Это сокращение можно получить, улучшив теплофизические характеристики рулонов, а также совершенствуя конструкцию печей.

С теплотехнической точки зрения одним из возможных мероприятий экономии топлива являются мероприятия по интенсификации теп-

лообмена. Из всех способов интенсификации теплообмена, с соблюдением условия равномерности нагрева металла, можно выделить: косвенные – непосредственно не влияющие на источники теплоты и прямые – меняющие характер генерации теплоты и ее восприятие металлом.

К косвенным способам повышения равномерности нагрева металла в колпаковых печах можно отнести применение различного рода теплоотражающих элементов в виде экранов, промежуточных кожухов и двойных муфелей. Например, в колпаковой печи [2], заявленной фирмой Син-Ниппон сэйтэцу (Япония), муфель охвачен промежуточным кожухом, подвешенным к своду колпака с возможностью вращения, причем нижний край кожуха достигает уровня (или несколько ниже) установки горелок.

В колпаковой печи [3], предложенной фирмой Ruhrgas AG, содержащей колпак и муфель, установленные на стенде с циркуляционным вентилятором, и горелки, расположенные в нижней части колпака, для предотвращения локально перегрева садки нижняя часть муфеля экранирована теплоотражающими элементами.

Для интенсификации подвода тепла и повышения равномерности его распределения по поверхности муфеля предлагались различные технические решения. Например, на металлургическом комбинате «Нерманн Мастерн» (ГДР) рассматривалась возможность применения схемы колпаковой печи с организацией нескольких зон горения (на трех уровнях) со спиралеобразным расположением горелок [4]. Отвод дымовых газов производился сверху нагревательного колпака на определенной его высоте через тангенциальные дымоотводы в рекуператоры для нагрева воздуха.

С целью интенсификации теплообмена между колпаком и муфелем и сокращения времени отжига садки на ММК предлагался нагревательный колпак [5] для отжига плотносмотанных рулонов, содержащий футерованный кожух с дымоотводящим отверстием в центре плоского свода, соединенным дымоотводящими каналами со струйным рекуператором, а также горелки, установленные в два яруса тангенциально в нижней части колпака, причем последний снабжен на определенном расстоянии по высоте укрепленными на его внутренней поверхности кольцами-турбулизаторами в виде набора кольцевых диафрагм.

Для повышения равномерности нагрева садки на Мариупольском металлургическом комбинате предлагалось в нагревательном кол-

паке колпаковой печи горелки перенести в верхнюю часть, а дымоотводы – в нижнюю [6]. С этой же целью в колпаковой газовой печи, разработанной специалистами Днепропетровского металлургического института [7], колпак в верхней части дополнительно был снабжен горелками и эжекторами с возможностью их реверсирования на нижние горелки.

Для повышения эффективности и равномерности нагрева на высоте стопы и экономии топлива предлагались различные схемы рециркуляции отходящих газов обратно в подмуфельное пространство. Например, в колпаковой печи для отжига стопы рулонов, разработанной Институтом черной металлургии (Россия), предложена конструкция нагревательного колпака [8], содержащего: открытый снизу корпус с футеровкой, горелки для сжигания топлива, расположенные в нижней части корпуса, устройство для отвода продуктов горения с помощью эжектора при подаче сжатого воздуха в дымозаборный канал, и дымозаборников, выполненных в виде колена с диффузором, соединяющего полость корпуса с устройством для отвода продуктов горения. При этом колпак снабжен дополнительно патрубком для отбора продуктов сгорания из его полости и возврата их с дымовоздушной смесью в полость корпуса ниже уровня размещения горелок при отношении диаметров дымозаборного колена и патрубка, составляющем 1,5–2,5.

Имеются попытки интенсификации теплообмена на внутренней поверхности стопы рулонов, например с помощью муфелей с центральной тупиковой или проходной трубой.

С целью интенсификации теплообмена на внутренней поверхности рулонов на ММК предложена [9] колпаковая печь, в которой нагревательный колпак снабжен центральной отсасывающей трубой для забора продуктов горения в нижней части печи, которая входит ососно во внутренний цилиндр, выполненный в муфеле. Для дальнейшего повышения конвективной теплоотдачи внутри рулона специалисты ММК предложили установить на стенде внутри рулонов полый цилиндр со спиральными ребрами на его наружной боковой глухой поверхности [10].

В Днепропетровском металлургическом институте предложена колпаковая печь [11] с муфелем и с центральной тупиковой трубой, проходящей внутри рулонов. В другом варианте колпаковой печи [12], разработанной в Укр. НИИЧМ (Украина), муфель имеет внутренний цилиндр для прохода продуктов сгорания, удаляемых через трубу в стенде с помощью эжектора.

Имеются предложения по интенсификации теплообмена между муфелем и садкой воздействием на циркуляцию. Например, в колпаковой печи для отжига металла [13], разработанной на ММК, для усиления циркуляции защитного газа предлагается использовать дополнительный эжектор. В способе отжига рулонов в колпаковых печах [14], предложенным Институтом черной металлургии (Россия), осуществляется периодическое изменение направления циркуляции защитного газа. В колпаковой печи [15], заявленной Харьковским филиалом ВНИИЭТО, используются три циркуляционных вентилятора, установленных в вертикальной плоскости, причем ось выходного патрубка каждого вентилятора расположена под углом к горизонтальной плоскости.

Для интенсификации теплообмена к муфелю и от него к защитному газу предложено наружную или внутреннюю поверхность муфеля снабжать различными элементами. Например, в Харьковском филиале ВНИИЭТО (Украина) предложены колпаковые печи [16], в которых муфель выполнен с элементами теплообмена в виде полых тороидов, соединенных полыми перемычками, причем тороид с внешней стороны муфеля частично заполнен промежуточным теплоносителем. В другом варианте колпаковой печи [17] муфель снабжают элементами теплообмена в виде отрезков проволоки, установленных на его наружной и внутренней поверхностях с целью повышения производительности путем интенсификации лучистого и конвективного теплообмена.

Предложения по интенсификации теплообмена в период охлаждения садки связаны с конструкциями муфелей с ускоренным охлаждением и с применением теплообменников для охлаждения циркулирующего защитного газа. Например, в колпаковой печи [18], предложенной заводом «Красная Этна» (Россия), исполь-

зуется муфель с центральной тупиковой трубой для подачи охладителя. В колпаковой печи [19], заявленной Днепропетровским металлургическим институтом, при охлаждении садки используют муфель с центральной тупиковой трубой и падают через нее охлаждающую воду и воздух.

Для интенсификации теплообмена и повышения производительности представляет интерес колпаковая печь [20], разработанная фирмой Сумигото киндзоку когё (Япония), в которой в период нагрева защитный газ нагревают в вынесенном теплообменнике с помощью горелки, а продукты сгорания из него утилизируют при подаче между муфелем и колпаком.

Поэтому, анализируя вышеизложенный опыт проектирования печей и интенсификации теплообмена, более совершенная конструкция колпаковой печи, а именно нагревательного колпака, по сравнению с существующей конструкцией колпаковой печи Стальпроекта должна обладать:

– высокой скоростью истечения природного газа через сопло горелочного устройства для создания высокоэнергетического потока в целях обеспечения требуемой длины факела – не менее 60 калибров (относительных расстояний x/d_0 , x – расстояние по оси от горелочного сопла диаметром d_0 ;

– возможностью точного регулирования величины коэффициента расхода воздуха в пределах 1,03–1,20.

Более рациональная и оптимальная конструкция должна обеспечить высокую степень эжекции спутного потока воздуха для лучшего смешения его с топливом, создать конфигурацию зоны горения, обеспечивающей наибольшее «прилегание» поверхности факела к внутренней поверхности футеровки печи и поверхности муфеля, а также равномерное горение по всей длине факела при требуемой температуре для обеспечения необходимых условий теплообмена.

Библиографический список

1. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки / И.И. Перелетов, Л.А. Бровкин, Ю.И. Розенгарт и др.; Под ред. А.Д. Ключникова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 336 с.
2. Заявка 57-42134 Япония, С21D 9/673.
3. Заявка 3444038 ФРГ, С21D 9/663.
4. Пат. 252665 ГДР, F27B 14/00.
5. А. с. 1337429 СССР, С21D 9/673.
6. Пат. 62352 Украина, F27B 14/00.
7. А. с. 403774 СССР, С21D 9/00, F27B 11/00.
8. А. с. 1339150 СССР, С21D 9/673.
9. А. с. 365388 СССР, С21D 9/00, F27B 9/10.
10. А. с. 1657535 СССР, С21D 9/673.
11. А. с. 924128 СССР, С21D 9/673.
12. А. с. 1208444 СССР, F27B 11/00.
13. А. с. 1478022 СССР, F27B 11/00.
14. А. с. 1765215 СССР, С21D 9/663.
15. А. с. 1766987 СССР, С21D 9/673.
16. А. с. 1705371 СССР, С21D 9/673, F27B 5/10.
17. А. с. 1770409 СССР, С21D 9/673, F27B 5/10.
18. А. с. 1328394 СССР, С21D 9/673.
19. А. с. 1652365 СССР, С21D 9/673.
20. Заявка 63-20287 Япония, С 21D 9/663.

И. И. Баранкова, Т. Н. Носова, О. В. Пермякова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЗНАНИЙ В ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ИНФОРМАТИКА»

Традиционными методами обучения студентов в высшей школе до недавнего времени являлись собеседования, защиты индивидуальных проектов с теоретическим обоснованием алгоритма решения поставленной задачи, письменные рубежные контрольные работы.

Очевидно, что старая классическая схема обучения требует некоторых изменений и более интенсивного внедрения инновационных разработок в учебный процесс.

Преподавателями кафедры информатики информационных технологий ведется работа по внедрению электронных технологий в процесс обучения.

Лекции ведущих преподавателей в электронном виде для удобства усвоения студентами разбиты на разделы, соответствующие различным уровням подготовки. При донесении теоретического материала до учащихся используются различные методологические формы: традиционное чтение лекций, выдача дополнительного лекционного материала в электронном виде, планируется расположение материала на сайтах и в локальных сетях университета, работа с электронным библиотечным каталогом.

При проверке качества знаний используются разнообразные формы контроля: проверка индивидуальных заданий личностным собеседованием, проведение периодических экспресс-контрольных работ, подготовка тематических рефератов в электронном виде, выдача творческих заданий повышенной степени сложности (совместно с выпускающими кафедрами и с отчетом в виде создания программных пользовательских приложений), проведение промежуточного и конечного автоматизированного компьютерного тестирования.

Планируется создать университетский сайт для заочной формы обучения, содержащий комплекс учебно-методических пособий, ориентированный на дистанционный способ получения учащимися информации об учебно-методических материалах, имеющихся по данным изучаемым программным средствам.

По дисциплине «Информатика» на этом сайте планируется поместить: рабочую программу дисциплины, сборники заданий по специальностям, сборник примеров оформления отчетов по

выполненным расчетным работам, учебные пособия по теории и практике решения задач, электронные версии лабораторных работ, вопросы по подготовке к экзаменам, проверочные тесты.

Приоритетной задачей кафедры при работе со студентами заочной формы обучения является создание дистанционного обучающего комплекса. Для организации работы со студентами очной формы обучения была разработана серия тестов для контроля уровня знаний по различным разделам дисциплины "Информатика", читаемых на первом курсе всех специальностей.

Для создания тестов использовалась одна из авторских систем по созданию компьютерных тестов, разработанная центром тестирования.

Подготовка банка тестовых заданий для компьютерного адаптивного тестирования явилась одной из определяющей частей при создании системы управления качеством знаний студентов.

При проектировании модели знаний использовался нисходящий метод проектирования: технология «сверху–вниз». Первоначально разрабатывается генеральное содержание предметной области с разбивкой на укрупненные модули (разделы). Затем была произведена детализация модулей на элементарные подмодули с конкретным наполнением данными по изучаемому материалу.

При подготовке выделялись следующие подмодули – группы вопросов:

- Группа легких вопросов. Содержит основные понятия с выбором варианта ответа из списка предложенных.
- Группа вопросов средней сложности. Направлена на применение стандартных подходов к решению типовых задач.
- Группа вопросов повышенной сложности. Предполагает умение студента отнести понятие к определенному классу, выбрать правильную запись понятия.
- Группа вопросов высокого уровня сложности. Вопросы, направленные на самостоятельное написание формул, требующих логического построения.

Особое внимание было уделено процентному соотношению предлагаемых тестовых заданий из разных групп сложности. Неоправдан-

ное снижение теоретического уровня предлагаемых вопросов влечет снижение уровня знаний обучаемых. Увеличение доли вопросов повышенной сложности ведет к снижению количества студентов, способных сдать тест.

Вероятность появления вопросов из каждого модуля подчиняется нормальному распределению.

Перед проведением массового тестирования «нулевой» вариант теста был помещен в локальной сети университета и был доступен всем желающим.

После проведения массового тестирования студентов первого курса по дисциплине «Информатика» была произведена статистическая обработка результатов с целью:

- 1) корректировки четкости формулировок заданий;
- 2) правильности отнесения вопросов к той или иной группе сложности, учитывая восприятие вопроса обучаемым;
- 3) выявления уровня преподавания дисциплины различными преподавателями;
- 4) слежения за тенденцией сдачи контрольного мероприятия.

ного мероприятия.

Использование тестового контроля с помощью вычислительных систем позволило ускорить и автоматизировать проверку знаний учащихся, унифицировать аттестационные требования, повысить объективность аттестации, а также оценить уровень профессиональной деятельности преподавателей.

С целью подготовки студентов к итоговому контрольному мероприятию и отбора способных студентов на олимпиады и другие соревновательные акции можно использовать созданные тесты не только для контроля уровня знаний, но и для обучения, например, увеличивая количество вопросов из более сложных категорий.

Созданы промежуточные семестровые тесты и проведено компьютерное тестирование с целью получения данных о текущем уровне знаний студентов (данные использованы как унифицированный рейтинговый показатель), выявления «упущенных» тематических разделов, контроля выполнения рабочих программ преподавателями, подготовки к экзамену.

УДК 519.25:669:621.746.5

Л. Д. Девятченко, Л. Ш. Тимиргалеева

АНАЛИЗ СОПРЯЖЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ И СОСТОЯНИЙ АВАРИЙНОСТИ НА МАШИНАХ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Статистика категорированных данных, отражающих результаты искусственных или естественных группировок, обычно представляется в виде таблиц перекрестной классификации. При этом уровни группирующих признаков могут быть зафиксированы как в интервальной шкале (для количественных признаков), так и в номинальных шкалах (для качественных признаков). Для обработки получаемых результатов наблюдений используют либо дисперсионный метод анализа, если в ячейках этих таблиц представлены отклики результативного признака, либо метод анализа сопряженности, если в ячейках этих таблиц представлены частоты (абсолютные или относительные).

В данной работе анализировалась статистика аварийных ситуаций на машинах непрерывной разливки стали (МНЛЗ ОАО «ММК») за 1999–

2005 гг. Актуальность работы обусловлена тем, что более 50% аварийных ситуаций в кислородно-конверторном производстве, в т.ч. и в ОАО «ММК», приходится на эксплуатацию МНЛЗ [7]. Данные по причинам, вызывающим появление состояний аварийности и представлены в табл. 1.

В табл. 1 представлены две группы категоризирующих переменных.

Таблица 1

Категорированные данные (частоты)
по признакам аварийности (группа Y)
и технологических нарушений (группа X)

Категории	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	Сумма
Y1	15	4	23	6	2	0	1	13	11	3	11	1	90
Y2	0	5	36	1	31	8	2	31	3	1	6	0	124
Y3	1	0	4	1	0	0	0	2	1	0	0	0	9
Y4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Y5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Сумма	16	9	64	8	33	8	3	47	15	4	17	1	225

* Создание системы управления знаниями в высшей школе / Баранкова И.И., Носова Т.Н., Пермьякова О.В., Михайлова У.В. // Материалы XIII Междунар. науч.-метод. конференции. Т. 1. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2006. С. 157–158.

Группа Y – аварийные состояния [5]:

Y1 – трещина (разрыв поверхности металла слитка, ориентированный вдоль или поперек оси слитка и проникающий в его глубину);

Y2 – подвисяние (подвисяние металла в начальной стадии разлива слитка, достигнувшего до тянущих роликов);

Y3 – пояс (спай двух слоев металла слитка, обнаруживаемый на горячем слитке в более темной, чем основной металл, полоске);

Y4 – отрыв головки (обрывание затравки при разливе металла);

Y5 – газонасыщенность (образование полостей, которые не заполнены металлом в слитке спокойной стали, выявляемых при микроконтроле по всему сечению темплета либо в изломе).

Группа X – причины, вызывающие аварийные ситуации (технологические нарушения):

X1 – неудовлетворительное состояние роликовых секций (нарушение соосности роликов, заклинивание роликов, износ их поверхности и др.);

X2 – неправильная начальная настройка режима кристаллизатора;

X3 – отсутствие контроля за состоянием работы кристаллизатора;

X4 – нарушение скоростного режима протяжки слитка в кристаллизаторе;

X5 – ненормальное состояние уровня мениска металла;

X6 – несоответствие нормативного и фактического уровней металла в кристаллизаторе;

X7 – нарушение контакта поверхностей слитка в кристаллизаторе (контактного графика);

X8 – неудовлетворительная подготовка ковшевого металла к разливу;

X9 – отступление от температурного режима;

X10 – неудовлетворительная центровка погружного стакана;

X11 – сбой в системе охлаждения кристаллизатора;

X12 – неудовлетворительное состояние упорных вставок.

В ячейках таблицы представлены частоты f_{ij}

регистрируемых событий на пересечении i -строки и j -столбца, $i = \overline{1,5}$ $j = \overline{1,12}$, где

$\sum_i \sum_j f_{ij} = N$ (в нашем случае общая сумма $N=225$). Тогда относительные частоты

$p_{ij} = f_{ij}/N$ и $\sum_i \sum_j p_{ij} = 1$. При этом следует заметить, что относительные частоты p_{ij} на практике удобно выражать в процентах, тогда

$\sum_i \sum_j p_{ij}(\%) = 100\%$. Особенность таблиц с номинальными переменными в том, что они никак естественным образом не упорядочиваются.

Формально представление двумерных категоризированных данных возможно в нескольких вариантах, из них наиболее частое применение находят следующие:

1) табулирование сопряженности признаков при классификации процентных долей, посчитанных на основе общей суммы (табл. 2);

2) табулирование сопряженности признаков при классификации процентных долей, посчитанных на основе суммы по строкам (табл. 3);

3) табулирование сопряженности признаков при классификации процентных долей, посчитанных на основе суммы по столбцам (табл. 4).

Результаты шкалирования координат, представленных в табл. 2, 3, 4, – это три различных варианта использования возможности стандартизации исходных данных. Особый интерес для исследователя представляют данные табл. 3 и 4, где каждый элемент матрицы профилей строк (см. табл. 3), интерпретируется как условная вероятность принадлежности элементов i -строки j -столбцу, а каждый элемент матрицы профилей столбцов (см. табл. 4) интерпретируется как условная вероятность принадлежности элементов j -столбца i -строке. Так, согласно табл. 3, по признаку Y1 значительно выделяется элемент, принадлежащий столбцу X3 (25,55%), аналогично и по признаку Y2 (29,03%), Y3 (44,44%), Y4 (100%), а по признаку Y5 выделя-

Таблица 2

Распределение "единичной массы" – относительных частот (%) по ячейкам

Категории	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	Сумма
Y1	6,66	1,77	10,2	2,66	0,88	0	0,44	5,77	4,88	1,33	4,88	0,44	40
Y2	0	2,22	16	0,44	13,77	3,55	0,88	13,77	1,33	0,44	2,66	0	56,11
Y3	0,44	0	1,77	0,44	0	0	0	0,88	0,44	0	0	0	4
Y4	0	0	0,44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,44
Y5	0	0	0	0	0	0	0	0,44	0	0	0	0	0,44
Сумма	7,11	4,00	28,44	3,56	14,67	3,56	1,33	20,89	6,67	1,78	7,56	0,44	100

ется элемент, принадлежащий столбцу X8 (100%). Согласно же табл.4 по признаку X1 преимущественно выделяется элемент, принадлежащий строке Y1 (93,75%), а по признаку X2 заметнее выделяется элемент, принадлежащий строке Y2 (55,56%) в сравнении с Y1 (44,44%), для столбца X3 выделяется элемент, принадлежащий опять же строке Y2 (56,25%) и т.д.

В дальнейшем анализ сопряженности исследуемых признаков, представленных в табл. 1, будем связывать с анализом матриц профилей строк (см. табл. 3) или профилей столбцов (см. табл. 4), или с анализом матриц этих профилей одновременно (см. табл. 2).

Независимо от вариантов представления двухвходовых таблиц сопряженности можно считать, что 12 чисел в каждой i -строке, $i = \overline{1, 5}$, являются координатами 12-мерного пространства, а каждый j -столбец, $j = \overline{1, 12}$, представлен координатами в 5-мерном пространстве. Следовательно, можно вычислить евклидовы расстояния между пятью точками (строками) в 12-мерном пространстве и аналогично между двенадцатью точками (столбцами) в 5-мерном пространстве. В этом случае мы получим информацию о сходстве между строками, а также о сходстве между столбцами (чем меньше расстояние, тем больше сходства между категориями соответствующих признаков). Заметим, что в анализе сопряженности термин "расстояние" используется для обозначения различий между строками или между столбцами матрицы относительных частот.

Тем не менее, очевидно, что в многомерном пространстве создаются дополнительные трудности для наглядного представления информации о сходстве учтенных в эксперименте категорий. С этой целью целесообразно для наглядного представления рассматриваемой информации найти пространство меньшей размерности, но которое будет сохранять почти всю информацию о сходствах или различиях между категориями соответствующих признаков.

Методы анализа таблиц сопряженности [6] позволяют:

во-первых, устанавливать, насколько сильно категоризованные признаки состояния аварийности и технологические нарушения, то есть причины и следствия, связаны между собой, и какие группы данных обуславливают эту связь;

во-вторых, представить всю информацию о различии или схожести сопряженных признаков в пространстве меньшей размерности, которая практически сохраняет всю исходную информацию заданного распределения частот;

в-третьих, получить оценки качества предпринимаемой аппроксимации тесноты связи категоризованных признаков.

Первая задача решается методом проверки нуль-гипотезы по соответствию заданного распределения частот сопряженных признаков распределению ожидаемых частот полностью независимых друг от друга категоризованных признаков.

В основу проверки H_0 -гипотезы положен χ^2 -критерий Пирсона [1]:

Таблица 3

Условные вероятности (%) принадлежности элементов i -строки j -столбцу

Категории	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	Сумма
Y1	16,66	4,44	25,55	6,66	2,22	0	1,11	14,44	12,22	3,33	12,22	1,11	100
Y2	0	4,03	29,03	0,81	25,00	6,45	1,61	25,00	2,41	0,81	4,84	0	100
Y3	11,11	0	44,44	11,11	0	0	0	22,22	11,11	0	0	0	100
Y4	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Y5	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	100

Таблица 4

Условные вероятности (%) принадлежности элементов j -столбца i -строке

Категории	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
Y1	93,75	44,44	35,94	75,0	6,06	0	33,33	27,66	73,33	75,00	64,71	100
Y2	0	55,56	56,25	12,50	93,94	100	66,67	65,96	20,00	25,00	35,29	0
Y3	6,25	0	6,25	12,50	0	0	0	4,25	6,67	0	0	0
Y4	0,	0	1,56	0	0	0	0	0,	0	0	0	0
Y5	0	0	0	0	0	0	0	2,13	0	0	0	0
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

$$\chi^2_v = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{(f_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}}$$

где число степеней свободы $v=(m-1) \cdot (n-1)$; f_{ij} и e_{ij} – соответственно заданные (см. табл. 1) и ожидаемые (табл. 5) частоты.

В табл. 5 частоты e_{ij} , принадлежащие i -строке и j -столбцу, получены на основе исходных данных (см. табл. 1) путем перемножения элементов столбца суммы для соответствующей i -строки на соответствующий j -элемент строки суммы, деленных на общую сумму всех элементов. Если ввести обозначения исходных данных в табл. 1 для i -элементов столбца суммы как f_{i0} , для j -элементов строки суммы как f_{0j} , то в случае независимости категоризирующих признаков ожидаемые частоты $e_{ij} = \frac{f_{i0} \cdot f_{0j}}{f_{00}}$, где $f_{00}=N$. Естественно, при этом сумма всех элементов в табл. 1 и 5 совпадает.

Таким образом, мы рассмотрели возможность построения χ^2 -критерия по результатам шкалирования данных в табл. 1 и 5, на основе матрицы профилей строк и столбцов одновременно. Любые отклонения (отражены в табл. 6) наблюдаемых величин f_{ij} от ожидаемых e_{ij} будет давать вклад в χ^2 -статистику.

Следует также заметить, что при анализе таблиц сопряженности наряду с χ^2 -критерием широко используется понятие “инерция” (условное обозначение I_0), аналогичное понятию

“момент инерции относительно центра массы”, используемого в физико-математических дисциплинах. Характеристика “инерция” для таблиц сопряженности определяется на основании вычисленной χ^2 -статистики, $I_0 = \chi^2 / N$. Следовательно, инерция, как и χ^2 -статистика, являются характеристиками суммарного вклада в несоответствие наблюдаемых в эксперименте и ожидаемых частот.

Таким образом, первую задачу по анализу соответствия для двухвходовой таблицы можно рассматривать как метод декомпозиции χ^2 -статистики. Полученные результаты χ^2 в матричном формате, содержащем профили строк и столбцов одновременно, представлены в табл. 7.

Анализируя данные табл. 7, сразу обратим внимание что проверяемую H_0 -гипотезу соответствия можно отклонить на уровне значимости $\alpha=0,05$, так как суммарное значение $\chi^2_v = 80,034$ (см. в нижнем правом углу табл. 7) с числом степеней свободы $v = 4 \cdot 11 = 44$ отвечает уровню значимости $\alpha=0,00074$ [1]. Какие же категории номинальных переменных, учтенных в эксперименте, обеспечивают значимость χ^2 -критерия? Согласно данным табл. 7 в группе Y это в основном Y1 и Y2, а в группе X это главным образом X1 и X5, а затем X9, X4, X6 и другие по мере снижения их вклада в χ^2 -статистику.

Таким образом, принимается на уровне значимости $\alpha=0,05$ альтернативная гипотеза H_1 : о статистически значимой тесноте связи категори-

Таблица 5

Распределение ожидаемых частот при полностью независимых категоризованных признаках

Категории	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	Сумма
Y1	6,40	3,60	25,60	3,20	13,20	3,20	1,20	18,80	6,00	1,60	6,80	0,40	90,0
Y2	8,82	4,96	35,27	4,41	18,18	4,41	1,65	25,90	8,26	2,20	9,37	0,55	124,0
Y3	0,64	0,36	2,56	0,32	1,32	0,32	0,12	1,88	0,60	0,16	0,68	0,04	9,0
Y4	0,07	0,04	0,28	0,04	0,15	0,04	0,01	0,21	0,06	0,02	0,07	0,004	1,0
Y5	0,07	0,04	0,28	0,04	0,15	0,04	0,01	0,21	0,06	0,02	0,07	0,004	1,0
Сумма	16,0	9,0	64,0	8,0	33,0	8,0	3,0	47,0	15,0	4,0	17,0	1,00	225,0

Таблица 6

Отклонение наблюдаемых частот категоризованных признаков от ожидаемых частот при независимости этих признаков

Категории	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
Y1	8,60	0,40	-2,60	2,80	-11,20	-3,20	-0,20	-5,80	5,00	1,40	4,200	0,60
Y2	-8,82	0,04	0,73	-3,41	12,81	3,59	0,35	5,09	-5,26	-1,20	-3,369	-0,55
Y3	0,36	-0,36	1,44	0,68	-1,32	-0,32	-0,12	0,12	0,40	-0,16	-0,680	-0,04
Y4	-0,07	-0,04	0,72	-0,04	-0,15	-0,04	-0,01	-0,21	-0,06	-0,02	-0,076	-0,004
Y5	-0,07	-0,04	-0,28	-0,04	-0,15	-0,04	-0,01	0,79	-0,06	-0,02	-0,076	-0,004

рованных переменных группы X с группой Y, т.к. $\chi^2_{0,00074}(44) = 80,034 \gg \chi^2_{0,05}(44) = 60$. Кроме того, методом декомпозиции χ^2 -критерия выявлены наиболее значимые категории исследуемых признаков, определяющих установленную связь.

Вторая задача по анализу сопряженности решается методом матричной алгебры [3] путем вычисления обобщенных собственных чисел, а также сингулярных чисел и собственных векторов, симметричных матриц AA^T и $A^T A$, где A – исходная матрица сопряженных признаков, а A^T – транспонированная матрица A.

Максимальная размерность k, которая может быть получена из двухходовой таблицы сопряженности (матрица A размера $m \times n$), определяется условием $k = \min\{m-1, n-1\}$, так как частоты в таблице сопряженности суммируются по строкам и столбцам, поэтому имеется только (m-1) и (n-1) независимых элементов в каждой строке и в каждом столбце соответственно.

Ненулевые собственные значения λ матриц AA^T и $A^T A$ всегда совпадают [3]. Предполагается, что собственные значения λ_i занумерованы в порядке убывания: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_k > 0$, где $\max \lambda = \lambda_1$, λ_{k+1}, \dots – считаем нулевыми, ρ_i – сингулярные числа матриц AA^T и $A^T A$, $\rho_i = \sqrt{\lambda_i}$. Для представления точек-строк и точек-столбцов в пространстве меньшей размерности следует определить соответствующую систему базисных векторов. С этой целью каждому собственному значению λ_i ставится в соответствие собственный вектор матриц AA^T и $A^T A$ для m-мерного и

n-мерного пространства соответственно. При этом собственные векторы будут ортонормированными (базисными векторами) в выбранном ($t < k$)-пространстве меньшей размерности.

Для пространства максимальной размерности $k=4$ общие результаты анализа сопряженности признака X (нарушение технологии) с признаком Y (состояние аварийности) даны в табл. 8. Безусловно, максимальная размерность позволяет восстановить всю информацию, содержащуюся в исходной таблице данных. Однако для таблиц сопряженности больших размеров снижение размерности координатного пространства весьма актуально.

В табл. 8 представлены основные характеристики анализа сопряженности по каждому из 4-х измерений (статистически значимые результаты содержатся только в первых двух измерениях). Общие оценки характеристик сопряженности изучаемых признаков, представленных в табл. 8, следующие:

- вычисленное значение критерия $\chi^2=80,034$;
- общая инерция $I_0=\chi^2/N=0,3557$;
- число степеней свободы для χ^2 -статистики, $df = (m-1) \cdot (n-1) = 44$;
- уровень значимости вычисленной χ^2 -статистики, $p=0,00074$.

Диаграмма снижения информационной ценности собственных чисел λ_i для всех 4-х измерений $i = \overline{1;4}$ представлена на рис. 1.

Очевидно, что двух измерений достаточно для аппроксимации, собранной для анализа информации, тем более, что только одно, первое

Таблица 7

Декомпозиция χ^2 -статистики в матричном формате, содержащем профили строк и столбцов одновременно

Категории	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	Сумма
Y1	11,556	0,044	0,264	2,450	9,503	3,200	0,033	1,789	4,167	1,225	2,594	0,900	37,726
Y2	8,818	0,000	0,015	2,636	9,027	2,925	0,073	1,003	3,355	0,658	1,211	0,551	30,273
Y3	0,203	0,360	0,810	1,445	1,320	0,320	0,120	0,008	0,267	0,160	0,680	0,040	5,732
Y4	0,071	0,040	1,800	0,035	0,147	0,036	0,013	0,209	0,067	0,018	0,076	0,004	2,515
Y5	0,071	0,040	0,284	0,036	0,147	0,036	0,013	2,996	0,067	0,018	0,076	0,004	3,787
Сумма	20,718	0,485	3,174	6,602	20,14	6,516	0,253	6,005	7,922	2,078	4,636	1,500	80,034

Таблица 8

Общие результаты анализа сопряженности признаков X и Y

Номер измерения	Сингулярные числа	Собственные числа	% от общей инерции	Кумулятивный %	χ^2 -статистика
1	0,555253	0,308306	86,67376	86,6738	69,36877
2	0,158679	0,025179	7,07856	93,7523	5,66528
3	0,136315	0,018582	5,22385	98,9762	4,18087
4	0,060348	0,003642	100,000	100,000	0,81942

измерение уже объясняет 86,67% общей инерции создаваемой несоответствием полученных в эксперименте ожидаемых частот.

Следовательно, для качественной аппроксимации первичных данных достаточно выбрать 2-мерное пространство, при этом потери от первоначально заданной информации составят лишь 6,25%, что вполне соизмеримо с ошибкой эксперимента.

Теперь каждому значению собственных чисел λ_1 и λ_2 следует поставить в соответствие собственные векторы для представления 2-мерной системы координат с учетом выбранного варианта шкалирования исходных данных. В табл. 9

представлены результаты вычисления этих координат (1,2 измерения для признака X), а в табл. 10 – соответственно для признака Y, где также представлены характеристики качества аппроксимации по каждому измерению, о чем подробнее остановимся ниже.

Если допустить [2], что основной целью анализа соответствий является теоретическая интерпретация векторов в полученном пространстве более низкой размерности, то этой интерпретации будет способствовать наглядное представление на диаграмме точек столбцовых и строчных категорий в новой системе координат, приведенной в табл. 9 и 10 соответственно. На рис. 2 показаны точки-столбцы категорий признака X, а

на рис. 3 – точки-строки категорий признака Y.

Диаграммы представления векторов-категорий обычно используются для установления различия или схожести наблюдаемых категорий в этих группах. Однако нужно иметь в виду, что мера схожести будет зависеть от выбранного варианта шкалирования исходных данных. Отметим, что различимость точек-строк будет эффективней при стандартизации данных на основе матрицы профилей строк (сумма в каждой строке принимается за 100%), а различимость точек-столбцов –

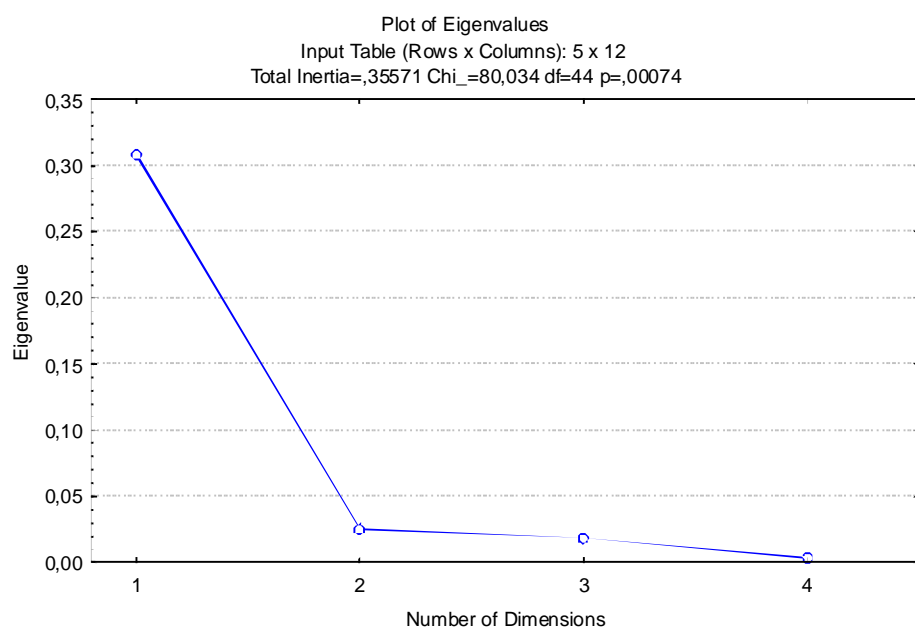


Рис. 1. Диаграмма собственных значений для всех 4-х измерений

Таблица 9

Координаты признака X (12 категорий) 2-мерного пространства и характеристики качества аппроксимации исходной информации

Категории	Координ. Dim 1	Координ. Dim 2	Единич. масса	Качество	Относит. инерция	Инерция Dim 1	Косин. ^ 2 Dim 1	Инерция Dim 2	Косин. ^ 2 Dim 2
X1	-1,13500	0,078893	0,071111	0,999630	0,258873	0,297129	0,994823	0,017578	0,004807
X2	-0,02221	0,222075	0,040000	0,924761	0,006057	0,000064	0,009158	0,078346	0,915602
X3	0,03841	-0,182568	0,284444	0,701918	0,039653	0,001361	0,029759	0,376538	0,672160
X4	-0,85241	-0,236694	0,035556	0,948376	0,082487	0,083796	0,880487	0,079112	0,067889
X5	0,76479	0,124836	0,146667	0,983727	0,251691	0,278250	0,958197	0,090777	0,025530
X6	0,88905	0,109483	0,035556	0,985130	0,081417	0,091155	0,970414	0,016926	0,014716
X7	0,20561	0,193927	0,013333	0,948378	0,003157	0,001828	0,501888	0,019915	0,446490
X8	0,25100	-0,034221	0,208889	0,502223	0,075034	0,042685	0,493058	0,009715	0,009165
X9	-0,72317	0,009299	0,066667	0,990404	0,098983	0,113087	0,990240	0,000229	0,000164
X10	-0,64870	0,299481	0,017778	0,982392	0,025972	0,024266	0,809799	0,063325	0,172593
X11	-0,43764	0,273403	0,075556	0,976298	0,057933	0,046937	0,702233	0,224303	0,274065
X12	-1,16129	0,362814	0,004444	0,986821	0,018742	0,019441	0,899065	0,023235	0,087756

при стандартизации данных с помощью матрицы профилей столбцов (сумма в каждом столбце принимается за 100%). Этот принцип был использован в системе STATISTICA [2] при построении диаграмм, представленных на рис. 2 и 3. Уместно здесь напомнить, что «расстояния» между точками в виде координат в пространстве меньшей размерности представляют собой некоторые взвешенные расстояния между относительными частотами, причем веса оказываются подобранными таким образом, чтобы метрикой в пространстве более низкой размерности явилась бы метрика вычисленной χ^2 -статистики.

Для признака X (причины аварийных ситуаций), согласно диаграмме на рис. 2, «схожими» оказались следующие пары точек: X5 и X6, X2 и X7, X10 и X11. При этом заметно различаются, например, точки X10 и X12, X9 и X12 и др. Перечисленные пары близко расположенных друг к другу точек признака X оказались «схожими» между собой по частоте их воздействия на аварийные состояния Y1 (Трещины) и Y2 (Подвисания). Остальные 6 точек признака X по сравнению с перечисленными выше заметно различаются по частоте их взаимосвязи со всеми категориями аварийных состояний.

Что касается диаграммы на рис. 3 для оценки меры схожести категорий признака Y (аварийные состояния), то на ней сильно различаются практически все точки-строчки, за исключением, быть может,

точек Y2 и Y5. Это можно объяснить их общей восприимчивостью к столбцу категории X8 и почти одинаковым расстоянием точек Y2 и Y5 до центра масс.

На завершающем этапе анализа сопряженности была выполнена (задача третья) оценка качества преобразования системы координат для выявления взаимосвязей изучаемых признаков и последующей интерпретации полученных результатов.

Для оценки качества получаемого решения в координатной системе, определяемой выбранной размерностью, используется обычный термин «качество». Показатель «качество» вычисляется как отношение квадрата расстояния от данной точки до начала координат в пространстве выбранной размерности к квадрату расстояния этой точки до начала координат,

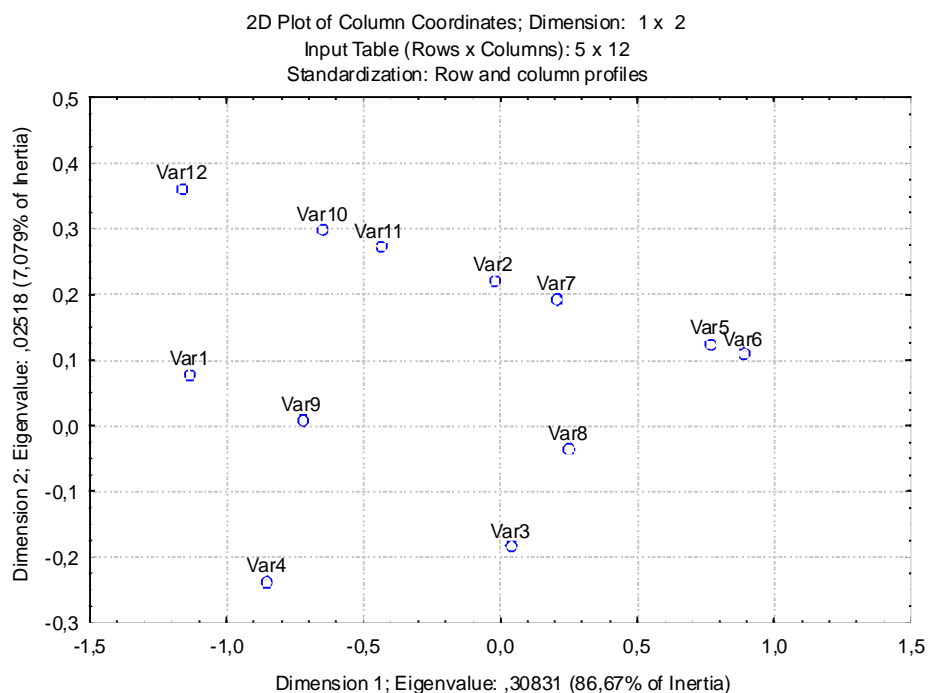


Рис. 2. Диаграмма для выявления меры схожести между точками-столбцами признака X

Таблица 10

Координаты признака Y (5 категорий) 2-мерного пространства и характеристики качества аппроксимации исходной информации

Признаки	Координ. Dim 1	Координ. Dim 2	Единич. масса	Качество	Относит. инерция	Инерция Dim 1	Косин. ^ 2 Dim 1	Инерция Dim 2	Косин. ^ 2 Dim 2
Y1	-0,644810	0,05757	0,400000	0,999795	0,471376	0,539439	0,991888	0,052654	0,007907
Y2	0,493650	0,01737	0,551111	0,999393	0,378255	0,435608	0,998157	0,006606	0,001236
Y3	-0,411210	-0,66326	0,040000	0,956261	0,071617	0,021938	0,265508	0,698868	0,690754
Y4	0,069184	-0,15055	0,004444	0,528120	0,031432	0,000069	0,001903	0,233663	0,526918
Y5	0,452041	-0,21566	0,004444	0,066236	0,047320	0,002946	0,053955	0,008210	0,012281

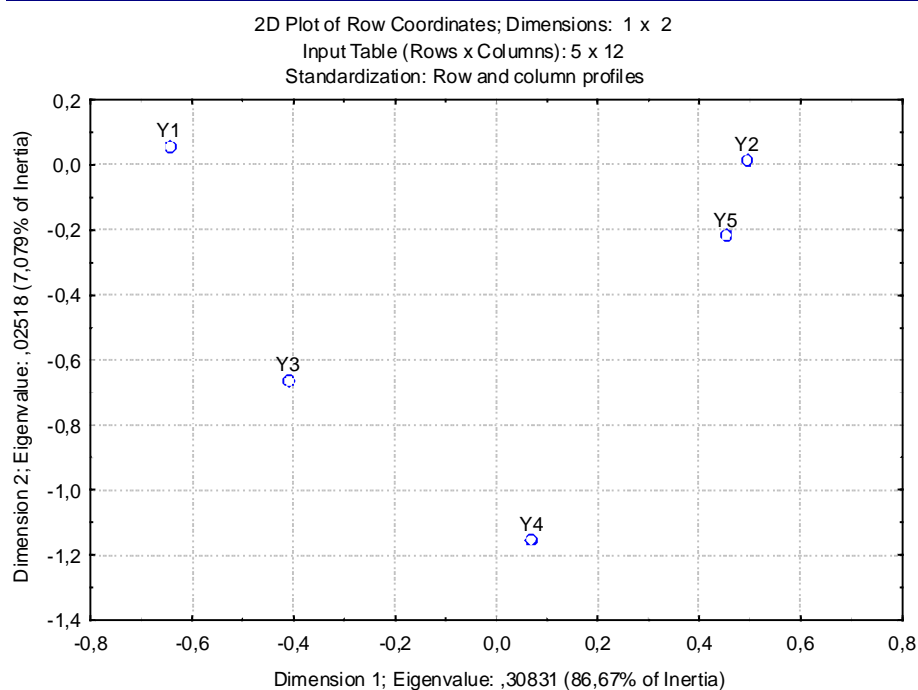


Рис. 3. Диаграмма для выявления меры схожести между точками-строками признака Y

определенному в пространстве максимальной размерности. Обратим внимание, что показатель «качество» отображаемой переменной в анализе соответствий имеет смысл показателя «общности» переменной в факторном анализе [4]. Следовательно, исходя из данных табл. 9, «специфичность» проявляет лишь категория X8, где «общность» и «специфичность» оказались практически равнозначны. Для всех других отображаемых точек показатель «качество» достаточно высок.

В данной работе применяется также показатель «качество» индивидуально для каждого измерения, так называемый «косинус квадрат» – это квадрат косинуса угла между радиусом-вектором исследуемой точки и собственным вектором, определяющим координатную ось соответствующей размерности. Естественно, что сумма этих индивидуальных показателей качества будет совпадать с соответствующим элементом столбца показателя качества (см. в табл. 9 и 10 соответствующие элементы столбцов 5, 8 и 10).

Особо заметим, что показатель «качество» означает лишь насколько качественно представлена данная точка-столбец или точка-строка в пространстве более низкой размерности. При этом «качество» не отражает собственного вклада данной точки в χ^2 -статистику, т.е. точка мо-

жет вносить малый вклад в общую инерцию, но достаточно хорошо представлена в преобразованной системе координат.

Исследуемые точки вносят различный вклад в инерцию, а следовательно, в соответствующий компонент χ^2 -статистики. Относительная инерция представляет собой долю общей инерции, принадлежащую данной точке, при этом каждая размерность, в том числе и выбранные нами 2 размерности для установления меры соответствия между категориями отдельно взятого признака, вносят свой вклад (но с учетом веса данного измерения) в относительную инерцию каждой точки изучаемого

признака. Следовательно, сумма относительной инерции для каждой $i = \overline{1,4}$ размерности с учетом ее веса определяет показатель относительной инерции точки.

Как показывают данные табл. 9, наибольший вклад в относительную инерцию вносят точки X1 и X5 и практически в три раза меньший вклад вносят точки X9 и X4 при высоком качестве их представления в выбранном координатном пространстве.

Что касается данных табл. 10, то высокое качество представления имеют категории аварийности Y1, Y2 и Y3 (0,999 – 0,956), Y4 имеет заметно ослабленное качество представления (0,528), а Y5 – весьма неудовлетворительное (0,066). При этом основной вклад в относительную инерцию вносят категории Y1 и Y2 (соответственно 47,1% и 37,8%), а Y3 – лишь 7,2%, что в сумме составляет 92,1% от проявленных состояний аварийности.

Выводы

1. Предлагается методика оценки сопряженности категорированных признаков нарушения технологии (причин) и состояний аварийности (следствий) на машинах непрерывной разливки стали.

2. Установлена со степенью надежности $P \geq 0,95$ значимая теснота связи учтенных в экс-

перименте категорий по признакам нарушения технологии и проявления аварийных ситуаций, а также выявлены наиболее значимые категории исследуемых признаков, определяющих их взаимную связь.

3. Методом декомпозиции χ^2 -критерия установлено, что основной вклад в χ^2 -статистику вносят категории аварийных состояний Y1 и Y2, а в группе причин – это главным образом X1, X5, X9, X4 и X8 (расположены по убыванию их вклада в χ^2 -статистику).

4. Выявлено, что отдельные категории признака X (причины) в равной мере воздействующих на проявление аварийных состояний – это

категории X5 и X6, X2 и X7, X10 и X11 (расположены по убыванию их меры схожести), а также выявлено, что практически отсутствует «схожесть» между категориями признака Y (откликами на причины).

5. Методика выявления значимости отдельных категорий сопряженных признаков, а также оценка их «схожести» по влиянию на аварийность позволяют предупредить появление неблагоприятных технических и организационных ситуаций и принять превентивные меры для снижения частоты случаев аварийных состояний на машинах непрерывной разливки стали.

Библиографический список

1. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.
2. Боровиков В.П. STATISTICA: Искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2001. 656 с.: ил.
3. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. 320 с.
4. Девятченко Л.Д. Главные компоненты информационных матриц. Введение в факторный анализ. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 96 с.
5. Евтеев Д.П., Колыбанов И.Н., Непрерывное литье стали. М.: Metallurgy, 1984. 200 с.
6. Кэндалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М.: Наука, 1973. 899 с.
7. Технология производства стали в современных конвертерных цехах / С.В. Колпаков, Р.В. Старов, В.В. Смоктий и др.; Под общ. ред. С.В. Колпакова. М.: Машиностроение, 1991. 464 с.: ил.

УДК 621.7:539.347

Г. А. Дубский, Т. Я. Дубская, С. А. Бутаков, Л. Г. Егорова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО И ПЛАСТОДЕФОРМАЦИОННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ПРЕДЕЛА ПЛАСТИЧНОСТИ МЕДИ И НИКЕЛЯ

Как показывает опыт, если металл посредством внешнего нагружения довести до определенной величины небольшой пластической деформации, а потом, разгрузив его, подвергнуть снова механическому нагружению, то он начнет пластически деформироваться после того, как достигнет некоторого предела пластичности, который окажется несколько больше первоначального.

Явление возрастания напряжения предела пластичности от величины предварительного пластического нагружения называется наклепом или упрочением.

Принято, что в основе механизма пластического течения металлов лежат дислокации. Процесс повышения напряжений пределов пластичности связывается с затрудненным сдвигом дислокаций после каждого предварительного пластического деформирования металла. Что же

тормозит движение дислокаций и каков механизм торможения? В настоящее время однозначного и полного ответа на эти вопросы нет.

Чтобы разобраться в процессе торможения дислокаций в начале пластической деформации, необходимо спланировать и провести такой эксперимент, который бы при наличии исходного числа дислокаций позволил бы вводить в испытуемый металл нужный сорт дефектов с заданной концентрацией и распределением. Такие эксперименты есть – это радиационное воздействие на металлы контролируемых потоков высокоэнергетических электронов и нейтронов [1, 2].

Высокоэнергетический поток электронов в результате радиационного воздействия на металл создает в активационном объеме в основном точечные дефекты – дефекты по Шоттки и Френкелю.

В то же время поток нейтронов за счет мень-

шего сечения взаимодействия создает в активационном объеме бомбардируемого металла как точечные дефекты, так и комплексы дефектов – бивакансии, кластеры и микропоры. Мигрируя по кристаллу посредством диффузии, они с конечной вероятностью порождают плоские дефекты – петли дислокаций [3].

Так что, используя соответствующий вид радиационного потока, можно создавать в объеме металла тот или иной вид центров (узлов) или «атмосфер» закрепления дислокаций, препятствующих их свободному перемещению при последующей пластической деформации.

Обратимся к имеющимся в настоящее время экспериментальным фактам. В работе [3] представлены результаты, показывающие изменения критического напряжения сдвига микрокристалла меди от величины электронного потока с энергией $E_0 = 4$ МэВ (рис. 1).

Данные исследования дают следующие результаты:

1) увеличение дозы электронного облучения повышает критический предел скольжения в 8–9 раз. С повышением температуры облучения эффект стремится к затуханию;

2) увеличение дозы облучения, начиная с определенного ее значения, приводит к насыщению критического напряжения сдвига;

3) электронное облучение практически не изменяет ход кривой «деформация–напряжение» при больших деформациях.

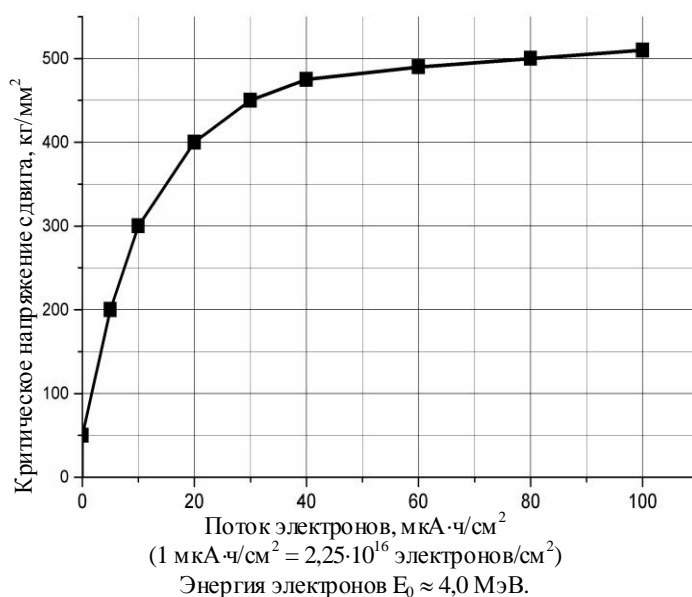


Рис. 1. Изменение критического напряжения сдвига от интегрального потока электронов. Температура облучения $\approx 20^\circ\text{C}$ [3]

Результаты исследования влияния нейтронных потоков на механические свойства металла приведены на рис. 2 и 3. На рис. 2 представлены кривые «напряжение–деформация» для монокристалла меди, подвергнутого бомбардировке различными по величине нейтронными потоками с энергией $E_0 \approx 1$ МэВ. Из данных кривых видно, что критическое напряжение пластического сдвига возрастает с ростом дозы облучения. Величина дозы облучения также влияет на ход пластического напряжения от степени деформации.

Изменение предела текучести стали от величины доз облучения исследовано в работе [4], что отражено на рис. 3. Из данной зависимости следует, что:

1) предел пластичности стали с ростом нейтронной дозы облучения монотонно возрастает;

2) предел пластичности стали с ростом нейтронной дозы облучения стремится к насыщению, но не так быстро, как для электронных потоков;

3) величина дозы облучения влияет на ход кривой «напряжение–деформация» на восходящей кривой упрочения (см. рис. 2).

Итак, из представленных результатов исследования влияния электронных и нейтронных потоков на пластические свойства металлов можно сделать следующие выводы:

1) электронное и нейтронное облучение сильно влияют на критическое напряжение сдвига монокристаллов и пределы пластичности поликристаллов;

2) увеличение электронных и нейтронных потоков увеличивает критические напряжения сдвига и пределы пластичности нелинейно;

3) критические напряжения сдвига и пределы пластичности при увеличении электронного потока достигают насыщения, а при увеличении нейтронного потока насыщение этих механических характеристик заторможено, т.е. оно уходит в область больших по величине потоков;

4) рост величины электронного потока практически не изменяет восходящую ветвь кривой «напряжение–деформация» (см. рис. 1);

5) рост величины нейтронного потока изменяет ход восходящей кривой «напряжение–деформация».

Причиной всех этих изменений, как отмечают авторы [3–5] является взаимодействие дислокаций с различными структурными дефектами, которые порождаются в объеме металла посредством радиационного воздействия.

Так, электроны, взаимодействуя с узлами кристаллической структуры, порождают в большей степени только точечные дефекты – вакансии и межузельные атомы, т.к. высокоэнергетические электроны имеют большие сечения взаимодействия, передают атомам кристалла небольшие энергии. Число генерированных вакансий при этом всегда больше, чем межузельных атомов, т.к. $E_{av} < E_{ai}$, где E_{av} и E_{ai} – энергии активации соответственно вакансии и межузельного атома. Число вакансий и число межузельных атомов определяются соответствующими выражениями:

$$n_v = n_0 a e^{-E_{av}/kT}, \quad n_i = n_0 b e^{-E_{ai}/kT},$$

где n_0 – общая концентрация узлов кристаллической решетки; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; a и b – постоянные.

Образовавшиеся вакансии, имея меньшую энергию миграции, чем межузельные атомы, преимущественно начинают диффундировать в сторону стоков – дислокаций. Взаимодействуя с ними, они образуют устойчивые вакансионные комплексы, порождая по длине дислокации вакансионную «гребенку», которая закрепляет последнюю. Это приводит к повышению критических пределов сдвига или пределов пластичности. Поскольку число радиационных вакансий ограничено, за счет большего сечения взаимодействия и температуры облучения, то процесс роста, допустим, предела пластичности от дозы облучения быстро достигает насыщения.

Нейтронная бомбардировка металлов, в отличие от электронной, создает более развитый по видам дефектов каскад столкновений: рождаются как точечные дефекты, так и их комплексы в виде бивакансий, кластеров и петель дислокаций. Эти дополнительные структурные дефекты приводят к нелинейному росту пределов пластичности со слабым стремлением к насыщению.

Роль одиночных дефектов для повышения технических свойств можно продемонстрировать на отжиге облученного при 20°C ниобия. Кривая зависимости предела текучести от температуры отжига показана на рис. 4. При температуре 150–200°C, соответствующей III стадии отжига и, следовательно, согласно существующей интерпретации, появлению свободных вакансий, на-

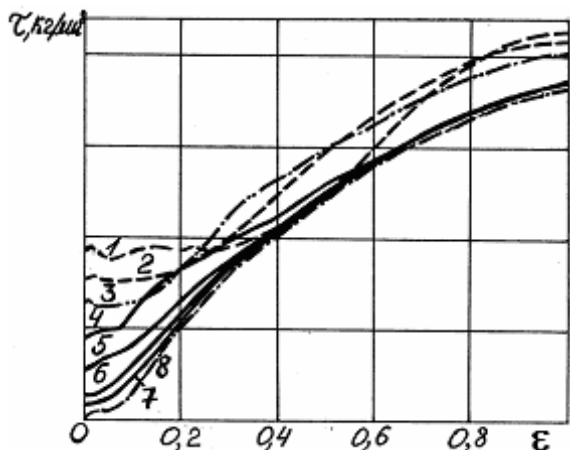


Рис. 2. Кривые «напряжение–деформация» для близких по ориентировке монокристаллов меди, подвергнутых различному по величине облучению нейтронами. Цифры у кривых связаны с временем облучения (1 – 150 ч; 2 – 75 ч; 3 – 55 ч; 4 – 14 ч; 5 – 5 ч; 6 – 1 ч; 7 – 0,5 ч; 8 – необлученная медь). 1 ч соответствует интегральному потоку $0,7 \cdot 10^{17}$ нейтрон/см² [4]

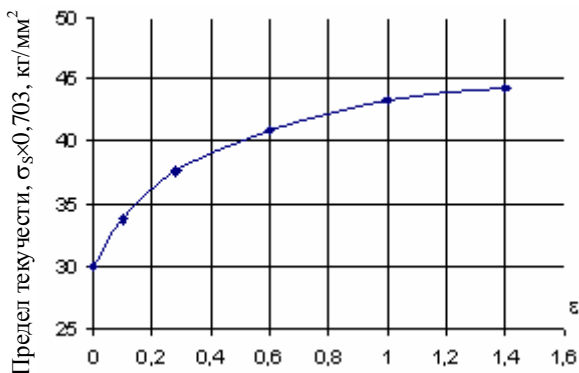


Рис. 3. Изменение предела текучести малоуглеродистой стали от интегрального потока нейтронов ($E_0 > 1$ МэВ). Температура облучения ~ 150°C [5]

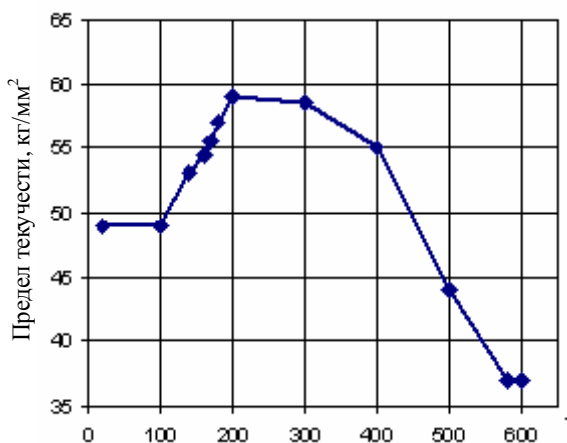


Рис. 4. Изменение предела текучести облученного нейтронами ниобия при отжиге [6]. Значения предела текучести для необлученного металла лежат в области ниже 40 кг/мм²

блюдается скачок предела текучести, по-видимому, связанный с адсорбцией вакансий дислокациями, усиливающих торможение движения дислокаций. Такое же явление, названное «термическим твердением», наблюдается также в результате нагрева облученного молибдена в интервале температур 150–200°C.

Эти опыты ясно указывают на роль вакансий, способных адсорбироваться дислокациями, закрепляя их. Правда, нельзя с уверенностью утверждать, что захваченные дислокациями и вакансии сохраняются как одиночные дефекты, а не образуют более прочных комплексов, служащих тормозом для движения дислокаций.

Далее представим кривые «напряжение–деформация» предварительно пластически деформированных поликристаллических меди и никеля, полученных с помощью разрывной машины, разработанной и сделанной в нашей лаборатории. Экспериментальные результаты, получен-

ные с помощью этой машины, представлены на рис. 5 и 6.

На рис. 5 отображена зависимость изменения предела пластичности поликристаллической меди в зависимости от величины малой предварительной пластической деформации. Образцы готовились из медной электротехнической проволоки. Длина образца ~ 100 мм и диаметр 1,12 мм. Перед исследованием все образцы подвергались отжигу в вакууме. Температура отжига была 650°C, время отжига 5 ч. Скорость предварительной и последующей пластической деформации составляла $\Delta L/\Delta t = 5,5$ мм/мин.

Результаты исследования по никелю приведены на рис. 6. Образцы, как и медные, готовились из проволочного технического никеля. Длина образца ~ 100 мм и диаметр 1 мм. Перед исследованием никелевые образцы отжигались в вакууме при 870°C, время отжига 5 ч.

Как видно из представленных на рис. 5 и 6 зависимостей, предварительная малая пластическая деформация изменяет пределы пластичности и медной, и никелевой проволоки.

С ростом величины предварительной пластической деформации величина предела пластичности Cu и Ni монотонно возрастает так, что наблюдается стремление этих кривых к насыщению. По-видимому, верхним пределом, к которому стремятся эти кривые, является предел прочности исследуемых материалов.

Сравнивая эти кривые с кривыми, полученными авторами [3] и [5], можно заметить, что изменение пределов пластичности от величины потоков нейтронов и электронов и предварительных малых пластических деформаций имеют один и тот же характер, т.е. механизмы, лежащие в основе роста пределов пластичности, в обоих этих случаях имеют сходную (или одну и ту же) природу. Хотя, следует заметить, что любая пластическая деформация приводит к возрастанию плотности дислокаций, но при малых деформациях прирост дислокаций относительно исходного очень мал, т.е. $\Delta\rho_d/\rho_{0d} \ll 1$, а поэтому данный прирост дислокаций не должен существенно влиять на характер движения исходных (ρ_{0d}) дислокаций. В пользу этого предположения показывает ход восходящей кривой упрочнения на всем интервале пластических деформаций: функциональная зависимость этого хода не зависит от величины предварительной (малой) пластической деформации [7].

Таким образом, для описания причины, вызывающей рост предела пластичности в исследованных меди и никеле от малых величин пласти-

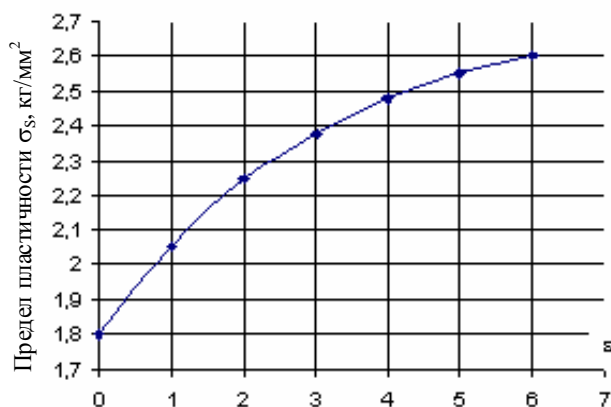


Рис. 5. Изменение предела пластичности поликристаллической меди от величины предварительной деформации

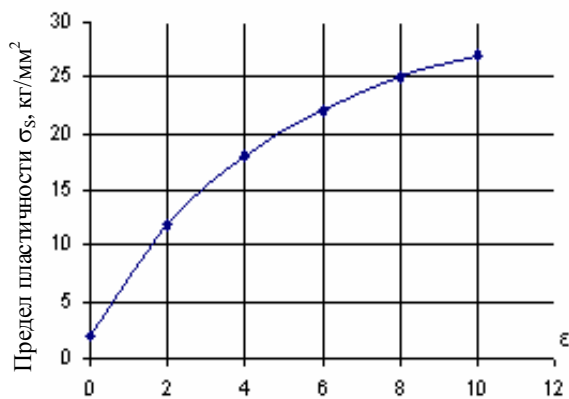


Рис. 6. Изменение предела пластичности поликристаллического никеля от величины предварительной деформации

ческой деформации, можно предложить следующий механизм.

Любой металл в нормальном отожженном состоянии имеет конечное число структурных дефектов, в том числе вакансий и межузельных атомов. Пластическая деформация предполагает срыв дислокаций и их движение в направлении скольжения. Для осуществления сдвига кристалла на величину вектора Бюргерса дислокация проходит десятки тысяч атомных слоев, порождая за собой шлейф точечных дефектов. Эти дефекты и исходные посредством последующей диффузии стекают к дислокациям, образуя на них микрокомплексы дефектов, которые закрепляют эту дислокацию. После того, как снимается исходная нагрузка, достигнутый результат не релаксирует, а остается. Это связано с тем, что адсорбированные на дислокациях дефектные микрокомплексы устойчивы, т.к. их энергия активации порядка 1 эВ, что требует очень высокой температуры для их отжига. Последующее механическое нагружение проявит пластическое течение при новом значении предела пластичности, большем исходного.

Далее попытаемся установить функциональную связь между величиной предела пластичности (или критического напряжения сдвига) с исходным числом дислокаций ρ_{0d} и числом закрепляющих дислокации центров (микрокомплексов дефектов) – N_b .

Для этого возьмем плоскость скопления дислокаций – Q , разместим на ней случайным образом закрепляющие центры (допустим, распреде-

ленные по закону Гаусса). Заставим, под действием внешнего усилия, скользить дислокацию по плоскости Q . Пройдя некоторое расстояние дислокация подойдет к некоторому числу N_b закрепляющих центров так, как показано на рис. 7.

Каждому закрепляющему узлу мы сопоставим определенный потенциальный барьер с заданной энергией U_0 и шириной барьера δ . Вообще говоря, U_0 и δ – случайные величины. U_0 может быть как больше энергии дислокации, так и меньше. Поскольку N_b , U_0 и δ – случайные величины, то и длина пробега (λ_i) дислокации до момента аннигиляции на дислокациях противоположного знака или выходом на границу зерна является случайной величиной, т.е. пластическое течение должно быть скачкообразным (по крайней мере, в одном зерне). Таким образом, на единицу пластической деформации ε_i за время dt приходится средняя длина свободного пробега $\langle \lambda \rangle_i$, соответствующая проходу в плоскости скольжения ρ_{di} – дислокаций через N_b – тормозящих потенциальных барьеров. Таким образом,

$$\varepsilon_i = f(U_0, \delta, \rho_b, \rho_d, \langle \lambda \rangle_i, b).$$

Для нахождения явного вида ε_i через указанные параметры обратимся к рис. 7 и 8. На рис. 7 представлена дислокация в поле случайным образом распределенных узлов закрепления. Скольжение плоскости Q относительно плоскости P при наличии между ними дислокации D и тормозящих потенциальных барьеров N_{bi} показано на рис. 8.

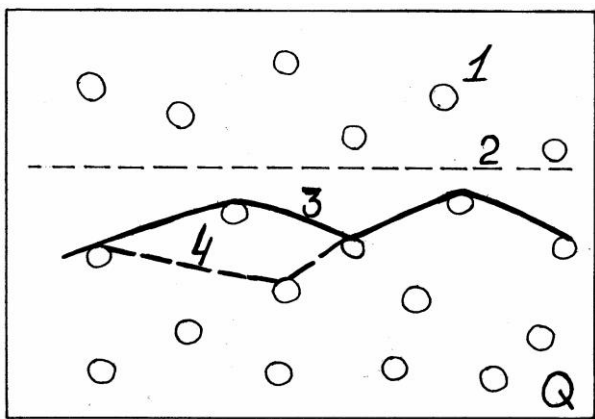


Рис. 7. Дислокация в поле случайным образом распределенных узлов закрепления на плоскости скольжения Q :

- 1 – узлы закрепления дислокаций (потенциальные барьеры);
- 2 – ненапряженная дислокация;
- 3 – напряженная дислокация;
- 4 – часть дислокации, прошедшая узел

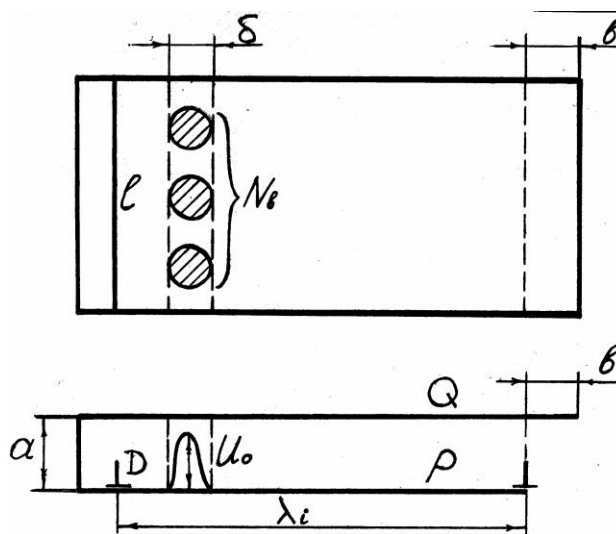


Рис. 8. Скольжение плоскости Q относительно плоскости P при наличии дислокации D и случайного числа тормозящих потенциальных барьеров N_b

Величина элементарной пластической деформации при выходе одной дислокации на границу зерна будет

$$\varepsilon_i = b/\lambda_i. \tag{1}$$

При выходе на границу N_d -дислокаций полная деформация станет равной

$$\varepsilon = \varepsilon_i N_d = N_d b / \langle \lambda \rangle, \tag{2}$$

где $\langle \lambda \rangle$ – средняя длина пробега N_d -дислокаций (число дислокаций).

Выразим N_d через ρ_d – плотность дислокаций, прошедших между скользящими плоскостями. Тогда

$$\frac{N_d}{\langle \lambda \rangle a} = \rho_d \text{ или } N_d = \rho_d \langle \lambda \rangle a, \tag{3}$$

где a – межплоскостное расстояние.

Из (2), учитывая (3), получим:

$$\varepsilon = N_d \frac{b}{\langle \lambda \rangle} = \rho_d \langle \lambda \rangle a \frac{b}{\langle \lambda \rangle} = \rho_d a b,$$

где $S = \langle \lambda \rangle a$ – площадь, на которую выходят торцы скользящих дислокаций (см. рис. 8), т.е.

$$\varepsilon = \rho_d a b. \tag{4}$$

Пусть в плоскости скольжения находилось ρ_{0d} -дислокаций, тогда число прошедших ρ_d -дислокаций будет

$$\rho_d = \rho_{0d} \exp \left\{ -\frac{U(\sigma, T)}{kT} \right\}, \tag{5}$$

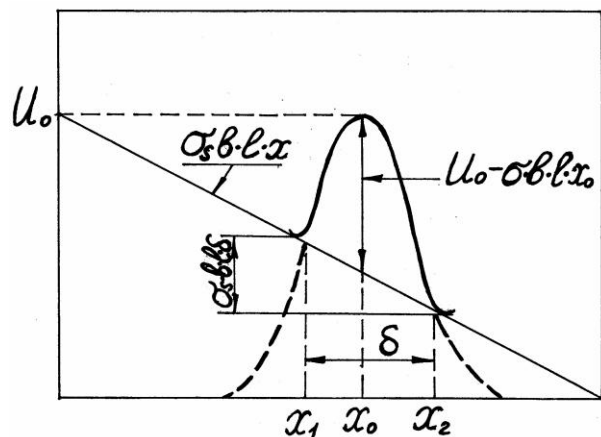


Рис. 9. Изменение вида потенциального барьера при совершении внешней силой работы –

$$A(x) = \sigma_s b l x. \quad U(x) = U_0 - \sigma_s b l x_0$$

где ρ_{0d} – число дислокаций, соответствующих равновесному состоянию; $U(\sigma, T)$ – средняя энергия потенциальных барьеров, которые преодолели дислокации.

Учитывая (4) и (5), получим величину пластической деформации от прохождения ρ_d дислокаций:

$$\varepsilon = a b \rho_{0d} \exp \left\{ -\frac{U(\sigma, T)}{kT} \right\}. \tag{6}$$

В работе [8] было показано, что при внешнем силовом воздействии вид потенциального барьера $U_0(x)$, который преодолевает дислокация, меняется так, как показано на рис. 9.

Таким образом, при внешнем силовом воздействии энергия потенциального барьера U_0 изменяется на величину ΔU , т.е. потенциальный барьер понижается и принимает вид (см. рис. 9):

$$U(x) = U_0 - \sigma_s b l x, \tag{7}$$

где σ_s – напряжение предела пластичности.

Из анализа (6) и (7) следует, что

$$U(x) = U(\sigma, T). \tag{8}$$

Далее из (6) после несложных преобразований выразим $U(\sigma, T)$:

$$U(\sigma, T) = -kT \ln \left(\frac{\varepsilon}{\rho_{0d} a b} \right). \tag{9}$$

Из равенства (8) следует, что:

$$U_0 - \sigma_s b l x = -kT \ln \left(\frac{\varepsilon}{\rho_{0d} a b} \right) \text{ при } x=x_0, \tag{10}$$

где x_0 – координата, соответствующая максимуму потенциального барьера.

После преобразований (10) получим:

$$\sigma_s = \frac{2U_0}{b l x_0} + \frac{2kT}{b l x_0} \ln \left(\frac{\varepsilon}{\rho_{0d} a b} \right), \tag{11}$$

где σ_s – напряжение предела пластичности, когда ρ_{0d} остается примерно постоянной величиной при малых величинах пластической деформации ε . Функцию (11) можно представить так:

$$\sigma_s = \sigma_{0s} + \frac{2kT}{b l x_0} \ln \left(\frac{\varepsilon}{\rho_{0d} a b} \right), \tag{12}$$

где σ_{0s} – предел пластической деформации хорошо отожженного металла.

Графически зависимость $\sigma_s=f(\varepsilon)$ выглядит так, как показано на рис. 10.

Из проделанной работы следует, что:

1) рассмотренная модель роста предела текучести от малых предварительных напряжений, представленная уравнением (12), по крайней мере, качественно описывает экспериментальные зависимости, приведенные на рис. 5 и 6.

2) для того чтобы описать экспериментальные зависимости представленные на рис. 1 и 3, необходимо в уравнение (11) ввести плотность тормозящих пластическую деформацию потенциальных барьеров – ρ_b , поскольку при малых дозах облучения $\sim 10^{17}$ нейтронов/см² [7]

$$\rho_b \sim \Phi t,$$

где $\Phi t = D$ – доза облучения.

Как показывает опыт [9], при увеличении внешней деформирующей силы длина (ℓ) дислокации увеличивается за счет ее задержки при прохождении потенциальных барьеров. При этом дислокация, выгибаясь при прохождении барьера, захватывает новые, все более увеличивая свою энергию. Используя струнную модель дислокации [10], можно показать, что длина дислокации как функция ρ_b и σ_s будет:

$$\ell = \sqrt[3]{\frac{Eb}{x_0\rho_b\sigma_s}}, \tag{13}$$

где E – модуль Юнга; ρ_b – плотность потенциальных барьеров в плоскости скольжения; σ_s – предел пластичности.

Подставляя (13) в (11) и сделав некоторые преобразования, получим:

$$\sigma_s^{2/3} = \left(\frac{2U_0}{bx_0}\right) \left(\frac{x_0\rho_b}{E_b}\right)^{1/3} \times \left[1 + \frac{kT}{U_0} \ln\left(\frac{\varepsilon}{\rho_{0d}ab}\right)\right]. \tag{14}$$

Если обе части уравнения возвести в куб, то получим:

$$\sigma_s = A(\rho_b)^{1/2} A(\Phi t)^{1/2}. \tag{15}$$

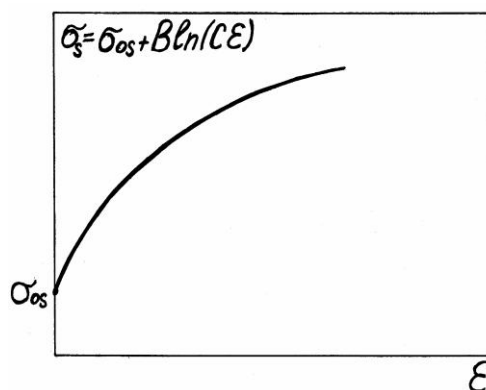


Рис. 10. Качественная зависимость $\sigma_s=f(\varepsilon)$ от величины малых предварительных пластических деформаций

Полученное уравнение (15) качественно согласуется с экспериментальными данными, приведенными на рис. 1 и 3.

Из проделанной нами работы можно сделать следующие выводы:

1. Одинаковость характера изменения предела пластичности как от действия радиационных потоков, так и предварительных пластических деформаций говорит о том, что механизм закрепления дислокаций один и тот же. В его основе лежат взаимодействия точечных дефектов и их скопления с дислокациями.

2. Малые пластические деформации и предшествующие им упругие внутренние напряжения активируют процесс диффузии существующих и вновь рожденных точечных дефектов к дислокациям, образуя точки (узлы) или комплексы закрепления, что приводит к увеличению предела пластичности.

3. Амплитуды закрепляющих потенциальных барьеров и их распределение в плоскости скольжения носят вероятностный характер и могут быть представлены распределением Гаусса –

$$f(x) = \frac{U_0}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\delta} e^{-(x-x_0)/2\delta^2}.$$

4. Величина предела пластичности (или критического напряжения сдвига) в начальной стадии хода кривой «напряжение–деформация» определяется числом закрепляющих узлов (потенциальных барьеров), их видом (вакансии, бивакансии, их микрокомплексы), их функцией распределения.

Библиографический список

1. Конеевский С.Т. Действие облучения на материалы (Введение в радиационное материаловедение). М.: Атомиздат, 1967.
2. Томпсон М. Дефекты и радиационные повреждения в металлах. М.: Мир, 1971.
3. Makin H.J., Blewitt T.H. AERE – R – 3800, 1961.
4. Diehl J., Venice Conf., vol. 1, 1962, p. 205.

5. Правдюк Н.Ф. II Женевская конф. совет. ученых. М., 1959. С. 610.
6. Makin H.J., Gillies E.J., Inst. Metals, 86, 108, 1958.
7. Parker E.R., Hazlett T.H. Principles of Solution Hardening. Relations to microstructure, 1954, p. 30. America Society for Metals.
8. Дубский Г.А., Дубская Т.Я., Егорова Л.Г. Физика процесса накопления и сброса дислокаций и скрытой энергии при пластической деформации металлов // Материаловедение и термическая обработка металлов: Междунар. сб. науч. трудов. Магнитогорск, 2004. С. 19–25.
9. Makin M.J. Berkley Conf. 1961, disc. P. 308.
10. Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир, 1967.

УДК 669.074; 621.783

В. Л. Евстигнеев, Т. В. Майорова, М. Ю. Рябчиков

ПРИМЕНЕНИЕ БАЛАНСОВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

В последнее время цены на ресурсы непрерывно растут, что требует от предприятий непрерывного поиска новых поставщиков сырья. И доменное производство в этом смысле не исключение. Как следствие – наличие больших колебаний химического состава компонентов шихты, что приводит к неоднородности химического состава чугуна на выпуске.

Предложенная методика позволяет при значительных колебаниях химического состава шихты путем корректировки шихтовок получать чугун с заданными показателями, а также путем проведения оптимизации состава доменной шихты понизить расход кокса – одного из самых дорогостоящих компонентов доменной шихты.

Таким образом, выбранным критерием оптимизации состава доменной шихты является минимизация расхода кокса. Учитывается влияние на систему следующих ограничений:

- 1) $t_{\min} < t < t_{\max}$;
- 2) $M_{\text{чуг}} = \text{const}$;
- 3) $0,7Q_{\max} < Q_{\partial} < Q_{\max}$;
- 4) $M_3 = f(V_n, M_{\text{чуг}})$,

где t_{\min} , t_{\max} , t – минимальная, максимальная и текущая температуры чугуна и шлака; $M_{\text{чуг}}$ – усредненный выход чугуна, т; Q_{\max} , Q_{∂} – максимальный и текущий расходы дутья; M_3 – масса загружаемых шихтовых материалов, т; V_n – полезный объем печи.

Кроме того, в качестве ограничения может быть принят фиксированный, или изменяющийся в определенных пределах, расход какого-либо компонента шихты, в том числе пределы изменения соотношения агломерат/окатыши. Также к ограничениям необходимо отнести заданное содержание примесей в чугуне (Mn, P, S, Si), или пределы их варьирования.

Исходя из поставленной задачи, параметры доменного процесса как объекта управления раз-

делили на три группы: входные воздействия, параметры состояния и выходные величины. К входным воздействиям относятся: химический и силовый составы железорудного сырья, кокса и флюса; соотношение их количеств в шихте; расход, температура, состав комбинированного дутья; расход, химический состав, температура природного газа и других дутьевых добавок; соотношение этих параметров. К параметрам состояния относятся: давление, температура и химический состав газа в различных областях печи. К выходным параметрам отнесем: состав шихты; химический состав, температуру и количество чугуна, шлака, колошниковой пыли и газа.

За основу нами взята балансовая модель, с помощью которой характеризуем начальное и конечное состояние материальных и энергетических потоков в печи. Балансы отдельных элементов и окислов различаются формой в зависимости от того, какими компонентами шихты и дутья вносятся каждый из них и с какими продуктами он уносится из печи. Согласно [1] уравнение баланса любого элемента X имеет следующий вид:

$$\sum p_i X_i + \phi X_{\text{фл}} + m X_m + k X_R + V'_\partial X_\partial + s X_S = [X] + U(X) + \Pi X_{\Pi} + V'_2,$$

где p_i , ϕ , m , k , V'_∂ , s — расход соответственно i -го железосодержащего компонента (руды, агломерата, окатышей), флюса, марганцевой или магниевой добавки, кокса, дутья (влажного) и дутьевой добавки, кг(м³)/кг чугуна; U , Π , V'_2 — выход соответственно шлака, колошниковой пыли и газа (влажного), кг(м³)/кг чугуна.

Расход материалов устанавливаем таким, чтобы, как минимум, были удовлетворены три условия:

1) расход кокса должен быть достаточным для проведения всех процессов;

2) поступление железа с компонентами шихты должно обеспечивать необходимое его содержание в чугуне;

3) компоненты шихты должны обеспечивать получение шлака заданной основности.

Также могут быть установлены дополнительные условия:

4) содержание марганца (или фосфора) в чугуне должно соответствовать заданному значению;

5) соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в шлаке должно равняться заданной величине;

6) содержание MgO в шлаке должно равняться заданной величине.

При прогнозе показателей доменной плавки в установившихся режимах использовали также методику [2]. Она включает определение состава шихты, расхода кокса и производительности доменной печи, температуры и расхода дутья, количества колошникового газа и его температуры, температуры газа на входе в зону замедленного теплообмена и потерь тепла при заданных параметрах процесса (влажности дутья и содержания в нем кислорода, расходе дутьевых добавок, химическом составе и температуре загружаемых шихтовых материалов).

В качестве показателя, характеризующего приемлемость параметров комбинированного дутья, использована теоретическая температура горения.

Для расчета степени использования CO и H_2 составим баланс отнимаемого ими кислорода. Полученное уравнение решим, используя экспериментальные данные, по соотношению между ними.

По результатам экспериментальных исследований соотношение между степенями использования водорода ζ_{H} и монооксида углерода ζ_{CO} описывается выражением:

$$\zeta_{\text{H}}/\zeta_{\text{CO}} = 1,41 - 1,07 \cdot \zeta_{\text{CO}}.$$

Решаем систему уравнений:

$$\begin{cases} 0,5 \cdot (\text{CO}_{\text{печи}} \cdot \zeta_{\text{CO}} + \text{H}_{2\text{всего}} \cdot \zeta_{\text{H}}) = \text{O}_{2\text{газ}}, \\ \zeta_{\text{H}}/\zeta_{\text{CO}} = 1,41 - 1,07 \cdot \zeta_{\text{CO}}. \end{cases}$$

Рассчитываем расход дутья на основе определения допустимого общего перепада давления газа и коэффициента сопротивления шихты с использованием части информации по базовому периоду.

Зависимость перепада давления газа (dP) от расхода дутья Q_d описывается выражением:

$$dP = \lambda_{\text{Ш}} Q_d^{1,89},$$

где $\lambda_{\text{Ш}}$ – коэффициент сопротивления шихты.

Для базового периода общий перепад давления составляет:

$$dP = P_0 - P_{\text{к.з}},$$

где P_0 – давление дутья по исходным данным, кПа; $P_{\text{к.з}}$ – давление колошникового газа, кПа.

Расход дутья на 1 м^3 полезного объема печи равен:

$$Q_0 = Q_{\text{д.чуг}} / (\text{КИПО}_{\text{б.п}} \cdot 1440),$$

где $Q_{\text{д.чуг}}$ – расход дутья на 1 т чугуна, м^3 ; 1440 – количество минут в сутках.

Связь общего коэффициента сопротивления шихты с коэффициентами кокса $\lambda_{\text{к}}$ и железорудных материалов $\lambda_{\text{р}}$ можно представить в виде:

$$\lambda_{\text{Ш}} = \lambda_{\text{к}} v_{\text{R}} + \lambda_{\text{р}} v_{\text{P}},$$

где $v_{\text{к}}$, $v_{\text{р}}$ – объемные доли кокса и железорудных материалов в шихте соответственно ($v_{\text{к}} + v_{\text{р}} = 1$).

Зависимость соотношения коэффициентов сопротивления (потерь напора в слое) железорудных материалов и кокса по материалам экспериментальных исследований имеет вид:

$$\lambda_{\text{р}}/\lambda_{\text{R}} = 7 + 0,59 \cdot m,$$

где m – среднее содержание мелочи класса $0...5$ в железорудных материалах, %.

На основе этого для базового периода получаем систему уравнений:

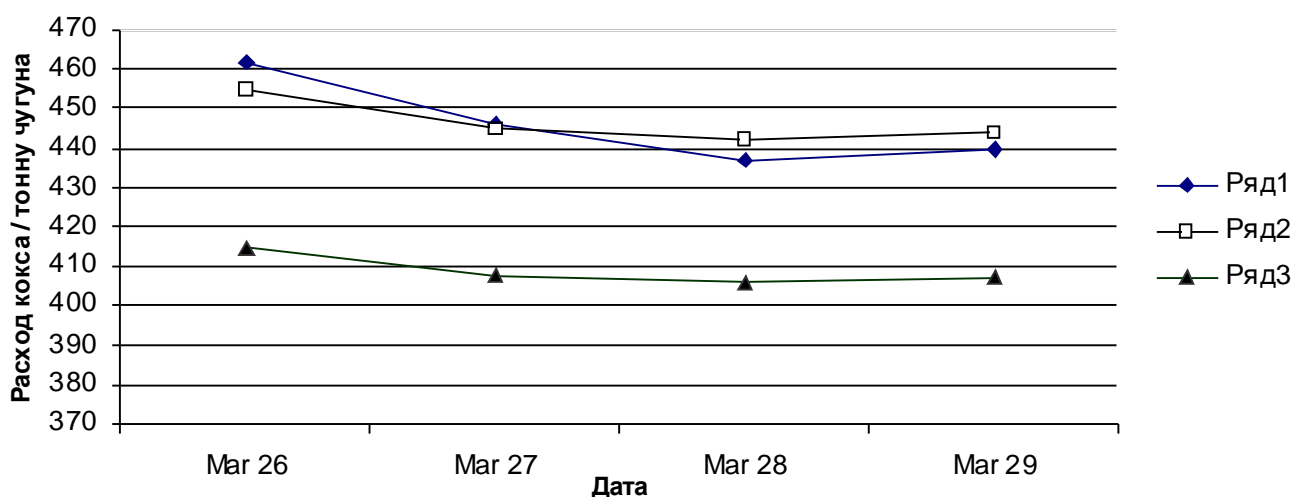
$$\begin{cases} \lambda_{\text{ш}} = \lambda_{\text{к}} v_{\text{R}} + \lambda_{\text{р}} (1 - v_{\text{R}}), \\ \lambda_{\text{р}}/\lambda_{\text{R}} = 7 + 0,59 \cdot m. \end{cases}$$

Решая эту систему, находим: $\lambda_{\text{р}}$, $\lambda_{\text{к}}$, что позволяет определить коэффициенты сопротивления, допустимый общий перепад давления и расход дутья для рассматриваемых новых условий.

Для расчета показателей доменной плавки использовали метод, разработанный А.Н. Раммом [1], называющийся «комплексным» и заключающийся в том, что система уравнений материального баланса дополняется уравнением теплового баланса:

$$p\bar{q}_{\text{р}} + \phi\bar{q}_{\text{фл}} + k\bar{q}_{\text{к}} + s\bar{q}_{\text{с}} = 0,$$

где q (кДж/кг) с соответствующим индексом является тепловым эквивалентом, выражающим «приведенную» затрату тепла на все физико-химические превращения, которым подвергается в печи 1 кг компонента шихты.



Усредненные расходы кокса на тонну чугуна за 26–29 марта 2001 года:
 ряд 1 – данные по доменной печи № 1 ОАО «ММК»; ряд 2 – результаты расчетов по модели при известных условиях работы доменной печи № 1; ряд 3 – те же условия, но количество окатышей в шихте доведено до 80% от рудной массы

В результате решения системы уравнений общего и зональных тепловых балансов печи определяем температуру колошникового газа, температуру газа на входе в зону замедленного теплообмена и потери тепла.

Для вычисления показателей доменной плавки по уравнениям прогноза, помимо использования термохимических констант, теплоемкостей и ряда других известных или принимаемых из практики данных, требуется задать некоторые характеристики, зависящие от кинетических особенностей восстановления и теплообмена в печи, а также характеристику скорости схода шихтовых материалов, зависящую от газодинамики процесса.

Ход восстановительного процесса оценивался показателем степени прямого восстановления и степенью использования газов (η_{CO} , η_{H_2}). При расчете по балансу тепла в нижней зоне необходимо задать граничную температуру зон и разность температур шихты и газа на границе зон, вычисляя при этом температуру колошника из баланса тепла в верхней зоне.

Для решения задач оптимизации доменной шихты нами создано программное обеспечение. Поисковая задача заключается в оценке возможности выплавки чугуна из заданных шихтовых материалов, а также отыскании такого соотношения компонентов шихты, при котором расход кокса был бы минимален, учитывая при этом все наложенные ограничения. Решение поисковой задачи осуществляется методами нелинейного программирования.

В расчете шихты участвуют потенциально

наличные рудные материалы, добавки, а также кокс. Информация о наличии шихтовых материалов вводится пользователем при заполнении или корректировке исходной таблицы.

Пользователь может задействовать те или иные ограничения, а также задать их численное значение. Параметры, используемые программой при решении системы материально-теплового баланса, вынесены в отдельный файл, и пользователю в специальном окне предоставлена возможность редактирования всех этих параметров, что делает модель более гибкой. Ведется работа над подключением программы к существующей базе данных по доменной печи № 1 ОАО «ММК».

Разработанная модель может использоваться для расчета оптимального состава шихты и определения в результате решения системы уравнений тепловых балансов для разных зон печи некоторых показателей доменной плавки. Проверка работоспособности программы производилась на основании среднестатистических данных по доменной печи № 1 ОАО «ММК», а также на основании расчета [2].

В настоящее время в доменном цехе количество окатышей меняется в пределах 30–40%, и колебания удельного расхода кокса могут находиться в пределах 430–450 кг/т чугуна. Путем доведения количества окатышей до 80% можно снизить удельный расход кокса до 410 кг/т чугуна. Результат работы математической модели для периода работы доменной печи № 1 ОАО «ММК» с 26.3.2001 по 29.3.2001 представлен на рисунке.

Библиографический список

1. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. М.: Металлургия, 1980. 176 с.
2. Сибатуллин С.К. Расчет технических показателей доменной плавки при изменении условий работы печи. Магнитогорск, МГТУ, 2000.

УДК 658.26:621.31.004.12

В. А. Игуменцев, А. В. Малафеев, В. В. Зиновьев

РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА В ЗАДАЧЕ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ

Метод последовательного эквивалентирования успешно применяется на кафедре ЭПП МГТУ для расчета установившихся режимов систем электроснабжения. Преимущества использования этого метода в сравнении с широко распространенными матричными методами заключаются в том, что он обладает большей вычислительной эффективностью в условиях преобладания разомкнутых сетей над замкнутыми и слабой заполненности матриц. Кроме того, метод одинаково эффективен и обладает абсолютной сходимостью для любых разновидностей эксплуатационных режимов, от нормальных до режимов короткого замыкания.

Первоначальная программная реализация этого метода на языке Фортран-IV, подробно рассмотренная в [1], предполагала трудоемкую ручную работу по подготовке исходных данных, заключающуюся в составлении таблиц пересылок для разомкнутых сетей и матриц связей для замкнутых сетей, которые в явном виде задавали ход свертывания и развертывания схемы. Любое изменение схемы, связанное с выводом в ремонт или аварийным отключением оборудования, вызывало необходимость в изменении нумерации элементов и полной переработке таблиц пересылок. Кроме того, алгоритм предполагал разные вычислительные процедуры для замкнутых и разомкнутых участков, причем процедура расчета замкнутой сети не всегда обеспечивала удовлетворительную сходимость. Необходимость в длительной подготовке данных ограничивала область применения метода лишь перспективным планированием режимов, не давая возможности использовать его при оперативных расчетах.

Развитие средств вычислительной техники и систем разработки программного обеспечения,

существенно упростившее написание графической оболочки, позволило модифицировать метод последовательного эквивалентирования для использования его при оперативном управлении режимами. С этой целью была разработана новая реализация метода в интегрированной среде разработки Borland C++ Builder 3.0–6.0, свободная от названных выше недостатков.

В новой версии представление схемы и ее элементов основано на приемах объектно-ориентированного программирования. Структура данных включает в себя несколько классов. Базовый класс предназначен для описания схемы сети в целом и включает методы, организующие расчет режима и работу с файлом. Отдельные стадии расчета относятся к классу несвязанных участков схемы. Класс подсхем (страниц альбома) отвечает за отображение их на экране и вывод результатов. Между отдельными подсхемами устанавливаются связи, являющиеся объектами самостоятельного класса. Использование свойств объектов, показывающих связи между ними, позволяет в иерархических системах осуществлять эквивалентное свертывание электрически связанных схем в любой узел. Каждый элемент является экземпляром соответствующего класса (трансформатор, воздушная линия и т.д.), являющегося, в свою очередь, наследником общего класса элементов схемы. Свойства этих классов включают тип элемента, его порядковый номер, координаты входов-выходов, технические данные, диспетчерскую расцветку, наличие или отсутствие связи с другим элементом, методы – отрисовку и перетаскивание элемента, установление связи при совмещении входов-выходов, расчет параметров схемы замещения. Для выключателей предусмотрено свойство, опреде-

ляющее его включенное или отключенное состояние, а следовательно, взаимосвязи между элементами сети. При сохранении схемы в файл записываются только свойства объектов в двоичном виде, по которым затем восстанавливается вся схема, после чего она отрисовывается на канве формы. Это позволяет отказаться от создания громоздких графических файлов, требующих значительного дискового пространства. Таким образом, управление вычислительным процессом осуществляется непосредственно средствами машинной графики при помощи простейших манипуляций и позволяет полностью визуализировать изменение состава оборудования, конфигурации схемы и ее оперативного состояния.

В алгоритме используется многолучевая схема замещения с одной поперечной ветвью (рис. 1), при эквивалентировании воспринимаемой как внутренние проводимость и ЭДС. Тупиковые элементы содержат только поперечную ветвь. Полноправными элементами схемы замещения являются связи элемента с другими элементами, задаваемые средствами машинной графики. Для связей организован отдельный класс. Для каждого элемента имеется два массива связей, один из которых используется при свёртывании схемы и элементы которого могут уничтожаться, второй же используется при развёртывании схемы и элементы его остаются неизменными.

Ход вычислительного процесса полностью определяется графическими взаимосвязями элементов и не требует задания хода эквивалентирования при помощи таблиц пересылок [1].

Организация прямого хода расчёта не связана непосредственно с иерархией элементов

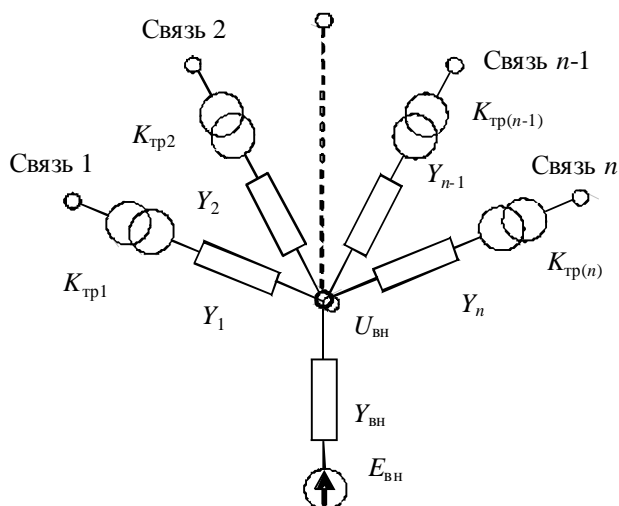


Рис. 1. Схема замещения элемента сети

схемы и не требует специального порядка нумерации. Элементы нумеруются в том порядке, в каком они вводились в исходную схему, свёртывание-развёртывание выполняется в этом же порядке. Метод, по существу, заключается в решении системы линейных уравнений методом прямой и обратной прогонки [2], при этом в качестве коэффициентов прогонки выступают эквивалентные ЭДС, проводимости и коэффициенты трансформации.

В начале расчета выявляются несвязанные между собой участки схемы со своими балансирующими узлами. Непосредственно перед свёртыванием схемы для каждого элемента определяется наличие связей с другими элементами с учётом положения выключателей. Перед первой итерацией расчета определяются параметры продольных ветвей схем замещения всех элементов, а для поперечных ветвей тупиковых элементов задаются начальные значения напряжений. После этого формируются массивы связей между элементами, при этом две связанных между собой продольных ветви разных элементов с номерами i и j заменяются эквивалентными связями с проводимостями и коэффициентами трансформации (1)–(4):

$$\dot{Y}_{j(\text{нов})} = \frac{\dot{Y}_i \dot{Y}_j K_{\text{тp}i} K_{\text{тp}j}}{\dot{Y}_i + \dot{Y}_j}; \quad (1)$$

$$\dot{Y}_{i(\text{нов})} = \dot{Y}_{j(\text{нов})} \frac{K_{\text{тp}i}^2}{K_{\text{тp}j}^2}; \quad (2)$$

$$K_{\text{тp}j(\text{нов})} = \frac{K_{\text{тp}j}}{K_{\text{тp}i}}; \quad (3)$$

$$K_{\text{тp}i(\text{нов})} = \frac{1}{K_{\text{тp}j(\text{нов})}}. \quad (4)$$

На прямом ходе решения задачи (свёртывании схемы) для каждого элемента схемы вызывается функция исключения единичного узла (элемента). При этом:

1) суммируются проводимости по всем выходам элемента и определяется его эквивалентная проводимость:

$$\dot{Y}_{\text{эkv.эл}} = \dot{Y}_{\text{вн}} + \sum_k \dot{Y}_k; \quad (5)$$

2) определяется, есть ли у текущего элемента две связи с одним и тем же элементом. В случае выполнения этого условия одна из этих связей удаляется, определяются эквивалентные проводимость, коэффициент трансформации и ЭДС,

после чего эти величины по оставшейся связи добавляются к аналогичным величинам следующего элемента, с которым первоначально было две связи (рис. 2), по формулам (6–10):

$$\dot{Y}_j = \sum_r \dot{Y}_r; \quad (6)$$

$$K_{трj} = \frac{\sum_r \dot{Y}_r K_{трr}}{\dot{Y}_r}; \quad (7)$$

$$\dot{Y}_{j,нов} = ((K_{три} - K_{трj}) K_{три} + (K_{трj} - K_{три}) K_{трj}) \frac{\dot{Y}_i \dot{Y}_j}{\dot{Y}_{э.кв.эл}}; \quad (8)$$

$$K_{трj,нов} = \frac{\dot{Y}_j K_{трj} + \dot{Y}_i K_{три}}{\dot{Y}_j + \dot{Y}_i}; \quad (9)$$

$$\dot{E}_{j,нов} = \dot{E}_{э.кв.} K_{тр,нов}. \quad (10)$$

В случае, если у текущего элемента есть две связи с разными элементами, выполняется его исключение с созданием новой связи по (11), (12) с двумя оставшимися и разнесением параметров (13), (14), после чего оставшиеся связи удаляются (рис. 3).

Проводимость и коэффициент трансформации новой связи элемента n :

$$\dot{Y}_{нов.св} = \frac{\dot{Y}_i \dot{Y}_j}{\dot{Y}_{э.кв.}} \cdot K_{три}; \quad (11)$$

$$K_{тр.нов.св} = \frac{K_{три}}{K_{трj}}. \quad (12)$$

Новые значения ЭДС и проводимостей для элементов n и m :

$$\dot{E}_{э.кв.,n(нов)} = \frac{\dot{E}_{э.кв.,n} \dot{Y}_{э.кв.,n} + \dot{E}_{э.кв.,вн} \dot{Y}_{вн} \sum_k \frac{\dot{Y}_{э.кв.}}{\dot{Y}_k} K_{тр.э.кв.}}{\dot{Y}_{э.кв.,n} + \dot{Y}_{вн} \sum_k \frac{\dot{Y}_{э.кв.}}{\dot{Y}_k}}; \quad (13)$$

$$\dot{Y}_{э.кв.,n(нов)} = \dot{Y}_{э.кв.,n} + \dot{Y}_{вн} \sum_k \frac{\dot{Y}_{э.кв.}}{\dot{Y}_k}. \quad (14)$$

Исключение элемента разомкнутой сети выполняется по такому же алгоритму и отличается наличием только одной связи вместо нескольких у исключаемого элемента. Результатом прямого хода расчёта являются эквивалентные ЭДС, проводимость и коэффициент трансформации.

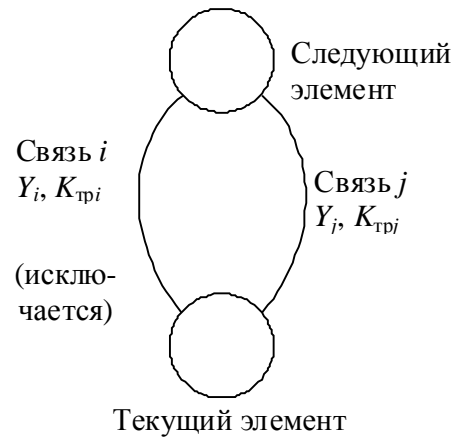


Рис. 2. Уменьшение числа связей текущего элемента с последующим

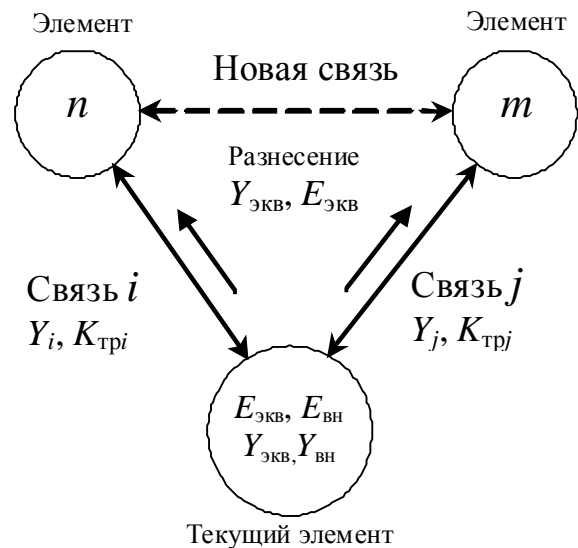


Рис. 3. Разнесение параметров исключаемого элемента

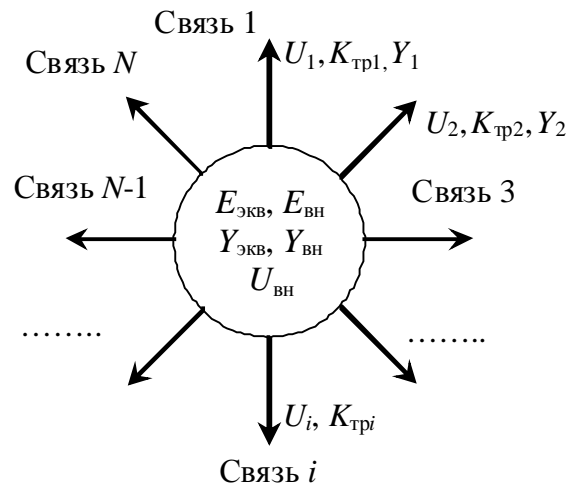


Рис. 4. Внутренние параметры элемента и параметры его связей

Обратный ход расчёта (развёртывание схемы) организуется в соответствии с тем же принципом нумерации, что и прямой ход, но в обратном порядке. На обратном ходе определяются напряжения в схемах замещения элементов сети (кроме элементов-выключателей) и токи (только для элементов-выключателей).

При определении напряжений первоначально рассчитывается фиктивный внутренний ток, определяемый как сумма токов по отдельным связям (15) с учётом коэффициентов трансформации (рис. 4). После этого по найденному току, эквивалентной проводимости и эквивалентной ЭДС рассчитывается напряжение в средней точке схемы замещения (16).

При определении тока, протекающего через элемент-выключатель (17), используются напряжения на тех элементах, с которыми он связан, и коэффициенты трансформации связей этих элементов (рис. 5).

Ток по i -й связи:

$$\dot{I}_i = (\dot{E}_{\text{экв}} - \dot{U}_i K_{\text{тp}i}) \cdot \dot{Y}_i; \quad (15)$$

напряжение в средней точке схемы замещения:

$$\dot{U}_{\text{вн}} = \dot{E}_{\text{экв}} - \frac{\sum_{i=1}^n \dot{I}_i}{\dot{Y}_{\text{экв}}}; \quad (16)$$

искомый ток определяется как

$$\dot{I} = (\dot{U}_0 K_{\text{тp}0} - \dot{U}_1 K_{\text{тp}1}) \cdot \dot{Y}_0. \quad (17)$$

На обратном ходе используются значения эквивалентных проводимостей и ЭДС, последовательно полученные на всех шагах прямого хода решения. Отличительной особенностью алгоритма является организация обратного хода по

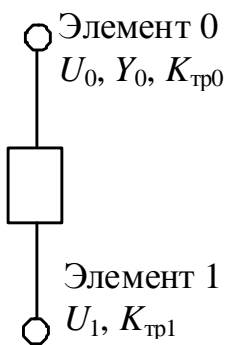


Рис. 5. Параметры связей элемента-выключателя

напряжению, это позволяет осуществить регулярный метод определения токов во всех элементах расчётной схемы без реконструкции узлов промежуточных схем. Введение некоторого количества итераций связано с тем, что электрические нагрузки задаются неизменным потоком мощности, по величине ко-

торого затем определяется проводимость (18):

$$\dot{Y}_n = \frac{\hat{S}}{\hat{U}^2}. \quad (18)$$

При этом на первой итерации напряжение задается равным номинальному, на последующих итерациях его величина уточняется.

Порядок эквивалентирования не требует обязательного учёта иерархических принципов построения электрических сетей. Энергосистема (шины бесконечной мощности) входят в процесс эквивалентирования обычной элементарной схемой (см. рис. 1), но $E_{\text{вн}} = U_{\text{сист}}$. Это свойство метода позволяет рассчитывать схемы, содержащие любое количество балансирующих узлов. В расчет при этом должно вводиться фактическое напряжение на шинах системных подстанций для соответствия результатов расчета режиму существующим потокам между ними (в т.ч. по шунтирующим связям).

На основе представленного метода разработана программа для ЭВМ [3], прошедшая промышленное внедрение на ОАО «ММК».

Одной из основных проблем при разработке и использовании алгоритмов расчёта режимов электрических систем является проблема существования решения. Наиболее простые алгоритмы обладают, как правило, плохой сходимостью. Отличительной особенностью рассмотренного метода является его регулярность, поскольку на обратном ходе решения задачи по эквивалентным ЭДС и проводимостям определяются как токи, так и напряжения. Однако в алгоритм вводится определённое количество итераций, что вызвано заданием нагрузок неизменным потоком мощности. Такой способ представления предполагает, что проводимость нагрузки будет зависеть от напряжения в узле, а следовательно, для уточнения результатов необходимо повторение расчётной процедуры. Дополнительную неточность вносит возможность введения в расчёт статических характеристик нагрузки по напряжению. Для оценки сходимости алгоритма были проведены расчёты установившегося режима при разном количестве итераций для нагрузочных элементов с учётом и без учёта крутизны статической характеристики по напряжению. Расчеты применительно к схеме крупного промышленного предприятия показывают, что сходимость достигается за 3–4 итерации. Это обеспечивает достаточно малое время вычислений, необходимое в процессе диспетчерского управления

эксплуатационными режимами системы электроснабжения.

Выводы

Разработанная система представления элементов схемы обеспечивает ее быструю корректировку при проведении оперативных расчетов и позволяет автоматизировать процесс подготовки информации о взаимосвязях между элементами. Действия оператора (диспетчера)

полностью визуализированы.

Модифицированный алгоритм последовательного эквивалентирования одинаково эффективен для систем электроснабжения любой конфигурации, что обусловлено единым способом представления замкнутых и разомкнутых сетей.

Организация обратного хода по напряжению позволяет существенно улучшить сходимость алгоритма.

Библиографический список

1. Игуменцев В.А., Саламатов И.А., Коваленко Ю.П. Расчёт установившегося режима системы электроснабжения промышленного предприятия методом последовательного эквивалентирования // Электричество. 1986. № 8. С. 7–12.
2. Вержбицкий В.М. Численные методы. Линейная алгебра и нелинейные уравнения. М.: Высш. шк., 2000. 266 с.
3. Игуменцев В.А., Зиновьев В.В., Малафеев А.В. Программа «Расчет и оптимизация установившихся эксплуатационных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий» // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005612391 от 18.07.05.

УДК 539.292

Р.С. Ильясов, М.Ю. Главатских, Ю.И. Савченко

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ВБЛИЗИ МАГНИТНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ 2-го РОДА «ПОРЯДОК–БЕСПОРЯДОК» И «ПОРЯДОК–ПОРЯДОК»

Электромагнитно-акустическое преобразование (ЭМАП) представляет собой фундаментальное явление частичного преобразования энергии электромагнитных колебаний в энергию акустических колебаний [1]. Явление ЭМАП в твердых телах может происходить за счет различных механизмов, в основе которых лежат нескомпенсированные взаимодействия элементарных носителей электрических зарядов, электрических и магнитных дипольных моментов с электромагнитным полем и друг с другом. Процесс генерации ультразвука происходит без прямого контакта преобразователя с твердым телом, что открывает широкие возможности использования ЭМАП как в ходе физических экспериментов, так и при решении практических задач материаловедения и неразрушающего контроля. Во всех вышеперечисленных случаях важным информативным параметром является эффективность преобразования, которая для различных материалов, механизмов и внешних условий может существенно отличаться.

В магнитоупорядоченных твердых телах основными механизмами ЭМАП являются магнитоупругие взаимодействия, сопровождающие процессы намагничивания (смещение доменных

границ, процессы вращения, парапроцесс). Изменение магнитного поля, температуры и давления могут привести к значительным изменениям эффективности преобразования.

В конце 60-х годов в процессе температурных исследований в ферромагнитных сталях было обнаружено явление гигантского (почти на два порядка по сравнению с комнатной температурой) увеличения эффективности генерации продольных акустических волн вблизи точки Кюри T_c (переход 2-го рода «порядок–беспорядок») [2]. Практическая значимость данного результата была очевидной, и вскоре на основе этого эффекта были разработаны промышленные установки для неразрушающего контроля (дефектоскопии, толщинометрии) листового проката и труб в горячем состоянии в условиях их производства [3].

Результаты этих исследований послужили толчком к целенаправленным исследованиям явления ЭМАП вблизи различных типов магнитных фазовых переходов (МФП) для широкого класса магнетиков. Последующие исследования в 3-d, 4-f магнетиках и в интерметаллических соединениях показали, что аномальное увеличение эффективности преобразования характерно не только для точки Кюри, но и для переходов

«ферромагнетик – антиферромагнетик», «антиферромагнетик – парамагнетик», а также для ряда спин-переориентационных фазовых переходов (спонтанных и индуцированных магнитным полем) [4–6]. Физически это может быть интерпретировано следующим образом. Во всех случаях в области фазового перехода магнитная подсистема теряет устойчивость и резко возрастает амплитуда колебаний магнитной подсистемы (намагниченности), вызванных воздействием электромагнитного поля.

В настоящей работе предложен единый подход, позволяющий качественно описать аномалии эффективности ЭМАП вблизи фазовых переходов 2-го рода как «порядок–беспорядок», так и «порядок–порядок». Этот подход предполагает разработку феноменологической модели явления ЭМАП, устанавливающую функциональную связь между амплитудой упругих смещений акустических волн и макроскопическими характеристиками магнетика, а также анализ их поведения с использованием термодинамической теории Ландау фазовых переходов 2-го рода. В рамках предложенного подхода исследованы закономерности эффективности ЭМАП в окрестности точки Кюри в изотропных ферромагнетиках и вблизи переходов 2-го рода «порядок–порядок», ограничивающих область спиновой переориентации (СП) в одноосных магнетиках на примере модельного объекта – монокристалла кобальта.

Согласно феноменологической модели, развитой для описания амплитуды упругих смещений продольного ультразвука, возбуждаемого за счет изотропной магнитоупругости парапроцесса в окрестности точки Кюри, было получено следующее выражение [7, 8]:

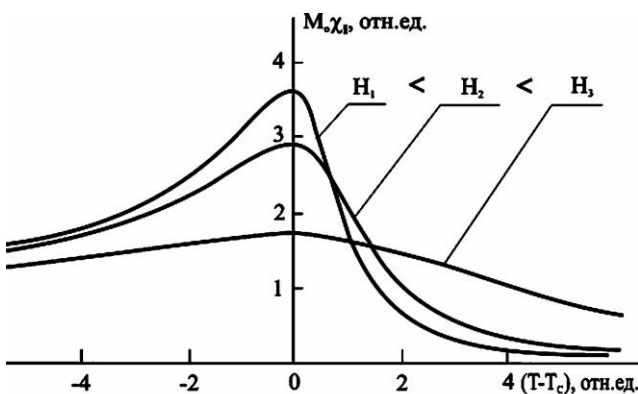


Рис. 1. Поведение параметра $M_0 \chi_{||}$ в окрестности температуры Кюри при различных значениях магнитного поля

$$u_l \approx \left(\frac{q_l}{q_s} \right)^2 \frac{M_0 \chi_{||} Q h_y^M}{\rho \omega c_l \left[1 - i \left(\frac{q_l}{q_s} \right)^2 \right]},$$

где $q_l = \omega/c_l$, c_l – скорость продольной волны; ρ – плотность; $q_s = (\mu_0 \mu \sigma_e \omega, \chi_{||})^{1/2}$ и μ – магнитные восприимчивость и проницаемость по переменному полю; M_0 – намагниченность; σ_e – удельная электропроводность; Q – магнитоупругая постоянная парапроцесса; h_y^M – напряженность переменного магнитного поля в металле.

В узком интервале температур вблизи T_c влиянием изменения скин-слоя можно пренебречь, так как восприимчивость в области парапроцесса $\chi_{||} \ll 1$, $\mu \sim 1$, а электропроводность изменяется слабо. Тогда температурная зависимость эффективности генерации продольного ультразвука будет определяться произведением $Q \cdot M_0 \chi_{||}$ (Q – независимая от температуры константа магнитоупругого взаимодействия), которое может быть получено из термодинамического описания ферромагнетика вблизи T_c . Для этого термодинамический потенциал записывается в виде разложения в ряд по степеням намагниченности:

$$\Phi = \Phi_0 + AM^2 + BM^4 + C\sigma + D\sigma^2 + QM^2\sigma + \mu_0 MH.$$

Здесь A и B – термодинамические коэффициенты; C и D – упругие модули; Q – магнитоупругая постоянная; σ – упругие напряжения; H – напряженность магнитного поля.

Равновесное значение намагниченности M_0 определяется из условия минимума термодинамического потенциала $\partial\Phi/\partial M = 0$ [9].

$$4BM_0^3 + (2A + 2Q\sigma)M_0 - \mu_0 H = 0. \quad (1)$$

Из этого же уравнения получаем известное выражение для магнитной восприимчивости парапроцесса:

$$\chi = \left(\frac{\partial M}{\partial H} \right)_T = \frac{\mu_0}{2A + 2Q\sigma + 12BM_0}. \quad (2)$$

Для качественного описания амплитуды генерации продольных волн вблизи температуры Кюри (считая, что $u_l(T) \sim M_0 \chi_{||}$) необходимо сначала решить кубическое уравнение (1) относительно $M_0(T)$, затем в соответствии с (2) определить поведение $\chi_{||}(T)$ и найти их произведение. При этом предполагается, что вблизи температу-

ры $T \sim T_c$ $A = a(T - T_c)$, а коэффициент B положителен и постоянен.

Результаты расчета при различных значениях поляризующего поля H представлены на рис. 1. Видно, что положение максимума $M_o \cdot \chi_{||}$ по температуре точно соответствует температуре Кюри при любом значении напряженности поляризующего поля (влияние H сводится лишь к уменьшению величины максимума и к его размыванию), в отличие от магнитной восприимчивости, максимум которой в магнитном поле смещается в область высоких температур и совпадает с точкой Кюри лишь при $H=0$ [10]. При формировании параметра $M_o \cdot \chi_{||}$ уменьшение магнитной восприимчивости в магнитном поле (из-за смещения максимума $\chi_{||}(T)$) компенсируется увеличением истинной намагниченности. Экспериментальное подтверждение этого факта можно найти в работе [7].

Предложенный термодинамический подход применим также к описанию поведения амплитуды электромагнитной генерации акустических волн вблизи фазовых переходов 2-го рода типа «порядок–порядок», в частности в области СП в одноосных магнетиках [11]. Спиновая переориентация – это поворот вектора спонтанной намагниченности M_s от направления, совпадающего с легкой осью гексагонального магнетика к легкой плоскости, происходящий при изменении температуры. Точки начала и завершения СП в отсутствие магнитного поля являются точками фазовых переходов 2-го рода.

Термодинамический потенциал записывается с учетом энергии анизотропии и зеемановской энергии, поскольку генерация ультразвука на частоте электромагнитных колебаний (линейный режим преобразования) происходит в присутствии постоянного магнитного поля:

$$\Phi = k_1 \sin^2 \theta + k_2 \sin^4 \theta + M_s H_o \cos(\theta_o - \theta), \quad (3)$$

где k_1 и k_2 – зависящие от температуры константы магнитной анизотропии; θ_o – угол между гексагональной осью и направлением приложенного магнитного поля; θ – угол между гексагональной осью и направлением вектора намагниченности.

Часть зеемановской энергии, отвечающая за взаимодействие магнетика с переменным магнитным полем, в выражении (3) не приведена, поскольку в случае генерации ультразвука на частоте электромагнитного поля $H_o \gg h$ (h – переменное магнитное поле). Из условия энергетического

минимума $\partial \Phi / \partial \theta = 0$, $\partial^2 \Phi / \partial \theta^2 > 0$ получается уравнение Аррота, позволяющее определить равновесное значение угла θ :

$$2k_1 \sin \theta \cos \theta + 4k_2 \sin^3 \theta \cos \theta + M_s H_o \cos \theta_o \sin \theta - M_s H_o \sin \theta_o \cos \theta = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) в явном виде может быть решено для двух ситуаций: поле H_o ориентировано либо вдоль оси кристалла ($\theta_o=0$), либо перпендикулярно оси ($\theta_o=90^\circ$). Рассмотрим генерацию продольных волн в тангенциальном магнитном поле ($H_o \perp c$, $\theta_o=90^\circ$, $H_o \parallel h$). Для рассматриваемой геометрии эксперимента нормаль к поверхности однодоменного магнетика n и направление распространения продольной волны q_1 совпадают с осью c . Амплитуда упругих смещений продольной волны согласно феноменологической модели ЭМАП в одноосных магнетиках также определяется произведением $u_1 \sim M \cdot \chi_{||}$ [6], где намагниченность находится соответствующей проекцией вектора M_s на направление приложенного постоянного магнитного поля (в данном случае $M = M_s \sin \theta$, а магнитная восприимчивость $\chi_{||} = \partial M / \partial H_o$). Уравнение Аррота принимает вид:

$$2k_1 \sin \theta + 4k_2 \sin^3 \theta - M_s H_o = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) относительно $\sin \theta$ позволяет определить равновесные значения угла и в конечном счете получить выражение для амплитуды упругих смещений в виде $M \cdot \chi_{||}$. Влияние температуры прослеживается через изменение констант $k_1(T)$ и $k_2(T)$ на примере классического одноосного магнетика – кобальта [12]. Предполагается, что вектор M_s не изменяется по абсолютной величине (это справедливо для узкого температурного интервала вдали от температуры Кюри), меняется только его ориентация относительно кристаллографических осей. По аналогичной схеме получено выражение для амплитуды упругих смещений продольной волны для случая: $\theta_o=0^\circ$, $H_o \parallel h$, $H_o \parallel c$. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

В обоих случаях увеличение приложенного магнитного поля приводит к уменьшению эффективности генерации продольных волн, но местоположение максимума по температуре не изменяется. Однако максимумы амплитуды сигнала для каждой ситуации наблюдаются только вблизи одной из характерных температур. Когда магнитное поле перпендикулярно гексагональной оси, пик проявляется при T_1 (переход «легкая ось – угловая фаза»); когда

поле направлено вдоль оси – при T_2 (переход «угловая фаза – легкая плоскость»). Известно [11], что для рассматриваемых ориентаций магнитного поля по отношению к осям кристалла эти точки не являются фазовыми переходами 2-го рода. Например, для случая $H_0 \perp c$ любое слабое поле отклоняет вектор M_s от оси c , и переход «легкая ось – угловая фаза» вблизи T_1 не реализуется. Для этой геометрии сохраняется переход «угловая фаза – легкая плоскость» (в точке T_2), поскольку влияние внешнего поля сводится лишь к стабилизации состояния «легкая плоскость». Однако при $T = T_2$ особенностей генерации нет. Это объясняется тем, что при $H_0 \perp c$ в окрестности T_2 даже слабое магнитное поле приводит магнетик к состоянию насыщения в легкой плоскости и модулирование переменным магнитным полем h угла θ в этом же направлении не вызывает появления переменной намагниченности и, следовательно, переменная магнитоупругая деформация также отсутствует. Вблизи T_1 , напротив, сохраняется возможность модуляции полем h угла θ и появления соответствующей компоненты переменной намагниченности. Однако, несмотря на то, что в магнитном поле точка T_1 теряет признаки перехода 2-го рода, максимум $M \cdot \chi_{\parallel}$ наблюдается именно в этой точке.

В области СП, в отличие от точки Кюри, возможна генерация и продольных, и поперечных волн. Генерация поперечных акустических волн происходит при нормальной ориентации поляри-

зующего поля к поверхности объекта и модуляции тангенциальным переменным полем ($H_0 \parallel n \perp h$). Решение для амплитуды упругих смещений поперечной волны $u_{\perp} \sim M \cdot \chi_{\perp}$ ($\chi_{\perp} = \partial M / \partial h$) получено для двух ориентаций магнитного поля по отношению к оси c . Алгоритм решения аналогичен случаю продольных волн, но термодинамический потенциал записан с учетом влияния и переменного магнитного поля:

$$\Phi = k_1 \sin^2 \theta + k_2 \sin^4 \theta - M_s H_0 \sin \theta - M_s h_c \cos \theta.$$

Температурные зависимости эффективности электромагнитной генерации поперечных волн представлены на рис. 3. Сравнивая температурные зависимости амплитуды генерации поперечных волн для двух ориентаций магнитного поля по отношению к оси c , можно заметить, что максимум при $H_0 \perp c$, в отличие от продольных волн, наблюдается вблизи точки T_2 , для которой сохраняются признаки перехода 2-го рода. Это можно объяснить тем, что во взаимно перпендикулярных магнитных полях $H_0 \perp h$ состояние насыщения не препятствует модуляции намагниченности около положения равновесия путем изменения угла θ , и, как следует из расчетов, данный процесс протекает с наибольшей эффективностью именно вблизи фазового перехода. Смещение максимума $M \cdot \chi_{\perp}$ с полем является следствием смещения самой точки T_2 . С ростом магнитного поля, перпендикулярного оси c , пе-

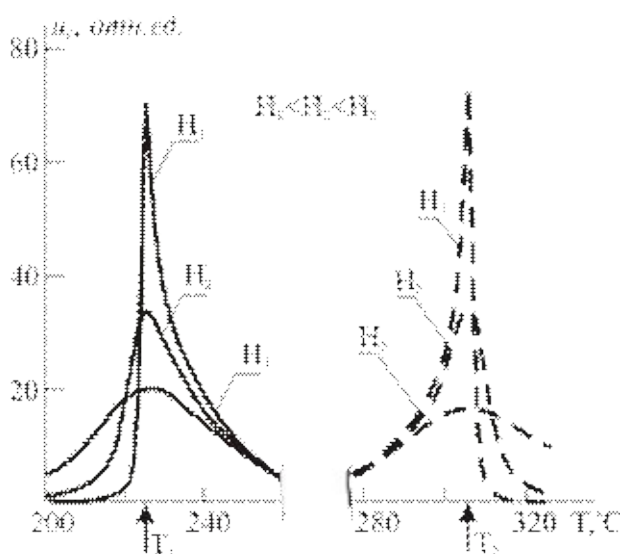


Рис. 2. Температурные зависимости амплитуды упругих смещений продольных волн в магнитном поле $H_0 \parallel h$: сплошная линия – $H_0 \perp c$; пунктир – $H_0 \parallel c$

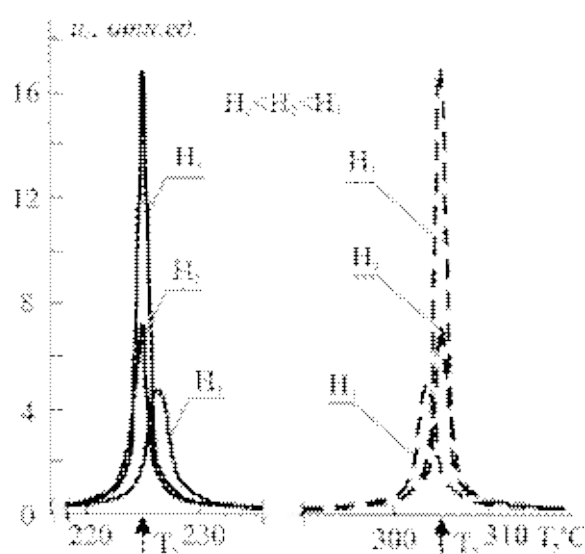


Рис. 3. Температурные зависимости амплитуды упругих смещений поперечных волн в магнитном поле $H_0 \perp h$: сплошная линия – $H_0 \parallel c$; пунктир – $H_0 \perp c$

реход «угловая фаза – легкая плоскость» “облегчается” и происходит при меньших температурах. Для $H_0 \parallel c$ наблюдается симметричная картина, и максимум генерации поперечных волн проявляется в окрестности температуры T_1 . Эксперименты, проведенные на монокристалле кобальта, качественно подтверждают расчетные зависимости [13].

Таким образом, модельными расчетами установлено и экспериментально подтверждено, что максимум параметра $Q \cdot M_0 \cdot \chi_{||}$ и амплитуда генерации акустических волн точно соответствуют температуре Кюри, которая в отсутствие внешнего магнитного поля является фазовым переходом второго рода, и положение максимума не зависит от величины магнитного поля. Полученный результат является следствием того, что в формировании эффективности генерации акустических волн наряду с магнитной восприимчивостью, являющейся второй производной термодинамического потенциала, участвует и равновесное значение намагниченности (первая производная), совместное действие которых стабилизирует температурные положения максимумов

эффективности преобразования в точках фазовых переходов. Исследования в кристаллах одноосных магнетиков показали, что закономерности генерации продольных и поперечных волн вблизи критических температур отличаются. Установлено, что пик эффективности генерации продольных волн наблюдается только при той критической температуре, которая теряет свойства фазового перехода и не смещается в магнитном поле (см. рис. 2).

Пик эффективности генерации поперечного ультразвука, наоборот, наблюдается при критической температуре, которая в магнитном поле сохраняет свойства фазового перехода 2-го рода. Этот пик смещается по температуре пропорционально напряженности магнитного поля, отслеживая смещение точки фазового перехода (рис. 3). Подобное же смещение пика эффективности генерации продольного ультразвука, являющегося следствием смещения точки фазового перехода, наблюдали и в изотропных магнетиках вблизи точки Кюри при одноосной нагрузке [8].

Библиографический список

1. Электромагнитное возбуждение звука в металлах / Васильев А.В., Бучельников В.Д., Гуревич С.Ю., Каганов М.И., Гайдуков Ю.П. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. 339 с.
2. А.с. 257118 СССР, МКИ G 01 H 29/04. Способ бесконтактного ввода и приема ультразвуковых колебаний в ферромагнитные металлы / Буденков Г.А. и др. (СССР).
3. Буденков Г.А., Гуревич С.Ю. Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля (обзор) // Дефектоскопия. 1981. № 5. С. 5–33.
4. Комаров В.А., Ильясов Р.С. Экспериментальное изучение электромагнитно-акустического преобразования в различных кристаллографических направлениях монокристаллов кремнистого железа // Дефектоскопия. 1980. № 10. С. 102–106.
5. Ильясов Р.С., Главатских М.Ю., Мерзляков В.В. Электромагнитно-акустическое преобразование в кобальте в районе спиновой переориентации // ФММ. 1997. Т. 84. Вып. 2. С. 73–77.
6. Электромагнитное возбуждение ультразвука в гадолинии / Андрианов А.В., Бучельников В.Д., Васильев А.Н., Гайдуков Ю.П., Ильясов Р.С., Шавров В.Г. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. Вып. 11. С. 277–288.
7. Ильясов Р.С., Мерзляков В.В. Электромагнитно-акустическое преобразование объемных волн в области парапроцесса. 2. Закономерности в окрестности точки Кюри // Дефектоскопия. 1992. № 9. С. 52–60.
8. Влияние упругих напряжений на электромагнитно-акустическое преобразование вблизи точки Кюри / Ильясов Р.С., Главатских М.Ю., Мерзляков В.В., Ахметгалиева Я.Л. // ФММ. 1994. Т. 77. Вып. 1. С. 60–63.
9. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 567 с.
10. Белов К.П. Магнитные превращения. М.: Госиздат, 1959. 259 с.
11. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках / Белов К.П., Звездин А.К., Кадомцева А.М., Левитин Р.З. М.: Наука, 1979. 317 с.
12. Мицек А.И. Фазовые переходы в кристаллах с магнитной структурой. Киев: Наук. думка, 1989. 320 с.
13. Glavatskikh M.Yu., Ilyasov R.S. Electromagnetic Generation in Cobalt // The Physics of Metals and Metallography. 2001. Vol. 92. Suppl. 1. P. S147–S149.

М. А. Боровкова, Р. С. Ильясов, Н. В. Федорова, С. Э. Бабкин, А. В. Загайнов

ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ, МАГНИТОУПРУГИЕ И УПРУГИЕ СВОЙСТВА АМОРФНОГО СПЛАВА Fe–Cu–Nb–Si–В ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Сплавы системы Fe–Cu–Nb–Si–В в нанокристаллическом состоянии, которое достигается в результате отжига при температуре выше точки кристаллизации, имеют исключительные магнитомягкие свойства [1]. При низкотемпературном отжиге многокомпонентных аморфных сплавов происходит структурная релаксация, обусловленная снятием закалочных напряжений, появлением нового типа аморфных структур, образованием кристаллической ОЦК фазы в приповерхностных слоях аморфной ленты. Исследования магнитомягких нанокристаллических сплавов направлены в основном на выяснение связи ультрадисперсной структуры и фазового состава с физическими свойствами материала, получение термически стабильной константы наведенной магнитной анизотропии, изучение доменной структуры сильномагнитной фазы Fe–Si. При этом используются, как правило, методы магнитометрии, электронной микроскопии, мессбауэровской спектроскопии [2]. Однако размерные эффекты могут иметь весьма разнообразные проявления. В частности, для нанокристаллического состояния характерно сочетание повышенных прочностных и демпфирующих свойств материала [1]. В этой связи целесообразно расширить круг исследуемых свойств сплавов с нанокристаллической структурой, привлекая новые экспериментальные методы.

В данной работе представлены результаты исследования динамических свойств (магнитных, магнитоупругих, упругих) аморфного сплава Fe_{73,7}–Cu_{1,0}–Nb_{3,2}–Si_{12,7}–В_{9,4} на разных стадиях процесса термической кристаллизации. Метод, используемый авторами, основан на явлении электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП). В магнитомягких магнитоострикционных материалах взаимная трансформация электромагнитных и акустических волн обусловлена магнитоупругим взаимодействием.

Образцы размерами 4×80 и 4×40 мм были вырезаны из ленты аморфного сплава толщиной d=25 мкм, полученной спланированием по стандартной технологии. Исследования образцов проводили в исходном (аморфном) состоянии и

после изохронных часовых отжигов в вакууме 10⁻⁴ Па в интервале температур 100–560°C. При измерениях использовались резонансная и импульсная методики двойного ЭМАП.

В резонансном режиме измеряли ЭДС двойного ЭМАП E , внутреннее трение Q^{-1} и величину оптимального поля H_{opt} – поля, соответствующего максимуму E . Измерения проводились на частоте собственного резонанса s_0 -моды Лэмба. Зависимости $A=EQ^{-1}$ (эффективность ЭМАП с учетом внутреннего трения) и Q^{-1} от температуры отжига показаны на **рис. 1**. **Рис. 2** демонстрирует зависимость H_{opt} в виде зависимости постоянного тока I_{opt} , протекающего через соленоид ($H_{opt}=kI$, где k – постоянная соленоида). Вследствие большого разброса параметров E , Q^{-1} и соответственно EQ^{-1} по длине ленты в исходном состоянии зависимости этих параметров от температуры отжига анализировались по значениям, приведенным к исходному (аморфному) состоянию.

По характеру зависимости измеряемых параметров от $T_{отж}$ можно выделить три области [3]. В низкотемпературной области, где происходит, главным образом, снятие закалочных напряжений, эффективность преобразования в пределах ошибки измерения монотонно увеличивается. В то же время внутреннее трение практически не меняется (**см. рис. 1**). Приведенные значения этих параметров слабо зависят от $T_{отж}$. Напротив, величина H_{opt} в данном интервале температур отжига быстро растет, достигая максимума при 200°C, причем в этой точке сигнал ЭМАП достигает максимума даже в более сильных полях, чем в аморфном состоянии (**см. рис. 2**). Таким образом, в области температур отжига ниже 300°C наблюдается ухудшение динамических магнитных и магнитоупругих свойств аморфных сплавов.

При дальнейшем увеличении $T_{отж}$ происходит структурная релаксация, которая сопровождается уменьшением микронапряжений, следовательно, снижением магнитоупругой анизотропии и улучшением динамических магнитоупругих свойств. Этот процесс прослеживается по росту эффективности ЭМАП и магнитоупругих потерь

(см. рис. 1) и быстрому снижению H_{opt} , минимум которого приходится на 475°C (см. рис. 2). Одновременно при данной температуре наблюдается замедление роста эффективности ЭМАП и внутреннего трения (см. рис. 1).

И наконец, наиболее интересная и практически важная область – температуры выше точки кристаллизации ($T_{кр}=510^\circ\text{C}$). При 520°C эффективности ЭМАП достигает максимума. Одновременно наблюдается локальный максимум H_{opt} и снижение магнитоупругой компоненты Q^{-1} , что формально можно рассматривать как увеличение эффективной константы магнитной анизотропии K_{eff} .

Для объяснения зависимости параметров двойного ЭМАП от температуры отжига были проведены дополнительные исследования с привлечением мессбауэровской спектроскопии и измерениями динамической магнитной восприимчивости.

По данным мессбауэровской спектроскопии фазовый распад аморфного сплава начинается после отжига при 470°C . Кристаллизация идет с приповерхностного слоя и сопровождается отрывом магнитного момента от плоскости ленты. Поскольку при этом уменьшается проекция намагниченности на направление постоянного магнитного поля, то происходит замедление роста эффективности преобразования E и внутреннего трения Q^{-1} по аналогии с процессом приближения к насыщению, когда генерация ультразвука осуществляется за счет анизотропной магнитострикции процессов вращения. Одновременно начинается рост величины оптимального поля H_{opt} .

По измерениям температурной зависимости динамической магнитной восприимчивости образование фазы Fe–Si отчетливо прослеживается, начиная с 500°C . При повышении температуры отжига растет ее объем и изменяется содержание компонентов. Другой фазой, образующейся в результате нанокристаллизирующего отжига, как следует из мессбауэровских спектров и функции распределения сверхтонких полей, является $\text{Fe}_2(\text{Nb}, \text{V})$. Образование ультрадисперсной кристаллической структуры приводит к резкому росту эффективности ЭМАП с максимумом в точке 520°C . Аномальное увеличение EQ^{-1} объясняется уменьшением K_{eff} как за счет ее магнитоупругой составляющей (релаксации закалочных напряжений в процессе отжига), так и за счет подавления магнитокристаллографической анизотропии вследствие малости зерна. Этот факт находится в кажущемся противоречии с поведением Q^{-1} и H_{opt} .

Разрешить его можно, если предположить, что в нанокристаллических сплавах Fe–Cu–Nb–Si–V генерация звука происходит за счет вращения однодоменных частиц. Таким образом, совокупность характеристик резонансного ЭМАП (EQ^{-1} , Q^{-1} , H_{opt}) указывает на однодоменную структуру нанокристаллических зерен. Этот результат согласуется с данными других авторов. Например, в работе [2] методами мессбауэровской спектроскопии, электронной микроскопии и магнитометрии установлено, что оптимальные физические свойства соответствуют размерам кристаллитов 10–20 нм, находящихся,

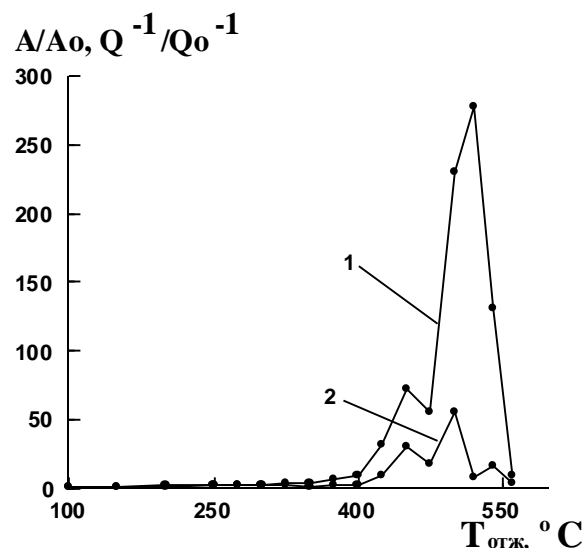


Рис. 1. Зависимость ЭДС двойного ЭМАП с учетом внутреннего трения (1) и внутреннего трения (2) от температуры отжига (резонансный метод, S_0 мода)

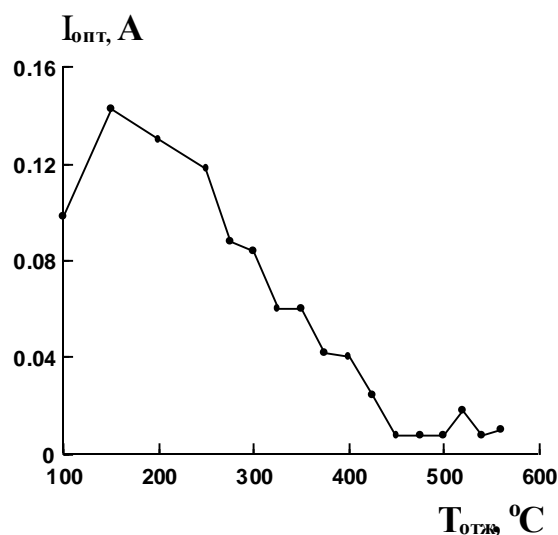


Рис. 2. Зависимость оптимального поля от температуры отжига (резонансный метод, S_0 мода)

по-видимому, в однодоменном состоянии.

Теперь рассмотрим информативные возможности импульсного ЭМАП при исследовании магнитомягких нанокристаллических сплавов. Применение импульсной методики вызвано несколькими причинами. Во-первых, это возможность генерации и приема более широкого спек-

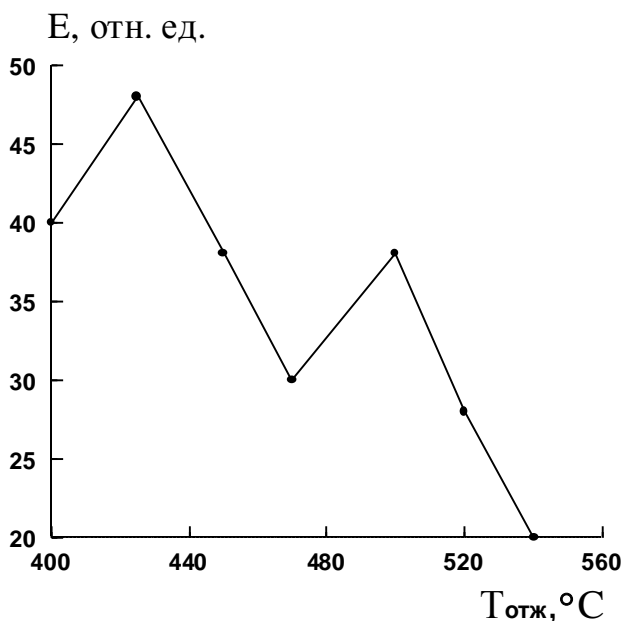


Рис. 3. Зависимость ЭДС двойного ЭМАП SH волн от температуры отжига (импульсный метод)

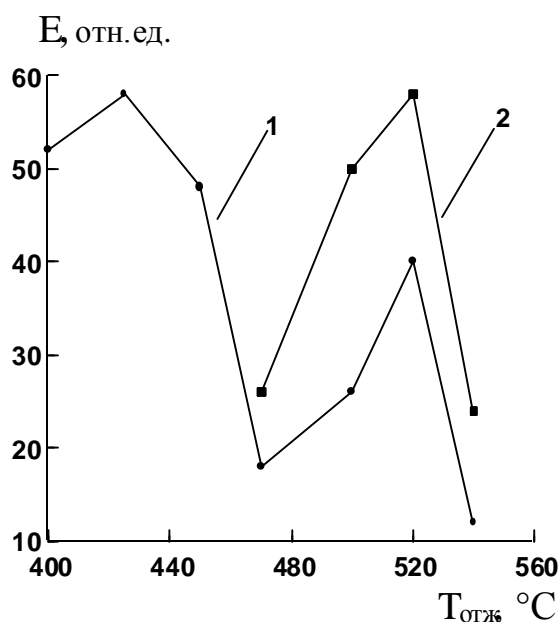


Рис. 4. Зависимость ЭДС двойного ЭМАП волн Лэмба от температуры отжига (импульсный метод):
1 – S_0 мода; 2 – a_0 мода

тра ультразвуковых мод за счет различной ориентации постоянного (\mathbf{H}), переменного (\mathbf{h}) магнитных полей и нормали (\mathbf{n}) к поверхности аморфной ленты. Кроме того, при генерации и приеме ультразвука в импульсном режиме ЭДС двойного преобразования в меньшей степени зависит от неконтролируемых потерь на излучение (демпфирование образца в результате контакта с измерительными катушками и подложкой), что особенно важно для уточнения характера обнаруженных аномалий.

Измерения проводились с использованием системы датчиков, разработанной для электромагнитного возбуждения и регистрации поверхностных типов волн ($\mathbf{k}_j \parallel \mathbf{n}$, где \mathbf{k}_j – волновой вектор). Система состоит из двух одинаковых датчиков, изготовленных в виде меандра и жестко связанных между собой [4]. Расстояние между датчиками 30 мм. Период решетки равен 1 мм. Соответственно пространственный период электромагнитной и акустической волн также равен 1 мм. В геометрии $\mathbf{H} \parallel \mathbf{h} \parallel \mathbf{k}_j$ возбуждается волна Рэлея, а в геометрии $\mathbf{H} \perp \mathbf{h} \parallel \mathbf{k}_j$ – волны горизонтальной поляризации (SH волн). Очевидно, что в аморфной ленте толщиной 25 мкм в геометрии $\mathbf{H} \parallel \mathbf{h} \parallel \mathbf{k}_j$ генерируются и распространяются не волны Рэлея, а волны Лэмба – нормальные волны в пластине со свободными границами.

Для возбуждения и приема сигнала ЭМАП использовался стандартный ультразвуковой дефектоскоп ДУК-66. Постоянное магнитное поле создавалось электромагнитом с регулируемым источником тока I . Частота заполнения зондирующего импульса составляла 2,5 МГц. Подстройка частоты осуществлялась блоком подстройки с переменной емкостью и индуктивностью. Амплитуда зондирующего импульса во всех экспериментах поддерживалась постоянной.

Максимум полевой зависимости ЭДС двойного ЭМАП для SH волн достаточно широко размыт и лежит в сильных полях ($I \approx 4,5$ А), поэтому подстройка по полю не дает существенного прироста сигнала. Для этого типа волн зависимости эффективности преобразования E от температуры отжига показаны на рис. 3. Напротив, в геометрии $\mathbf{H} \parallel \mathbf{h} \parallel \mathbf{k}_j$ максимум эффективности ЭМАП наблюдается в слабых полях ($I \approx 100$ мА), поэтому в данном случае ЭДС измеряли в точке полевого максимума. Для волн Лэмба зависимости $E(T_{отж})$ представлены на рис. 4.

Проанализируем полученные результаты. Характер зависимостей $E(T_{отж})$ для рассматриваемых мод обусловлен несколькими фактора-

ми – структурой возбуждаемой упругой волны, особенностями магнитоупругого механизма генерации и, наконец, особенностями упругих и магнитных свойств аморфных ферромагнетиков.

Обращает на себя внимание отсутствие максимума ЭДС двойного ЭМАП на SH волнах в области термической кристаллизации, что, на первый взгляд, противоречит данным для волн Лэмба, полученным как по резонансной (см. рис. 1), так и по импульсной методике (см. рис. 4). Различия между двумя типами волн можно объяснить, используя феноменологическую модель ЭМАП [5], согласно которой при генерации ультразвука за счет анизотропной магнитоупругости упругие смещения в волнах Рэлея и Лэмба пропорциональны производной магнитоупругости по полю $E \sim (\partial\lambda/\partial H)^2$, а в случае SH волн – отношению магнитоупругости к полю $E \sim (\lambda/H)^2$. Поскольку в нанокристаллическом состоянии магнитоупругостная анизотропия и связанная с ней линейная магнитоупругость подавлены ($\lambda \rightarrow 0$), то амплитуда SH волн, начиная с $T_{отж} = 500^\circ\text{C}$, монотонно снижается до уровня исходного, аморфного состояния. Таким образом, нанокристаллизующий отжиг снижает эффективность генерации SH волн. В то же время очень малая, но ненулевая величина магнитоупругости является достаточной, чтобы обеспечить высокий уровень сигнала ЭМАП за счет магнитоупругой постоянной $\partial\lambda/\partial H$.

В области $T_{отж} \leq 500^\circ\text{C}$ характер зависимости $E(T_{отж})$ для волн горизонтальной поляризации вполне согласуется с данными, полученными и резонансным методом для s_0 -моды Лэмба (см. рис. 1). Улучшение динамических магнитоупругих свойств на начальном участке обусловлено структурной релаксацией и снятием микронапряжений. Кристаллизация приповерхностного слоя ($450\text{--}470^\circ\text{C}$), сопровождающаяся отрывом магнитного момента от плоскости ленты, вызывает ослабление сигнала ЭМАП.

Более сложные зависимости получены для волн Лэмба (см. рис. 4). Во всем исследуемом интервале температур отжига генерируется симметричная нулевая мода. Данная мода идентифицируется по скорости (4000 м/с, что превышает C_t – скорость поперечного ультразвука) и приближенной оценке параметра $k_1 d \approx 0,13$ ($k_1 = \omega/C_t$, ω – циклическая частота) в сопоставлении с дисперсионными кривыми [6]. Очевидно, что в мегагерцовом диапазоне частот нельзя пренебрегать дисперсией скорости ультразвуковой волны. Существенным отличии-

ем от килогерцового диапазона частот (резонансный метод) являются два результата. Во-первых, начиная с $T_{отж} = 470^\circ\text{C}$ и выше, одновременно с s_0 модой наблюдается генерация более медленной антисимметричной нулевой моды, причем ее амплитуда превосходит амплитуду симметричной моды. В точке $T_{отж} = 520^\circ\text{C}$ эффективность генерации и s_0 , и a_0 моды достигает максимума. Второе отличие состоит в том, что усиление ЭМА сигнала после нанокристаллизующего отжига при измерении по импульсной методике примерно на порядок меньше, чем при измерении по резонансной методике (см. рис. 1). Такое соотношение частично можно объяснить тем, что в первом случае упругая энергия распределяется между двумя типами волн, а во втором – сосредоточена в одной моде.

На данном этапе исследований трудно дать исчерпывающее объяснение всем полученным зависимостям. Однако есть достаточно весомые основания предполагать, что эффективная генерация a_0 моды вызвана технологией получения аморфной ленты: при спиннинговании контактная и свободная поверхности отличаются как по структуре, так и по физическим свойствам. При измерении по резонансной методике на различие свойств указывает своеобразная форма резонансной кривой. Остается открытым вопрос, почему эти отличия проявляются после нанокристаллизующего отжига.

В заключение кратко сформулируем основные результаты работы.

Исследование динамических магнитных и магнитоупругих свойств и эффективной константы магнитной анизотропии сплава Fe–Cu–Nb–Si–B показало, что характер изменения этих параметров можно объяснить при условии однодоменного строения нанокристаллических зерен.

Эффективности генерации волн, возбуждаемых за счет магнитоупругой постоянной $\partial\lambda/\partial H$, после нанокристаллизующего отжига резко возрастает, в то время как генерация волн за счет магнитоупругой постоянной λ/H снижается вследствие подавления магнитной анизотропии.

Различие свойств на контактной и свободной поверхности аморфной ленты стимулирует генерацию антисимметричной лэмбовской моды в сплаве с нанокристаллической структурой.

Начало кристаллизации сопровождается снижением динамических магнитоупругих свойств в узком температурном интервале ниже точки кристаллизации сплава.

Библиографический список

1. Гусев А.И. Эффекты нанокристаллического состояния в компактных металлах и соединениях // Успехи физических наук. 1998. Т. 168. № 1. С. 55–83.
2. Структура, фазовый состав и свойства нанокристаллических магнитных сплавов. Мессбауэровское, электронно-микроскопическое и магнитное исследования / Макаров В.А., Арцишевский М.А. и др. // Физика металлов и металлургия. 1991. № 9. С. 139–149.
3. Ильясов Р.С., Боровкова М.А., Федорова Н.Ф. Электромагнитное возбуждение ультразвука в аморфном сплаве Fe–Si–V–Cu–Nb // Сб. трудов XV сессии РАО. Нижний Новгород: ГЕОС, 2004. С. 93–97.
4. Устройство для бесконтактного возбуждения и приема волн Рэлея в ферромагнетиках / Бабкин С.Э., Ильясов Р.С., Комаров В.А., Рубцов В.И. // Дефектоскопия. 1989. № 6. С. 93–94.
5. Комаров В.А., Бабкин С.Э., Ильясов Р.С. Эмма преобразование волн горизонтальной поляризации // Дефектоскопия. 1993. № 2. С. 11–17.
6. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.

УДК 620.179.16

С. Э. Бабкин, В. В. Величко, М. А. Боровкова, Р. С. Ильясов, О. Н. Вострокнутова

УЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПРИЛОЖЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ МЕТОДОМ ЭМАП ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

При неразрушающем контроле методом электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП) поверхностных акустических волн (ПАВ) в ферромагнитных изделиях часто используют в качестве информативного параметра, как в дефектоскопии, так и в структуроскопии, амплитуду принятого сигнала при двойном ЭМАП [1, 2]. В производственных условиях на амплитуду могут влиять такие внешние факторы, как температура и внешние приложенные к изделию напряжения. Влияние температуры изучено достаточно хорошо как в теоретических, так и в экспериментальных работах. Имеются работы по влиянию напряжений на эффективность ЭМАП [3, 4].

В данной работе на примере модельного материала (никеля) предпринята попытка изучения действия температуры и приложенных напряжений на амплитуду сигнала при импульсном ЭМАП ПАВ. Это нужно, с одной стороны, для правильной коррекции и интерпретации результатов контроля (например, коррекции браковочного уровня), с другой стороны, для поиска возможности контроля самих приложенных напряжений при оценке ресурса изделий.

На установке ИМАШ 24–78 осуществлялись нагрев и одновременное растяжение в упругой области прутков никеля ($d=5$ мм). Приложенные напряжения измерялись стандартным датчиком (на 500 кг), температура – термопарой “платина – родий (10%) – платина”. Подмагничивающая

система в виде П-образного приставного электромагнита обеспечивала подмагничивающее поле до 200 А/см при токе в электромагните 5 А. В сравнении изучалось ЭМАП двух типов поверхностных волн: волн Рэлея и SH-волн. Волны Рэлея возбуждались и принимались разными датчиками вдоль оси образца.

Поверхностные SH-волны образовывались с помощью одного датчика по образующей поверхности цилиндра перпендикулярно оси.

В ходе эксперимента при разных значениях температуры и приложенных напряжений по импульсной методике снимались зависимости эффективности ЭМАП (амплитуда принятого сигнала после двойного ЭМАП) от величины подмагничивающего поля (на графиках приведен ток I в электромагните) – так называемая полевая кривая ЭМАП [5].

Сначала снимались полевые кривые ЭМАП в никеле по отдельности для температуры и упругих напряжений (на графиках представлена нагрузка P в килограммах). Полученные зависимости согласуются с ранее полученными данными и теоретическими представлениями. Так, нагревание образца до 200°C без приложенных нагрузок для обоих типов волн приводит к однозначному падению принятого сигнала. При этом смещение пика эффективности по полю практически не наблюдается. Указанные закономерности объясняются уменьшением намагниченности при увеличении температуры, что в данном тем-

пературном диапазоне характерно для большинства металлов. Намагниченность является одним из основных факторов, влияющих на эффективность ЭМАП. На рис. 1 подобные зависимости представлены для волн Рэлея.

Нагружение образца до напряжений $G=10 \text{ кг/мм}^2$ (упругая область, 100 кг нагрузки P соответствует $G=5 \text{ кг/мм}^2$) при комнатной температуре по-разному влияет на ЭМАП в зависимости от взаимной ориентации приложенных напряжений и направления распространения волны.

Так, для волн Рэлея (распространение волны параллельно нагрузке) наблюдается однозначное увеличение максимума принятого сигнала (рис. 2) при увеличении нагрузки. Для SH-волн (распространение волны поперек нагрузки) наблюдается однозначное падение максимума сигнала при увеличении нагрузки (рис. 3). При этом у обоих типов волн наблюдается смещение пика эффективности преобразования по полевой кривой в область больших подмагничивающих полей.

Смещение пиков эффективности преобразования под действием нагрузки в область больших подмагничивающих полей объясняется чисто магнитными причинами. Образец, находящийся под нагрузкой, труднее намагнитить до необходимых величин, чем в исходном ненагруженном состоянии. Уменьшение и увеличение пиков эффективности волн Рэлея и SH-волн, очевидно, связано с взаимной ориентацией вектора распространения волны и направлением приложения нагрузки. Для волн Рэлея эти направления параллельны, а для SH-волн перпендикулярны. Вдоль натянутой струны звук идет лучше, чем в ненатянутой. Этот же эффект наблюдался при растяжении стальных пластин чисто на волнах Рэлея: при генерации волн параллельно нагрузке эффективность растет, а при перпендикулярном направлении – падает [6].

При совместном действии температуры и приложенных напряжений наблюдается суммирование влияния обоих эффектов на амплитуду принятого сигнала.

Для ЭМАП волн Рэлея в нашем случае температура и приложенная нагрузка действуют в разные стороны. В результате их противоборства на рис. 4 мы видим небольшое уменьшение эффективности преобразования (преобладающей оказалась тенденция к уменьшению, определяемая температурой) при сохранившейся тенденции к сдвигу кривой вправо. Простое арифметическое сложение графиков рис. 1 и 2 не дает точную картину рис. 4, но в целом пра-

вильно отражают общие тенденции. В принципе в данном случае внутри указанных диапазонов изменений температуры и напряжения можно подобрать соотношение с постоянной суммарной эффективностью максимума преобразования (отстройка от двух факторов).

Рис. 5 демонстрирует совместное действие температуры и приложенных напряжений на ЭМАП SH-волн. Как было показано, ранее обе причины действовали в одну сторону. Таким образом, результат их совместного действия – усиление тенденции к уменьшению эффективности преобразования и сохранение тенденции к сдвигу максимума преобразования в область больших полей.

Как видно из рисунков для обоих типов волн сохраняется тенденция смещения пика эффективности преобразования по полевой кривой в область больших подмагничивающих

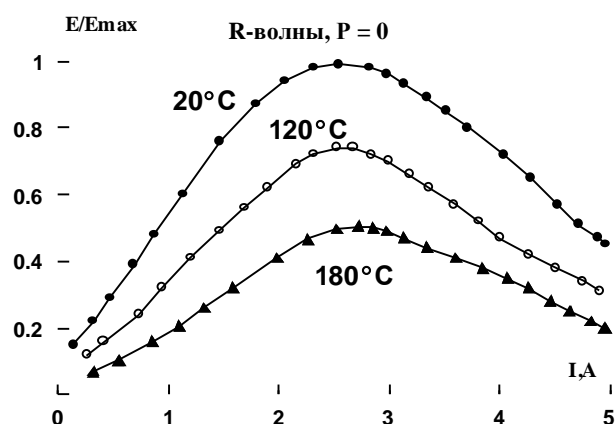


Рис. 1. Зависимость эффективности ЭМАП волн Рэлея от подмагничивающего тока при разных температурах, без нагрузки

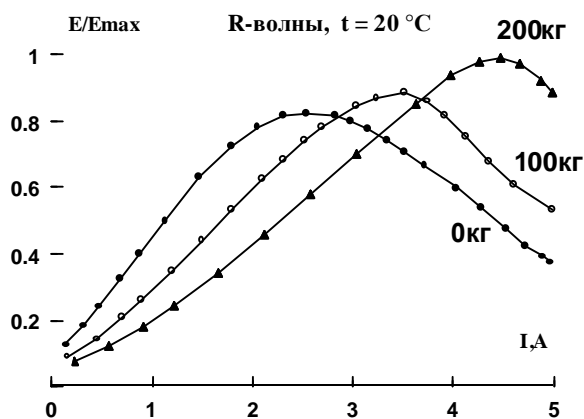


Рис. 2. Зависимость эффективности ЭМАП волн Рэлея от подмагничивающего тока при разных нагрузках

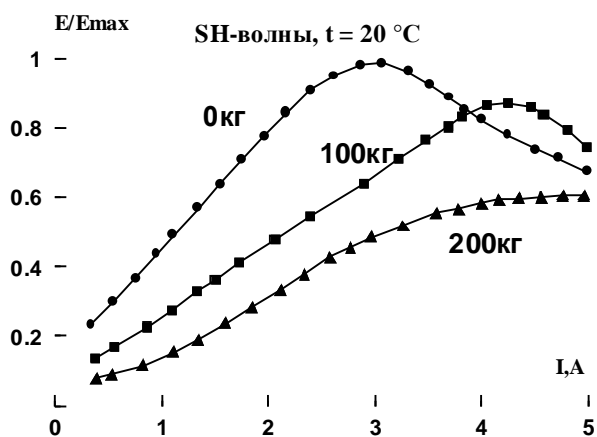


Рис. 3. Зависимость эффективности ЭМАП SH-волн от подмагничивающего тока при разных нагрузках

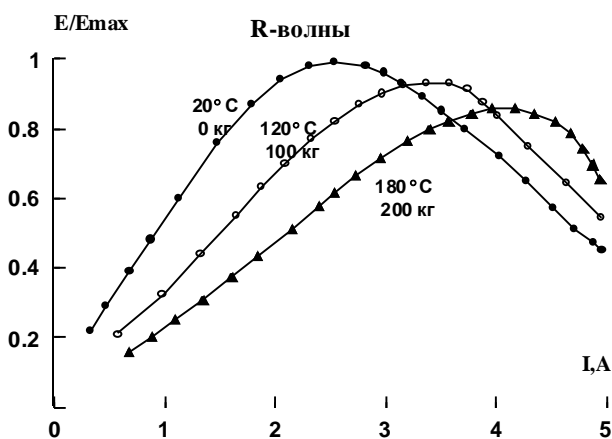


Рис. 4. Зависимость эффективности ЭМАП волн Рэлея от подмагничивающего тока при разных нагрузках и температурах

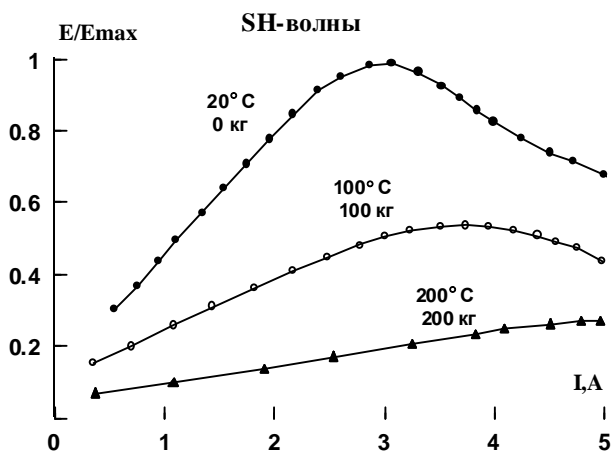


Рис. 5. Зависимость эффективности ЭМАП SH-волн от подмагничивающего тока при разных нагрузках и температурах

полей. По этому параметру можно характеризовать уровень напряженного состояния в материале без учета температурного фактора. На рис. 6 представлена указанная зависимость. Как видно, она однозначна. В принципе, величину приложенных напряжений можно определять по амплитуде принятого сигнала.

Однако как показано на рис. 7, в области малых полей она имеет одну тенденцию, в области больших полей – другую. А в средней области существует зона неоднозначности, которая к тому же расширяется при нестабильности температур. Но даже при однозначной зависимости, например в средних полях, фактор температуры (кривые 1, 3, 4) играет очень существенную роль, для его учета необходимы градуировочные кривые.

Полное объяснение полученных закономерностей требует привлечение теоретических моделей с рассмотрением влияния указанных внешних факторов на ключевые параметры ЭМАП,

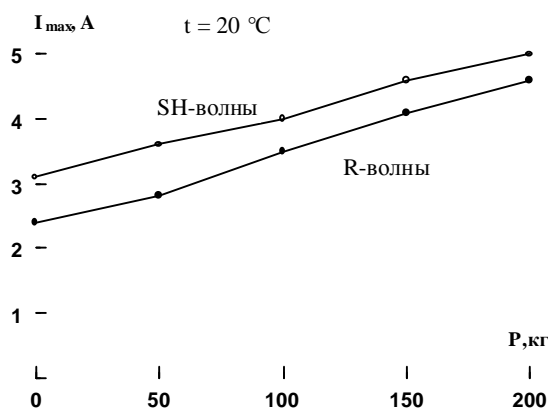


Рис. 6. Зависимость оптимального тока подмагничивания от нагрузки для ЭМАП разных типов волн

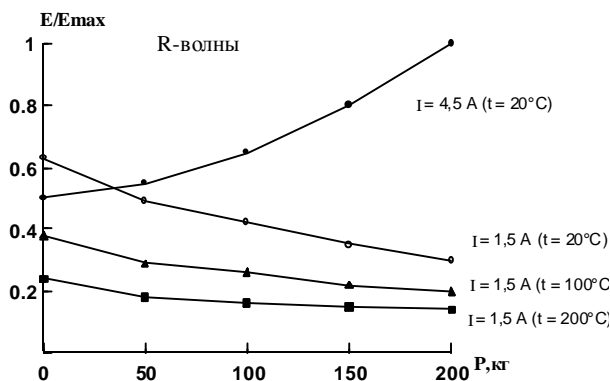


Рис. 7. Зависимость эффективности ЭМАП волн Рэлея от нагрузки при разном токе подмагничивания и температуре

однако полученные экспериментальные данные уже позволяют сделать ряд важных практических выводов:

1. Совместное действие температуры и приложенных напряжений на эффективность ЭМАП в никеле в исследованном интервале величин ($T=20-200^{\circ}\text{C}$, G – до 10 кг/мм^2) приводит к алгебраическому (с учетом знака) сложению изменений эффективности ЭМАП от каждой причины отдельно.

2. Для поверхностных волн повышение температуры приводит к однозначному уменьшению ЭМА сигнала, в то время как знак изменений, вызванных внешней нагрузкой, зависит от вза-

имной ориентации направления распространения волны и нагрузки.

3. При ЭМА контроле по амплитуде принятого сигнала указанные факторы необходимо учитывать для правильной интерпретации результатов.

4. Возможно контролировать приложенные напряжения методом ЭМАП ПАВ по амплитуде принятого сигнала в малых или больших подмагничивающих полях с обязательным учетом температурного фактора, а также по величине оптимального поля (тока) подмагничивания без учета температуры в интервале температур до 200°C .

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В.Клюева. М.: Машиностроение, 1995.
2. УЗК трубопроводов с изоляционными покрытиями с применением ЭМА преобразователей / Никифорова Ж., Булавин А., Ягер В. и др. // В мире неразрушающего контроля. 2004. № 2. С. 42–45.
3. Гитис М.Б. Электромагнитное возбуждение звука в никеле // ФТТ. 1972. Т. 14. Вып. 12. С. 3563.
4. Комаров В.А. Квазистационарное электромагнитно-акустическое преобразование в металлах. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. 235 с.
5. Ильясов Р.С., Бабкин С.Э., Комаров В.А. О механизмах ЭМА преобразования волн Рэлея в ферромагнетиках при разных частотах // Дефектоскопия. 1988. № 10. С. 77–82.
6. Бабкин С.Э. Электромагнитно-акустическое преобразование поверхностных акустических волн в ферромагнетиках: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ижевск, 1993.

УДК 621.7:539.374:621.78

Ю. П. Кочкин, А. Х. Чернега., С. Г. Шевченко

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

ТермоЭДС реального металла определяется механизмом или несколькими механизмами рассеяния носителей тока на фонах, дефектах решетки, примесных атомах, магнонах (в магнитоупорядоченных металлах), границах зерен (в чистых металлах при низких температурах) и т.д., а также электронным спектром, в частности геометрией Ферми и температурой [1].

В процессе деформации металлов происходит изменение их свойств. Деформированный металл отличается от исходного и в паре с ним при наличии температурного градиента дает наведенную термоэлектрическую силу. При пластической деформации наведенная термосила, как и сама деформация, оказывается остаточной, термоЭДС, наведенная упругой деформацией, исчезает после снятия нагрузки.

При упругой деформации решетка образца не нарушается, и наведенная термоЭДС может быть объяснена изменением концентрации свободных

электронов при изменении объема за счет деформации [2].

Исследования зависимости изменений термоЭДС от упругой деформации растяжением арматурной не профилированной проволоки диаметром 4,97 мм проводились на специально сконструированной и изготовленной установке (рис. 1).

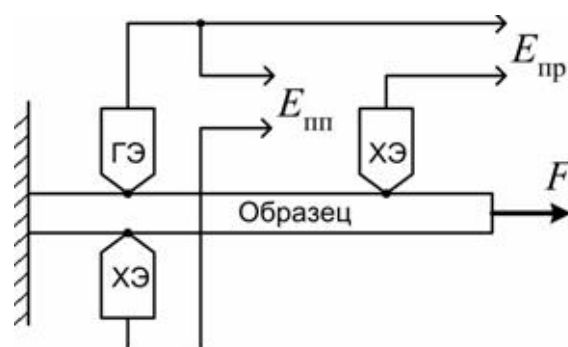


Рис. 1. Схема лабораторной установки

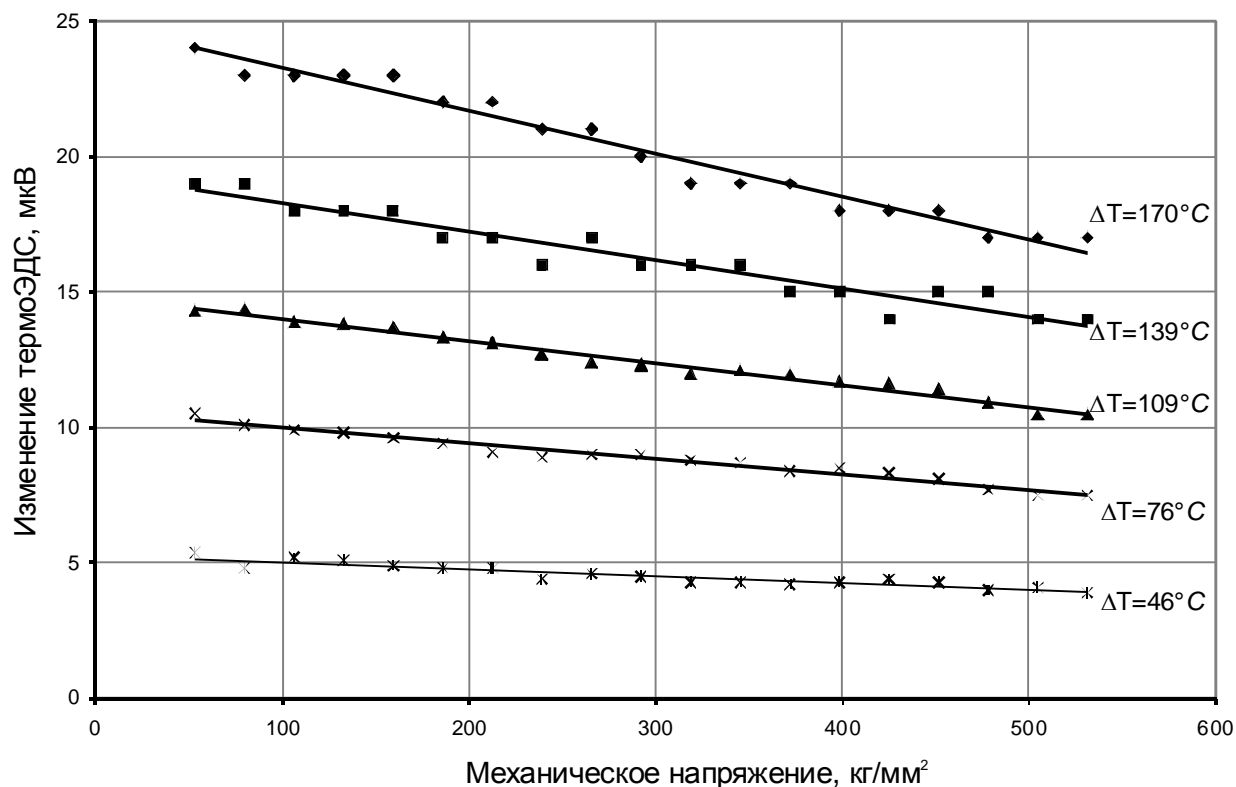


Рис. 2. Зависимости изменения упругой термоЭДС при различных температурах электродов

Экспериментальный образец устанавливается на горизонтальной несущей станине, к которому подведены латунный горячий (ГЭ) и два холодных, выполненных из материала образца, электрода (ХЭ). С помощью силового винта образец растягивается переменной силой (F) с максимальным усилием до 10^4 Н. Механическое напряжение при этом достигает $5 \cdot 10^6$ Н/м².

В процессе растяжения при наличии температурного градиента снимаются термоэлектрические сигналы в продольном ($E_{пр.}$) и поперечном ($E_{пн.}$) направлениях исследуемого образца. Температурный градиент, предназначенный для образования термоЭДС, устанавливается с помощью горячего электрода (ГЭ) с температурой 200°C на поверхности образца и двух электродов при комнатной температуре, один из которых располагается относительно горячего вдоль образца на расстоянии 20 см, где проволока уже не прогревалась. Другой электрод относительно горячего располагается в попереч-

ном направлении образца. ТермоЭДС измеряется потенциометром Р363 с точностью до одного микровольт.

Результаты измерений показали случайный характер изменения термоЭДС в продольном и поперечном направлениях, что, по-видимому, объясняется непредсказуемым изменением температур в точках контакта электродов с образцом. Однако разница этих термоЭДС ($E_{пп}$ - $E_{пр}$) имеет вполне конкретный устойчиво линейный характер (рис. 2) с достоверностью аппроксимации $R=0,98...0,99$ для данного образца. Причем угол наклона прямых увеличивается с ростом разницы температур между горячим и холодным электродами.

Полученные данные измерения продольной и поперечной термоЭДС с последующим нахождением зависимости изменения термоЭДС от упругих деформаций позволяет создать прибор, измеряющий упругие напряжения в реальных конструкциях.

Библиографический список

1. Рогельберг И.Л., Бейлин В.Н. Механизм т.э.д.с. в металлах и сплавах. Термоэлектродвижущая сила металлов и сплавов. Сплавы для термометров. М.: Металлургия, 1983.
2. Пономарев Е.Г., Нилов А.С. Зависимость упругой наведенной термоЭДС металлов от напряжения // Сб. науч. трудов. Вып. 112. Магнитогорск, 1973.

УДК 681.142.2+621.746

О. С. Логунова, Х. Х. Нуров, В. В. Павлов, В. Г. Суспицын

ОРГАНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МАКРОСТРУКТУРЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК

В июне и октябре 2004 года был произведен запуск двух машин непрерывного литья сортовых заготовок в электросталеплавильном цехе ОАО «ММК». Для осуществления контроля за техническим состоянием оборудования и получения требуемого качества выпускаемой продукции была организована система отбора темплетов от непрерывнолитых заготовок и непрерывной оценки их качества.

Отбор темплетов осуществляется по следующим схемам:

1) серийная – отбор темплета для 2-й, 10-й, 20-й и т.д. плавки в серии с каждого ручья;

2) контрольная – отбор темплета на контроль качества макроструктуры с плавки, выплавленной или разлитой по технологии с отклонениями от технологических инструкций;

3) опытная – отбор темплета на контроль качества макроструктуры с плавки, полученной по новой усовершенствованной технологии;

4) закрытая – отбор темплета на контроль качества макроструктуры с плавки, разлитой закрытым способом;

5) новая – отбор темплета на контроль качества макроструктуры с плавки по новому сортаменту электросталеплавильного цеха;

6) аварийная – на контроль качества макроструктуры с плавки при наличии аварийных ситуаций.

Все используемые схемы позволяют сформировать массив достоверных и состоятельных статистических данных по качеству макроструктуры выпускаемой продукции. Перед оценкой макроструктуры все темпле-

ты подвергаются предварительной обработке согласно ОСТ 14-1-235-91.

В лаборатории физико-механических и металлографических испытаний толстолистового и сортового проката Центральной лаборатории контроля ОАО «ММК» с указанного периода функционирует автоматизированное рабочее место технолога по регистрации результатов контроля макроструктуры непрерывнолитой заготовки. Техническим организатором рабочего места по сбору информации о качестве непрерывнолитой сортовой заготовки являются сотрудники ЦЛК и Исследовательско-технологический центр «Аусферр». Вид рабочего места приведен на **рис. 1**.

В состав технического обеспечения автоматизированного рабочего места входит:

– цифровой фотоаппарат Olympus C5060 с разрешающей способностью в 5 мегапикселей и дистанционным управлением через USB порт. Способ установки фотокамеры приведен на **рис. 2**;



Рис. 1. Вид рабочего места для автоматизированной оценки качества заготовки

– персональный компьютер, конфигурации которого должна обеспечивать успешную работу Internet Explorer версии 4.0 и выше.

Программное обеспечение, разработанное Исследовательско-технологическим центром «Аусферр», позволяет выполнить:

- ввод информации о качестве непрерывно-литой сортовой заготовки, полученной по традиционной технологии оценивания;
- получение электронной цифровой фотографии темплета;
- размещение этой информации в Хранилище;
- формирование заявок на анализ макро-структуры.

Авторами работы предлагается оригинальное программное обеспечение “Q&SSq” для автоматизированной технологии оценки внутреннего качества заготовок, использующее возможности теории распознавания образов на изображении [1–4] и действующей в рамках разработанного автоматизированного рабочего места. Общая схема методологии приведена на рис. 3. MES – система управления производствами и качеством продукции. Основными задачами MES является сбор, агрегирование и паспортизация данных по металлургической продукции, полученной на различных этапах передела [5].

Согласно схеме, приведенной на рис. 3, остается традиционной технология разрушающе-

го контроля для подготовки поперечного темплета заготовки и серного отпечатка. Эта технология является неизменной как для заготовки квадратного, так и прямоугольного сечения. Травленный темплет от заготовки квадратного сечения фотографируется и электронное исполнение фотографии формата *.png помещается в Хранилище корпоративной системы. Для заготовки прямоугольного сечения изображение серного отпечатка сканируется на основе Twain технологии и электронное изображение формата *.bmp помещается в заданную локальную папку на магнитном носителе.

Блок получения и преобразования данных предназначен для выбора изображения из хранилища или локальной папки, определения размеров изображения и сопоставления этого изображения с шаблоном его разбиения на зоны, характерные для каждого вида дефектов.

Для распознавания дефекта на электронном изображении используется оцифровка цвета каждой точки и сопоставление полученного значения относительного цвета со средним уровнем яркости по рекурсивному алгоритму. В результате распознавания формируется массив программных объектов, которые определены как класс. На рис. 4 приведен вид рабочих окон программного продукта “Q&SSq”.

На первом этапе автоматизированной обработки изображения должен произойти выбор фотографии из существующей базы данных и выделение области распознавания. Область распознавания охватывает только изображение темплета и имеет форму параллелограмма. Выделенная область изображения разбивается на части, характерные для каждого вида дефекта: краевой точечной загрязненности, осевой пористости, осевой химической неоднородности и трещин, перпендикулярных граням заготовки (рис. 4, а).

Наибольшую сложность в разработке программного обеспечения имеет задача определе-



Рис. 2. Установка цифрового фотоаппарата на рабочем месте технолога

ния чувствительности изображения к черному цвету в каждой распознаваемой зоне. В отличие от серного отпечатка на фотографии темплета довольно ярко проявляется кристаллическая структура, особенно стали марки СтЗсп, изображения которой создают шумы при выделении связанных областей дефектов. В связи с этим был разработан алгоритм определения значений чувствительности, при которых границы кристаллической структуры не определяются как дефекты. Результаты работы этого алгоритма представлены на рис. 4, б.

Сформированный массив дефектов и их геометрические характеристики (рис. 4, в) сопоставляются с требованиями ОСТ 14-4-73 «Сталь. Метод контроля макроструктуры литой заготовки (слитка), полученной методом непрерывной разливки» и ОСТ 14-1-235-91 «Сталь. Метод контроля макроструктуры непрерывнолитых заготовок для производства сортового проката и трубных заготовок». Массив полученных оценок может передаваться в хранилище корпоративной информационной системы ОАО «ММК».

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Внедрение информационных технологий в металлургической промышленности является одним из перспективных научных направлений, которое должно сопровождать разработку новых технологий и металлургических агрегатов на всех переделах.

2. Разработанная математическая теория по распознаванию изображений является достаточно развитой для ее применения к задачам металлургической отрасли и позволяет выполнить переход от прямой визуальной оценки внутренних дефектов заготовки к автоматизированному режиму. Новый вид оценки не противоречит известным отраслевым стандартам, а является их логическим продолжением и совершенствованием технологии оценки и формирования объективной информационной базы, которая является частью корпоративной информационной системы.

3. Непрерывный контроль качества макроструктуры непрерывнолитой заготовки с использованием информационных технологий позволяет оценивать состояние машин непрерывного литья заготовок и ее отдельных узлов (кристаллизаторов, зон вторичного охлаждения, роликов

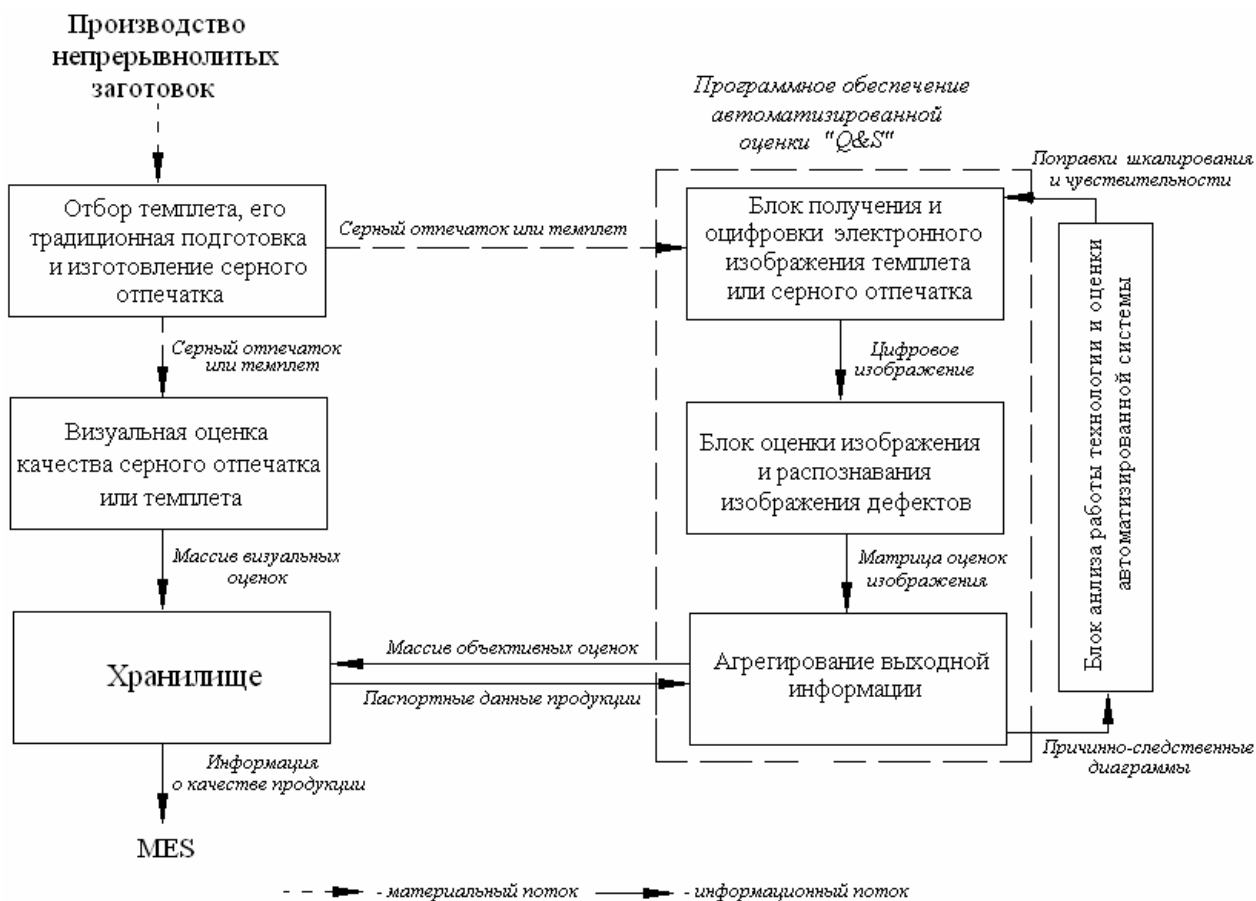
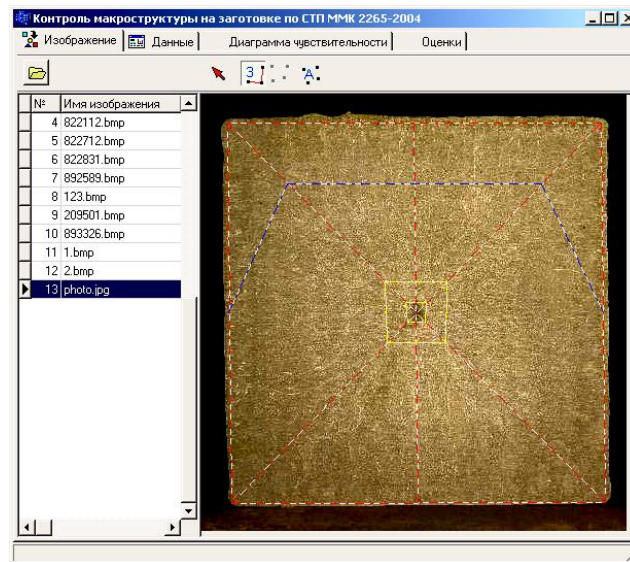
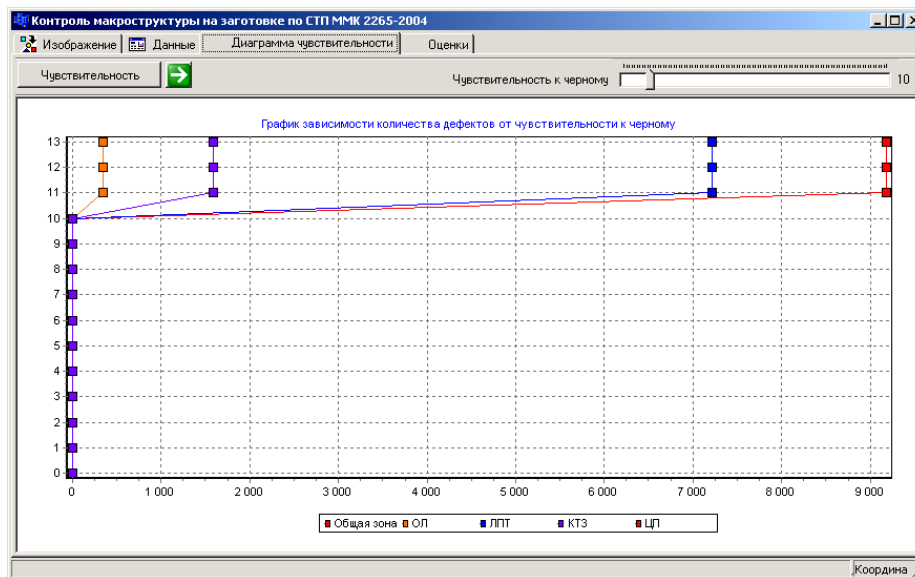


Рис. 3. Общая схема материальных и информационных потоков оценки качества продукции при наличии системы "Q&Ssq"



а



б

Оценки	Общая зона	ОП	КТЗ	ЛПТ общ	ЦП
ООВ	15266,2	640,8	7961,1	4644,2	76,0
ОШ	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
ЭПП	6315,6	236,0	3163,6	2110,4	29,4
ВК	1865,0	78,3	972,6	567,4	9,3
НВКМ	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
НАО	1,2430	0,0249	0,7031	0,2631	0,0030
НСО	0,7047	0,0177	0,3669	0,2032	0,0023
Кол-во дефектов	3	0	3	0	0
МАХ размер д	0 (5)	0 (0)	0 (5)	0 (0)	0 (0)
МАХ размер д (мм)	12,50	0,00	12,50	0,00	0,00

Ромбичность: 15,00

в

Рис. 4. Вид основных рабочих окон программного обеспечения "Q&SSq": а – открытие и подготовка изображения для обработки; б – оценка чувствительности к черному цвету по каждой зоне распространения дефектов; в – массив выходных данных по оценке изображения

правильно-тянущей машины и т.п.), а также качество каждой выбранной плавки, оперативно информировать технологический персонал электросталеплавильного цеха и Центральной лаборатории контроля об обнаруженных отклонениях в технологии и качестве заготовок.

4. Разработанная система слежения дает возможность организовать оперативную обработку большого объема эмпирических данных о качестве производимой в электросталеплавильном цехе продукции современными методами и свое-

временно принять решение о корректировке технологии выплавки и разливки стали в этом цехе.

5. Организация участка по оценке и регистрации результатов контроля качества макро-структуры непрерывнолитой заготовки в Центральной лаборатории контроля позволила снизить экономические затраты на производство заготовок за счет экономии средств на строительство лаборатории непосредственно на территории электросталеплавильного цеха.

Библиографический список

1. Логунова О.С., Павлов В.В., Нуров Х.Х. Оценка статистическими методами серного отпечатка поперечного темплета непрерывнолитой заготовки // *Электрометаллургия*. 2004. № 5. С. 18–24.
2. Логунова О.С., Парсункин Б.Н., Суспицын В.Г. Автоматизированная оценка качества непрерывнолитой заготовки // *Сталь*. № 12. 2004. С. 101–104.
3. Нуров Х.Х., Логунова О.С. Качество стали // *Свидетельство об отраслевой регистрации разработки* № 3056 / МГТУ. М.: ВНИИЦ, 2003. № 50200301078.
4. Логунова О.С. Стохастическая модель качества непрерывнолитой заготовки // *Сталь*. 2005. № 12. С. 21–23.
5. Внедрение систем управления качеством продукции на Магнитогорском металлургическом комбинате / Морозов А.А., Капцан Ф.В., Урцев В.Н., Лисичкина К.А., Корнилов В.Л., Курбан В.В. // *Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации: Сб. трудов Всерос. науч.-техн. конф.* / Под ред. Девятова Д.Х. Магнитогорск: ИПЦ ООО Проф-принт, 2005. Вып. 1. С. 9–11.

УДК 621.771+621.778

А. А. Радионов

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД СОВМЕЩЕННОГО ПРОКАТНО-ВОЛОЧИЛЬНОГО СТАНА: ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ

Разработка принципиально нового совмещенного прокатно-волочильного стана на протяжении ряда лет ведется в Магнитогорском государственном техническом университете совместно с ОАО «Белорецкий металлургический комбинат». Совмещенный стан объединяет в единой технологической линии два процесса – первоначальную прокатку заготовки, а затем ее волочение в монолитной волоке, тем самым сочетает такие достоинства этих процессов, как низкие затраты на деформацию при прокатке и высокую точность геометрии производимой проволоки при волочении.

На **рис. 1** приведена технологическая и кинематическая схемы совмещенного прокатно-волочильного стана. Стан состоит из прокатной секции, имеющей в своем составе две приводные и одну неприводную клетки, и волочильной секции, состоящей из двух вытяжных барабанов [1].

Отличительной особенностью прокатной секции является отсутствие электропривода второй клетки. Энергия, необходимая для деформации ме-

талла в этой клетки, подводится только посредством обрабатываемого металла путем подпора со стороны первой клетки и натяжения со стороны третьей клетки. Такое решение за счет использования резерва сил трения в очагах деформации приводных клеток позволяет уменьшить капитальные затраты при строительстве стана и существенно повысить к.п.д. процесса прокатки [2].

Волочильная секция, по сути, является непрерывным прямоточным волочильным станом с регулируемым противонатяжением. Стан снабжен также разматывателем и двухкатушечным намоточным аппаратом. Последний реализует принципиально новую, непрерывную схему съема готовой проволоки и осуществляет ее автоматический переброс с одной катушки на другую.

На **рис. 2** приведена механическая схема двухкатушечного намоточного аппарата. Наматываемые катушки 1 и 2 установлены на фиксирующих дисках 3 и 4 с захватывающими устройствами 5 и 6, которые соединены с привод-

ными валами 7 и 8. Вращение последних осуществляется посредством соединительных муфт 9 и 10 от приводных электродвигателей 11 и 12. Двигатели расположены на столе 13, имеющем возможность вращения вокруг неподвижного вала 15 от электродвигателя 14. Между катушками 1 и 2 установлены ножи 16, 17 и подвижная шторка 18.

Переброс проволоки с заполненной катушки на пустую осуществляется следующим образом. Проволока 19 наматывается на катушку 1 (рис. 1, б). После ее заполнения включается привод катушки 2 и происходит ее разгон. Причем направление вращения катушек противоположное. Разгон катушки 2 осуществляется до уровня, когда линейная скорость вращения шейки катушки равна линейной скорости движения проволоки. При достижении равенства этих скоростей шторка 18 поднимается и начинается разворот стола. На рис. 2, в показано расположение элементов системы в момент разворота стола на 90°. По окончании разворота стола на 180° (рис. 1, г) шторка 18 опускается, прижимая проволоку 19, которая, огибая шейку катушки 2 и нож 16, попадает в захват б и обрезается ножом 17. Катушка 1 останавливается, и далее осуществляется намотка проволоки на катушку 2. После ее заполнения цикл повторяется с той лишь разницей, что стол поворачивается в противоположную сторону.

Автоматизированный электропривод и системы управления для этого стана разрабатывались во взаимосвязи с его конструктивными частями и технологическими особенностями. Такой

комплексный подход позволил при разработке электропривода не только учитывать особенности технологического процесса, но и одновременно усовершенствовать его.

Для создания промышленного варианта совмещенного прокатно-волочильного стана были разработаны электроприводы следующих механизмов [3–5]:

- двух прокатных клетей, реализующих использование резерва сил трения в очагах деформации;
- волочильных блоков;
- катушек намоточного аппарата и его поворотного стола.

Также создана система автоматизации всего стана в целом, позволяющая не только четко работать в режимах прокатки-волочения, но и реализующая весь набор вспомогательных операций: заправки, разгона, штатной и аварийной остановок.

При разработке указанных электроприводов был решен весь комплекс вопросов: от анализа технологического процесса и корректировки требований к электроприводам до выбора типа, мощности электропривода и разработки систем управления заданными технологическими параметрами (скоростью, натяжением, положением). Следует отметить, что все электроприводы стана должны иметь возможность рекуперации энергии в сеть. В качестве базовой системы электропривода была выбрана система преобразователь частоты со звеном постоянного напряжения – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором.

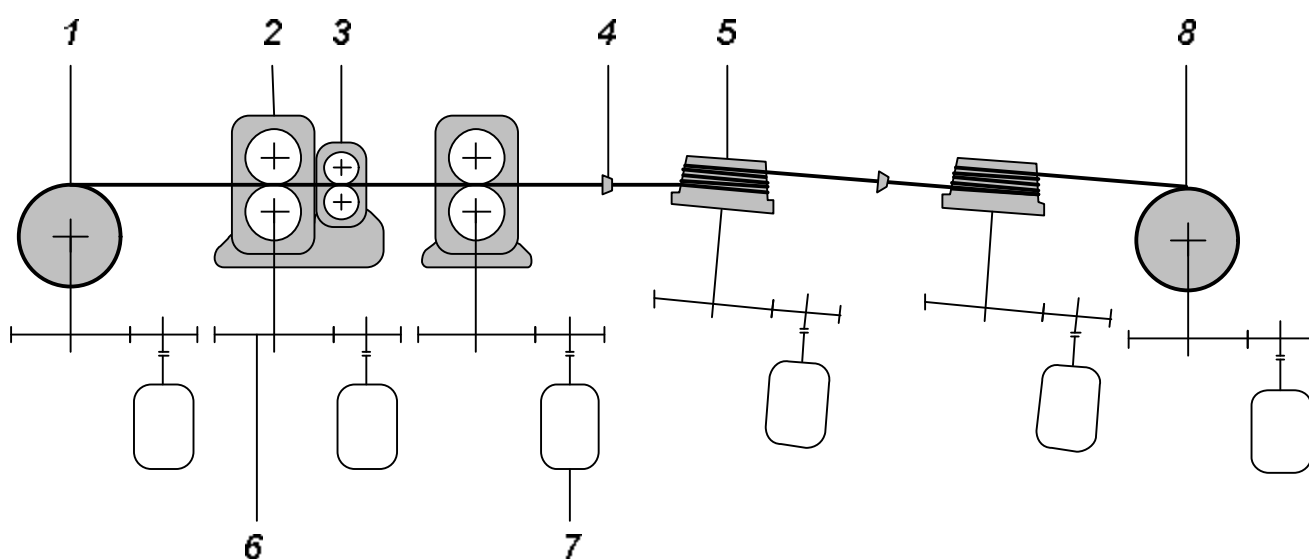


Рис. 1. Технологическая и кинематическая схемы совмещенного прокатно-волочильного стана:
1 – размотчик; 2 – приводная прокатная клетка; 3 – не приводная прокатная клетка; 4 – проволока;
5 – барабан волочильного блока; 6 – редуктор; 7 – приводной электродвигатель;
8 – двухкатушечный намоточный аппарат

Анализ технологического процесса рассматриваемого прокатно-волочильного стана показал, что основные требования, предъявляемые к его автоматизированным электроприводам, следующие

Общие требования ко всем электроприводам:

- обеспечение заправочного и толчкового режимов работы;
- обеспечение постоянного ускорения при пусках и торможениях;
- совместное и раздельное управление электроприводами;
- обеспечение режимов рабочего, экстренного и аварийного торможения с рекуперацией энергии в сеть.

1. К электроприводам прокатных клеток:

- обеспечение регулирования скорости как в статических, так и в динамических режимах работы с ошибкой, не превышающей $\pm 2\%$;
- диапазон регулирования скорости в пределах 1:50;
- обеспечение регулирования нейтрального угла в очаге деформации на заданном технологическом уровне как в статическом, так и в динамическом режимах работы с ошибкой не превышающей $\pm 5\%$.

2. К электроприводам вытяжных барабанов:

- обеспечение регулирования величины

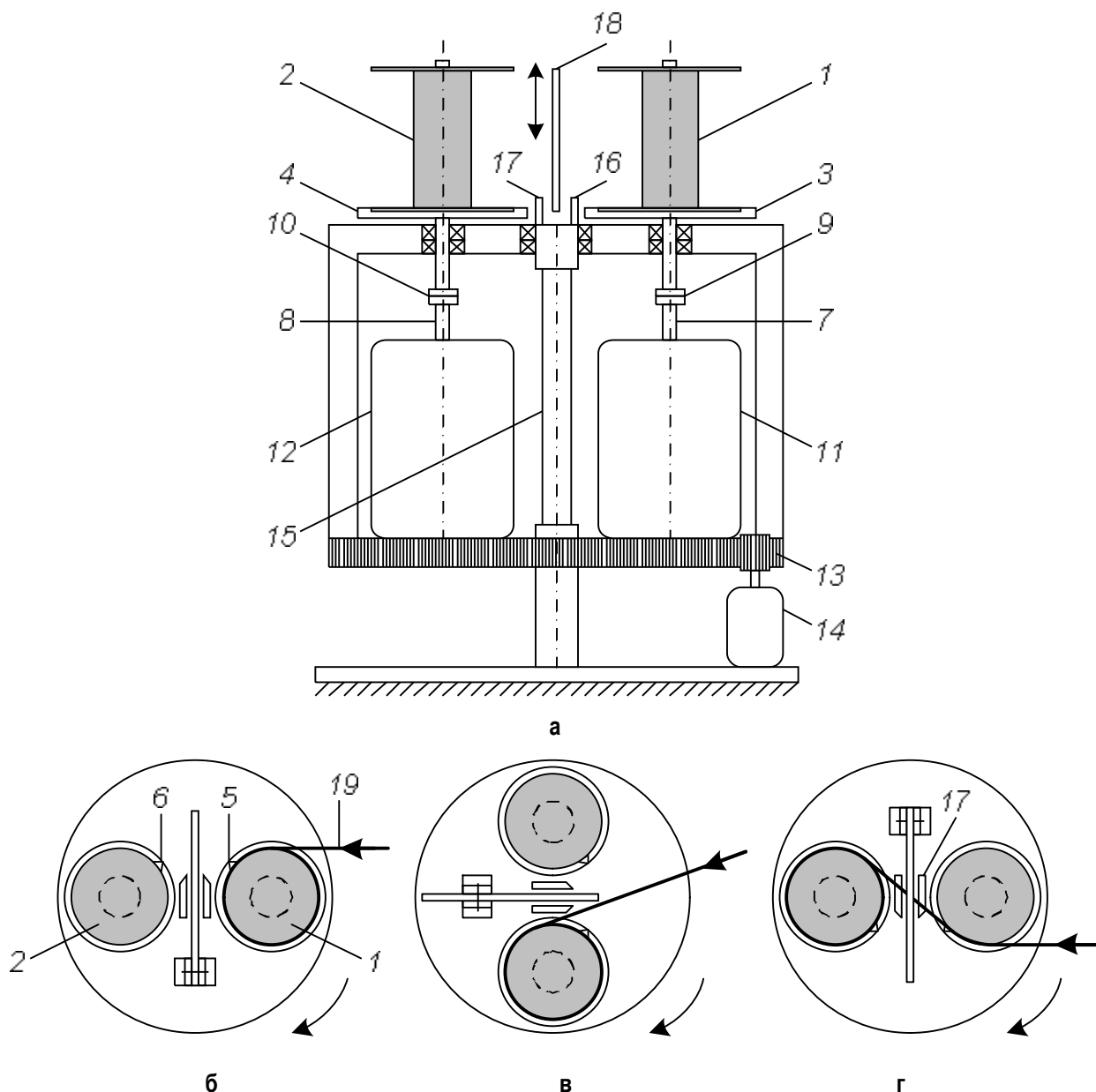


Рис. 2. Механическая система двухкатушечного намоточного аппарата

противонатяжения с ошибкой, не превышающей $\pm 15\%$;

- диапазон регулирования противонатяжения в пределах 1:10;
- диапазон регулирования скорости в пределах 1:50;

3. К электроприводу катушек намоточного аппарата:

- обеспечение регулирования натяжения смотки по заданному закону (в процессе намотки натяжение должно уменьшаться по мере заполнения катушки по гиперболическому закону в функции радиуса наматывания, что исключает межвитковое заклинивание проволоки и деформацию катушек) с точностью не менее $\pm 15\%$;
- диапазон регулирования натяжения 1:10;
- при перебросе проволоки с заполненной катушки на пустую линейная скорость шейки катушки должна быть равна скорости движения проволоки;
- диапазон регулирования скорости в пределах 1:100;

4. К электроприводу поворотного стола намоточного аппарата:

- привод разворота стола должен обеспечивать скорость 0,5...0,7 рад/с;
- позиционирование поворотного стола в заданных положениях с погрешностью не более ± 10 градусов;
- обеспечение реверсивного режима работы.

Кроме того, при проектировании автоматизированных электроприводов рассматриваемого стана необходимо учитывать тот факт, что при производстве проволоки для уменьшения трения в очаге деформации используется, как правило, сухая технологическая смазка. Вследствие этого в воздухе находится большое количество пыли, содержащей частицы извести, мыльного порошка, металлические частицы и др. Оседание этой

пыли на токоведущих частях электродвигателей, преобразователей и коммутирующей аппаратуры может привести к преждевременному выходу ее из строя. Поэтому в рассматриваемых электроприводах необходимо использовать двигатели в защищенном исполнении, а всю аппаратуру размещать в пыленепроницаемых шкафах и пультах управления.

Ряд перечисленных требований не являются характерными для известных технологических объектов и отличаются принципиальной новизной. В связи с этим были разработаны математические модели отдельных технологических узлов, их взаимосвязей через обрабатываемую проволоку. Составлено программное обеспечение, позволившее первоначально отработать системы электропривода посредством компьютерного моделирования.

Экспериментальные исследования были проведены на действующих агрегатах в условиях ОАО "Белорецкий металлургический комбинат" – прямомоточном волочильном стане ВПТ 5/750 и специально созданном образце прокатного блока. Таким образом, авторами подтверждены как принципиальная возможность создания предлагаемого совмещенного прокатно-волочильного стана, так и доказана состоятельность научных выводов и принятых технических решений. Результаты работы переданы в виде технического задания на проектирование в ОАО "Белорецкий металлургический комбинат", ОАО "Магнитогорский ГИПРОМЕЗ" и Алматинский завод тяжелого машиностроения.

Разработанный совмещенный прокатно-волочильный стан позволит интенсифицировать процесс производства стальной проволоки за счет снижения электропотребления на 10...15%, обрывности проволоки до 50%, увеличения скорости волочения на 30...35%, повышения надежности работы электрооборудования.

Библиографический список

1. Способ изготовления проволоки: заявка № 2006123837/02 Рос. Федерация: МПК⁸ В21С 1/00 / Никифоров Б.А., Радионова Л.В., Радионов А.А. и др.; заявитель ГОУ ВПО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова", заявлено 07.2006 г. 9 с.
2. О возможности снижения мощности, расходуемой на процесс прокатки проволоки на совмещенном прокатно-волочильном стане / А.А. Радионов, Л.В. Радионова, В.А. Харитонов, О.С. Малахов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2005. Вып. 10. С. 63–70.
3. Малахов О.С. Разработка автоматизированного электропривода прокатного проволочного блока с промежуточной неприводной клетью: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2006. 16 с.
4. Линьков С.А. Разработка автоматизированного электропривода энергоэффективного прямомоточного волочильного стана: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2006. 16 с.
5. Туганбаев А.И. Разработка автоматизированного электропривода двухкатушечного намоточного аппарата волочильного стана: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2006. 16 с.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.313.333.07

Реализация специальных режимов асинхронного электропривода с тиристорным управлением при питании от однофазной сети / А.С. Сарваров, Е.А. Завьялов, А.Д. Стригов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 3–6.

Обоснована целесообразность реализации специальных режимов АД, включая высоковольтные, при питании от однофазной сети. Приведены алгоритмы управления тиристорным устройством, реализующие пониженные ступени частоты вращения, и результаты исследований на компьютерной модели и экспериментальной установке. Приведены примеры реализации квазичастотного управления при трехфазном питании на пониженном напряжении.

Ил. 6.

УДК [621.3.015.2 + 621.316.94 + 621.317.757]: 621.311.1

Анализ показателей качества электроэнергии в системе промышленного электроснабжения с мощными тиристорными электроприводами / А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, А.Н. Шеметов, А.А. Николаев // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 6–11.

В статье описаны основные проблемы электромагнитной совместимости в системах промышленного электроснабжения с мощной нелинейной нагрузкой – тиристорными преобразователями. На примере листо-прокатного цеха рассмотрена методика экспериментального определения показателей качества электроэнергии: отклонений, колебаний и несинусоидальности напряжения в реальном масштабе времени с использованием современных математических программных пакетов для ЭВМ. Полученные авторами алгоритмы обработки мгновенных значений обеспечивают существенное повышение оперативности и точности расчетов гармонического состава тока нагрузки и напряжения сети и могут быть использованы как при выборе фильтрокомпенсирующих устройств в ходе проектирования и модернизации, так и при их настройке в процессе эксплуатации.

Ил. 6. Библиогр. 3 назв.

УДК 662.942.2:621.783.245

Совершенствование и развитие конструкций нагревательных колпаковых печей / В.В. Копцев, А.П. Морозов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 11–13.

Проанализированы существующие конструкции колпаковых печей. Сформулированы требования к современной конструкции газовой колпаковой печи для светлого отжига рулонов стали.

Библиогр. 20 назв.

УДК 378.1

Использование наукоемких технологий управления качеством знаний в высшей школе по дисциплине «Информатика» / И.И. Баранкова, Т.Н. Носова, О.В. Пермязова / Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 14–15.

Преподавателями кафедры информатики и информационных технологий ведется работа по внедрению электронных технологий в процесс обучения, рассматриваются приоритетные направления работы по использованию наукоемких технологий управления качеством знаний студентов университета.

Для организации работы со студентами очной формы обучения была разработана серия компьютерных тестов для контроля уровня знаний по различным разделам дисциплины "Информатика", читаемых на первом курсе всех специальностей, подготовлены банки изменяющихся заданий.

Ведется работа по созданию университетского сайта для заочной формы обучения, содержащего комплекс учебно-методических пособий, ориентированных на дистанционный способ получения студентами информации об учебно-методических материалах.

Библиогр. 1 назв.

УДК 519.25:669:621.746.5

Анализ сопряженности технологических нарушений и состояний аварийности на машинах непрерывной разливки стали / Л.Д. Девятченко, Л.Ш. Тимиргалеева // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 15–23.

Выполнен статистический анализ данных по аварийности на машинах непрерывной разливки стали ОАО «ММК» за 1999–2005 гг. и предложена методика оценки взаимосвязи категоризованных признаков технологических нарушений и состояний аварийности. Методом декомпозиции χ^2 -критерия выявлены наиболее значимые категории анализируемых признаков и установлена мера схожести некоторых категорий при высоком качестве представления этих результатов в пространстве низкой ($k=2$) размерности, чем обеспечивается наглядность в принятии решений по снижению частоты случаев аварийности изучаемых объектов.

Ил. 3. Табл. 10.

УДК 621.7:539.347

Экспериментально-теоретическое исследование радиационного и пластодеформационного увеличения предела пластичности меди и никеля / Г.А. Дубский, Т.Я. Дубская, С.А. Бутаков, Л.Г. Егорова // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 23–30.

В данной работе на основе известных экспериментальных фактов радиационного воздействия на механические свойства некоторых металлов, имеющих ОЦК и ГЦК структуру, а также высказанных некоторых положений, предложена и описана статистическая модель упрочнения предела пластичности (критического напряжения сдвига) при малых пластических деформациях поликристаллических меди и стали. Полученное при этом аналитическое решение зависимости предела пластичности от величины малых пластических деформаций и числа напряженно-стимулированных узлов закрепления дислокаций качественно описывают экспериментально наблюдаемые кривые – напряжения предела пластичности от величины малых пластических деформаций.

Ил. 10. Библиогр. 10 назв.

УДК 669.074; 621.783

Применение балансовой модели для стабилизации показателей доменной плавки / В.Л. Евстигнеев, Т.В. Майорова, М.Ю. Рябчиков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 30–33.

Предложена методика расчетов с использованием балансовой модели, позволяющая определять изменения в составе доменной шихты, необходимые для стабилизации показателя доменной плавки, и также решать задачу оптимизации состава доменной шихты по критерию минимизации расхода кокса с учетом многих ограничений, налагаемых на доменный процесс. Произведено сравнение действительного расхода кокса на доменной печи № 1 с рассчитанным по модели для тех же условий плавки.

Ил. 1. Библиогр. 3 назв.

УДК 658.26:621.31.004.12

Расчет установившегося режима в задаче диспетчерского управления системой электроснабжения усовершенствованным методом последовательного эквивалентирования / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, В.В. Зиновьев // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 33–37.

Предложен алгоритм оперативного расчета установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий, основанный на усовершенствованном методе последовательного эквивалентирования и приемах объектно-ориентированного программирования, позволяющих автоматизировать работу по подготовке информации о схеме за счет графических возможностей современных систем разработки программного обеспечения. Алгоритм и его программная реализация предназначены для использования диспетчерскими службами промышленных электрических сетей.

Ил. 5. Библиогр. 3 назв.

УДК 539.292

Электромагнитная генерация акустических волн вблизи магнитных фазовых переходов 2-го рода типа «порядок–беспорядок» и «порядок–порядок» / Р.С. Ильясов, М.Ю. Главатских, Ю.И. Савченко // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 37–41.

Теоретически и экспериментально установлена общая закономерность изменения эффективности электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП) вблизи температур магнитных фазовых переходов второго рода, характерная как для переходов “порядок – беспорядок” (точка Кюри в изотропных ферромагнетиках), так и “порядок – порядок” (переходы “легкая ось – угловая фаза” и “угловая фаза – легкая плоскость” в одноосных магнетиках), заключающаяся в том, что пик эффективности преобразования точно соответствует этим температурам при любых значениях магнитного поля, даже в тех случаях, когда в магнитном поле эти температуры перестают быть точками фазовых переходов.

Ил. 3. Библиогр. 13 назв.

УДК 620.179.16

Динамические магнитные, магнитоупругие и упругие свойства аморфного сплава Fe–Cu–Nb–Si–B после термической кристаллизации / М.А. Боровкова, Р.С. Ильясов, Н.В. Федорова, С.Э. Бабкин, А.В. Загайнов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 42–46.

Представлены результаты исследования динамических магнитных, упругих и магнитоупругих свойств аморфного сплава $Fe_{73,7}Cu_{1,0}Nb_{3,2}Si_{12,7}B_{9,4}$ на разных стадиях процесса термической кристаллизации. Измерения проведены методом двойного электромагнитно-акустического преобразования в резонансном и импульсном режимах. Зависимости параметров электромагнитно-акустического преобразования сопоставлены с данными мессбауэровской спектроскопии и измерениями температурной зависимости динамической магнитной восприимчивости. По совокупности полученных результатов сделаны выводы о доменной структуре нанокристаллических зерен и особенностях электромагнитной генерации различных акустических мод в сплавах с нанокристаллической структурой.

Ил. 4. Библиогр. 6 назв.

УДК 620.179.16

Учет температуры и приложенных напряжений при неразрушающем контроле методом ЭМАП поверхностных волн / С.Э. Бабкин, В.В. Величко, М.А. Боровкова, Р.С. Ильясов, О.Н. Вострокнутова // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 46–49.

Рассмотрено влияние внешних факторов – температуры и приложенных напряжений – на амплитуду принятого сигнала при электромагнитно-акустическом преобразовании (ЭМАП) поверхностных волн в прутках никеля. Показано, что их совместное действие может приводить к алгебраическому, с учетом знака, сложению изменений амплитуды принятого сигнала от каждой причины отдельно. Это необходимо учитывать при интерпретации результатов неразрушающего контроля. Предложены способы контроля внешних приложенных напряжений методом ЭМАП как с учетом температуры, так и с отстройкой от температуры.

Ил. 7. Библиогр. 6 назв.

УДК 621.7:539.374:621.78

Изменение термоэлектродвижущей силы, обусловленной упругой деформацией стальной проволоки при растяжении / Ю.П. Кочкин, А.Х. Чернега, С.Г. Шевченко // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 49–50.

Предложен способ измерения упругой деформации металлических конструкций.

Ил. 2. Библиогр. 2 назв.

УДК 681.142.2+621.746

Организация автоматизированного рабочего места для оценки качества макроструктуры непрерывнолитых сортовых заготовок / О.С. Логунова, Х.Х. Нуров, В.В. Павлов, В.Г. Суспицын // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 51–55.

Авторами работы представляется система по контролю качества непрерывнолитой сортовой заготовки в условиях Центральной лаборатории контроля ОАО «ММК». Для организации такой системы потребовалось использовать опыт работы по оценке качества заготовок по традиционной технологии и разработки новых технологий на основе средств вычислительной техники и локальных сетей.

Разработанное программное обеспечение для системы является уникальным и оригинальным с точки зрения используемых методов и организационной структуры для его функционирования.

Результаты работы позволяют осуществить непрерывный контроль качества макроструктуры непрерывнолитой сортовой заготовки в условиях действующего производства. На основе такой формы контроля появляется возможность оперативного принятия решения по ведению выплавки и непрерывной разливки стали.

Ил. 4.

УДК 621.771+621.778

Автоматизированный электропривод совмещенного прокатно-волочильного стана: основные задачи и направления разработки / А.А. Радионов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 55–58.

Рассмотрены особенности разработки автоматизированного электропривода принципиально нового технологического агрегата – совмещенного прокатно-волочильного стана, приведено описание механизмов его секций. Сформулированы основные технологические требования, предъявляемые к системам управления электроприводов прокатных клетей, волочильного блоков и двухкатушечного намоточного аппарата.

Ил. 2. Библиогр. 5 назв.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бабкин Сергей Энгелевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института УрО РАН, г. Ижевск.

Баранкова Инна Ильинична – кандидат технических наук, заведующая кафедрой информатики и информационных технологий, доцент ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Боровкова Марина Александровна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института УрО РАН, г. Ижевск.

Бутаков Сергей Анатольевич – кандидат педагогических наук, старший преподаватель кафедры физики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Величко Валерий Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института УрО РАН, г. Ижевск.

Вострокнутова Ольга Николаевна – ассистент кафедры физики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Главатских Марина Юрьевна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории электромагнитных явлений Физико-технического института УрО РАН, г. Ижевск.

Девятченко Леонид Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры математики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Дубская Татьяна Яковлевна – старший преподаватель кафедры физики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Дубский Геннадий Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Евстигнеев Владимир Леонтьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной кибернетики и систем управления ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Егорова Людмила Геннадьевна – ассистент кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Завьялов Евгений Альбертович – старший преподаватель кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Загайнов Анатолий Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института УрО РАН, г. Ижевск.

Зиновьев Василий Владимирович – инженер-исследователь НТП «Энергоконтроль», г. Магнитогорск.

Игуменцев Валентин Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Ильясов Рустам Сабитович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией электромагнитных явлений Физико-технического института УрО РАН, г. Ижевск.

Карандаев Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электро-техники и электротехнических систем, декан энергетического факультета ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Копцев Валерий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехнических и энергетических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Корнилов Геннадий Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры электро-техники и электротехнических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Кочкин Юрий Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры физики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Логунова Оксана Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Майорова Татьяна Владимировна – старший преподаватель кафедры экономики, коммерции и налогообложения ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Малафеев Алексей Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Морозов Александр Прокопьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехнических и энергетических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Николаев Александр Аркадьевич – аспирант кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Носова Татьяна Николаевна – старший преподаватель кафедры информатики и информационных технологий, доцент ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Нуров Хамит Хамитович – ассистент кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Павлов Владимир Викторович – ведущий инженер центральной лаборатории качества ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Пермякова Ольга Валерьевна – ассистент кафедры информатики и информационных технологий, доцент ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Радионов Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, помощник ректора ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Рябчиков Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры промышленной кибернетики и систем управления ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Савченко Юрий Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Сарваров Анвар Сабулханович – доктор технических наук, профессор, декан факультета автоматизации и вычислительной техники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Стригов Артем Дмитриевич – аспирант кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Суспицын Виктор Григорьевич – ведущий инженер центральной лаборатории качества ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Тимиргалеева Лилия Шамилевна – старший преподаватель кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, аспирант ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Федорова Надежда Владимировна – инженер-исследователь Физико-технического института УрО РАН, г. Ижевск.

Храмшин Тимур Рифхатович – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Чернега Альфия Хазимовна – старший преподаватель кафедры физики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Шевченко Светлана Григорьевна – старший преподаватель кафедры физики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Шеметов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА

1. ИНДУКЦИОННЫЙ импульсный датчик скорости электроприводов постоянного тока без механической стыковки с валом двигателя. Основные характеристики: диапазон измерений – не менее 500; нелинейность характеристики – не более 0,2%; уровень оборотных пульсаций – не более 0,1%. Рекомендуемые области применения: электроприводы, работающие в условиях повышенных температур, влажности, вибрации и запыленности взамен серийно выпускаемых датчиков скорости.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук В.И. Косматов.

2. ИНДУКЦИОННАЯ шахтная печь периодического действия, предназначенная для нагрева токами промышленной частоты калиброванной стали и проволоки в крупногабаритных мотках внешним диаметром до 1,5 м. Предлагается использование данной печи в термических отделениях калибровочных и проволочных цехов металлургических предприятий взамен колпаковых печей косвенного действия. Печь обеспечивает энергосберегающий нагрев разовой загрузки массой до 3 т в окислительной среде со скоростью до 250 град/ч и расходом электроэнергии до 350 кВтч/т. По отношению к известным образцам, предлагаемая конструкция проще в изготовлении, т.к. использует типовую пускорегулирующую аппаратуру.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук Ю.И. Тартаковский.

3. СИСТЕМА управления технологическими механизмами агрегата непрерывного горячего цинкования. Предназначена для косвенного регулирования и поддержания натяжения полосы в статических и динамических режимах. Система позволяет компенсировать влияние упругих элементов в механизме накопителя на колебания натяжения полосы при изменении скорости перемещения рамы. Помимо этого система обеспечивает устранение колебаний натяжения в печной секции, что обеспечивает повышение скорости обработки полосы и производительности агрегата в целом. Получен патент Российской Федерации на полезную модель (№ 55650 от 27.08.2006). Экономический эффект от внедрения системы на агрегате непрерывного горячего цинкования цеха покрытий ОАО «ММК» составил 2,3 млн руб.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук Г.П. Корнилов.

4. СИСТЕМА автоматического регулирования возбуждения крупных сетевых синхронных двигателей мощностью 1–10 МВт с резкопеременной нагрузкой, например используемых в качестве электроприводов клетей и преобразовательных агрегатов прокатных станов. Предлагаемая система позволяет существенно демпфировать качания ротора и активного тока статора при набросах нагрузки и одновременно качественно регулировать реактивный ток статора на заданном уровне в функции напряжения сети и реактивных токов смежных потребителей. При этом увеличивается надёжность и устойчивость синхронного двигателя и механического оборудования, повышается качество напряжения питающей сети, снижаются потери электроэнергии. Разработанная система реализуется на базе промышленных тиристорных возбуждательных устройств посредством их частичной реконструкции без дополнительных капитальных затрат.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук Г.П. Корнилов.

5. ТЕХНОЛОГИЯ производства азотированного феррохрома в процессе обработки его расплава струей низкотемпературной азотной плазмы. В качестве сырья могут быть использованы отходы ферросплавного производства. Технология предназначена для предприятий металлургического комплекса. По отношению к лучшим мировым образцам превосходит, или соответствует многим аналогичным разработкам, проще и дешевле в изготовлении. Стоимость оборудования меньше аналогов на 25%. Срок окупаемости проекта до 2-х лет. Внедрение разработки позволит наладить собственное производство азотированных ферросплавов для легирования стали вместо покупаемых на стороне. Затраты на установку составляют 150 тыс. у.е.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук Е.Б. Агапитов.

6. ПРОГРАММЫ расчета установившихся режимов системы электроснабжения крупных промышленных предприятий с собственными электростанциями и замкнутой структурой сетей 110–220 кВ. Использование программ позволяет выполнить расчет: уровней напряжения и потерь мощности; оптимальной загрузки источников реактивной мощности; определение оптимальных коэффициентов трансформации силовых трансформаторов; токов короткого замыкания; токов замыкания на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью с учетом работы дугогасящих реакторов.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук А.В. Малафеев.

7. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ асинхронный двигатель с индивидуальной компенсацией реактивной мощности. Применяется для насосов, вентиляторов, транспортеров, нефтяных качалок, рольгангов, компрессоров и т.д. Обладает повышенными энергосберегающими свойствами: $\cos\varphi=1$ и энергетическим КПД $\eta_{\text{эп}}=\eta \cdot \cos\varphi=0,85-0,9$, что на 15–20% выше по сравнению с энергетическим КПД традиционных асинхронных двигателей. Дополнительные затраты на изготовление нового или реконструкцию обычного двигателя окупаются экономией электроэнергии за 0,25–0,5 года.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук Р.Г. Мугалимов.

8. УСТРОЙСТВО тягодутьевое на основе сопла с центральным телом турбореактивного двигателя. Диапазон расходов от 15 м³/ч для колпаковых печей и до 3000–6000 м³/ч для вращающихся печей известняково-доломитового и цементного производств. Сопло с центральным телом может быть использовано для организации эвакуации продуктов сгорания из рабочего пространства колпаковой печи, либо для достижения необходимого разряжения в условиях вакуумирования при внепечной обработке стали. Простота конструкции в изготовлении и эксплуатации, а также снижение расходов природного газа на 5–10% при сохранении производительности печи и качества обрабатываемого материала обеспечивает значительный эффект в производстве металлургической извести.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук В.В. Копцев.

9. СИСТЕМА автоматического регулирования удельного натяжения и высоты петли полосы чистой группы широкополосного стана горячей прокатки с улучшенными динамическими характеристиками. Предложенный алгоритм определения натяжения по параметрам электропривода петледержателя позволяет выполнить систему по принципу прямого регулирования координат. Разработанная система регулирования позволяет добиться: обеспечения нижних границ допусков стандарта по толщине готового проката; сокращения количества застреваний, возникающих из-за нерегулируемых отклонений натяжений прокатываемой полосы; снижения концевой обрезки за счет улучшения условий захвата и выброса полосы, и, как результат всего вышесказанного, повышения коэффициента выхода годного горячего проката.

Руководитель разработки – проф., д-р техн. наук А.С. Карандаев.

10. ОРГАНИЗАЦИЯ дистанционного обучения иностранным языкам. Преимущества предлагаемой технологии: модульный характер обучения, обеспечивающий конструирование учебных программ для каждого обучаемого с учетом уровня его подготовки и потребностей; ориентация на обучение взрослых слушателей (возможность выбора индивидуальных графиков прохождения курса); использование открытых Интернет - стандартов и интерактивных элементов.

Экономичность дистанционных технологий: позволяют проводить обучение как групп, так и отдельных слушателей, удаленных от образовательного центра; обеспечивают возможность создания и обновления курсов в короткие сроки; обладают относительно невысокой стоимостью, что делает их доступными для большинства желающих получить образование.

Руководитель разработки – доц., канд. филол. наук Л.И. Антропова.

ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ ФАКУЛЬТЕТА АВТОМАТИКИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

1. КОМПЬЮТЕРНЫЕ технологии технического обслуживания и диагностирования промышленного оборудования, обеспечивающие: нормализацию и оцифровку различных параметров промышленного оборудования; регистрацию и отображение параметров в различных графических формах в реальном масштабе времени; формирование базы данных параметров оборудования и различные варианты математической обработки; разработку структуры и последующую работу диагностических моделей в реальном масштабе времени.

Основные факторы экономической эффективности от внедрения систем контроля и диагностирования: сокращение количества аварийных отказов оборудования; оперативное обнаружение и предотвращение аварий на ранних стадиях их развития; проведение профилактических ремонтов по фактическому состоянию оборудования.

В настоящее время предлагаемые системы внедрены и успешно эксплуатируются на ряде объектов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»: на 2-х клетевом дрессировочном стане и на 5-ти клетевом стане холодной прокатки 630 ЛПЦ-8; на стане горячей прокатки 2500 ЛПЦ-4; на стальной проковашах МНЛЗ № 1 и МНЛЗ № 4 кислородно-конвертерного цеха, на установке печь-ковш кислородно-конвертерного цеха.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук С.А. Евдокимов.

2. СИСТЕМА энергосберегающего управления процессом нагрева непрерывно-литых заготовок в нагревательных печах проходного типа.

Система управления в каждый момент времени выполняет расчет и установку оптимального распределения тепловых нагрузок по зонам нагревательной печи в зависимости от темпа прокатки, геометрических размеров (толщины) и начального теплового состояния заготовок, загружаемых в нагревательную печь и обеспечивает рациональное сжигание топлива в каждой зоне нагревательной печи путем поиска и поддержания оптимального соотношения топливо-воздух, что позволяет снизить удельный расход топлива на 3–5%.

Внедрение системы на современных нагревательных печах, оснащенных локальными контурами управления с использованием микропроцессорных контроллеров, практически не требует изменения этих систем. Обязательным условием эффективной работы системы является контроль и управление температурой поверхности нагреваемого металла по зонам нагревательной печи.

В результате внедрения системы на одной печи участка нагревательных печей стана 2500 ЛПЦ-4 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» полученный экономический эффект составил 360 тыс. руб.

Руководитель разработки – проф., д-р техн. наук Б.Н. Парсункин.

3. МЕТОДИКА проектирования и автоматизированный электропривод многороликового тянуще-правильного устройства (ТПУ) машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), позволяющий за счет целесообразного регулирования координат электропривода ТПУ улучшить качество непрерывнолитых заготовок и увеличить производительность МНЛЗ.

В результате внедрения электропривода на МНЛЗ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» получено: стабилизация скорости разлива стали в пределах $\pm 2\%$; снижение статических и динамических растягивающих усилий в кристаллизующемся слитке; оперативное (непосредственно в ходе разлива стали) диагностирование неисправностей в роликовой проводке по 9-ти показателям.

Экономический эффект от внедрения автоматизированного электропривода ТПУ на МНЛЗ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» составил 24 млн руб. в год.

Руководитель разработки – проф., д-р техн. наук С.И. Лукьянов.

4. СИСТЕМА плавного пуска высоковольтных электродвигателей переменного тока с использованием трансформаторно-тиристорного низковольтного устройства.

Пусковое устройство содержит в своем составе трехфазный трансформатор мощностью в три раза меньше мощности электродвигателя и низковольтный тиристорный регулятор напряжения, подключенный в цепь вторичной обмотки трансформатора. Для создания такого пускового устройства не требуются высоковольтные силовые ключи и высоковольтное исполнение комплектного тиристорного устройства. Стоимостные показатели предложенного варианта построения пускового устройства в 2–3 раза ниже существующих устройств высоковольтного исполнения.

Устройство внедряется на вентиляторе в ЛПЦ-4 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Руководитель разработки – проф., д-р техн. наук А.С. Сарваров.

5. ТЕХНОЛОГИЯ выпуска автолиста с регламентированной микротопографией поверхности, а так же аппаратура измерения параметров микротопографии поверхности и ее функциональных характеристик (функции распределения вероятности, корреляционных и спектральных функций, фазовых портретов и фрактальных характеристик).

В результате внедрения данных работ на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» разработана технология выпуска автолиста с первой группой обработки поверхности с регламентированной микротопографией поверхности по высотным и шаговым параметрам с подтвержденным экономическим эффектом 2058 тыс. руб. в год.

Руководитель разработки – проф., канд. техн. наук В.К. Белов.

6. ТЕХНОЛОГИЯ непрерывной разливки IF-стали на машинах криволинейного типа, предусматривающая разливку низкоуглеродистой стали на машинах непрерывной разливки криволинейного типа с охлаждением по зонам вторичного охлаждения путем подачи воды в зависимости от скорости вытягивания заготовки, требуемой макроструктуры и содержания углерода, марганца и серы.

Внедрение новой технологии позволило без изменения конструкции машины получать металл требуемой макроструктуры при экономии водных ресурсов; расширить сортамент слябов шириной более 2350 мм, отливаемых на машинах непрерывного литья заготовок; увеличить среднюю скорость непрерывной разливки на 0,1 м/мин.

Технология внедрена в работу машин непрерывного литья заготовок кислородно-конвертерного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Экономический эффект от внедрения составил 4265 тыс. руб. за счет увеличения производительности машины непрерывного литья заготовок.

Руководитель разработки – проф., д-р техн. наук Д.Х. Девятов.

7. ТЕХНОЛОГИЯ автоматизированной оценки непрерывно-литой заготовки прямоугольного и квадратного сечения, исключая визуальную субъективную оценки качества. Автоматизированная оценка качества заготовок прямоугольного сечения производится по электронному изображению серного отпечатка, для заготовок квадратного сечения – по фотографии, получаемой на автоматизированном рабочем месте, входящий в состав КИС ОАО «ММК».

Технология прошла успешные опытные испытания для образцов прямоугольного сечения $250 \times 750 \div 2500$ мм² в макротемплетной лаборатории, входящей в состав ЦЛК ОАО «ММК». На программное обеспечение для технологии автоматизированной оценки качества непрерывно-литой заготовки получена регистрация в Общероссийском фонде алгоритмов и программ.

Руководитель разработки – доц., канд. техн. наук О.С. Логунова.

8. СИСТЕМА технического диагностирования состояния и настройки механического и электрического оборудования тянущих роликов зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

В системе технического диагностирования по виду изменения токов нагрузки электродвигателей тянущих роликов в реальном масштабе времени отображаются следующие характерные неисправности, негативно влияющие на качество макроструктуры непрерывнолитых заготовок: износ и остаточный прогиб бочки тянущих роликов; исправность подшипниковых узлов линий привода; исправность редуктора; распределение статических и динамических продольных усилий, создаваемых в слитке электроприводом тянущих роликов в процессе его вытягивания; периодические и случайные буксовки электроприводов тянущих роликов; точность выставки роликовой проводки.

Разработаны обобщенный алгоритм системы технического диагностирования, диагностические признаки и алгоритмы для каждой диагностической функции.

Система технического диагностирования внедрена на МНЛЗ № 2, 3 ОАО «ММК». Экономический эффект составляет около 2 млн руб. в год.

Руководители разработки: проф., д-р техн. наук С.И. Лукьянов; доц., канд. техн. наук Е.С. Суспицын.

9. СИСТЕМА технического диагностирования электропривода роликов отводящего рольганга листового стана горячей прокатки.

Разработаны обобщенный алгоритм системы диагностирования, диагностические признаки и алгоритмы диагностирования появления неисправностей в электрическом и механическом оборудовании линий привода отводящего рольганга листового стана горячей прокатки. Система диагностирования позволяет в реальном масштабе времени выявить следующие неисправности: эксцентриситет бочки ролика; неисправность одной или двух резиновых муфт; перегрев электродвигателя ролика; неисправность (обрыв) щеточно-коллекторного устройства электродвигателя; состояние подшипниковых устройств линий привода; точность выставки роликов вдоль технологической линии.

Система технического диагностирования внедрена на стане 2000 горячей прокатки ОАО «ММК».

Руководители разработки: проф., д-р техн. наук С.И. Лукьянов; доц., канд. техн. наук Д.В. Швидченко.

10. СИСТЕМА управления тепловой нагрузкой по зонам протяжной печи для светлого термомеханического отжига холоднокатаного листа.

Используя нейросетевую математическую модель, система управления в зависимости от скорости и толщины полосы производит расчет числа необходимого количества включенных горелок в зонах нагрева и выдержки протяжной печи и общего расхода газа на зону для обеспечения заданной температуры полосы на выходе из этих зон.

Основными критериями работы системы управления являются: минимальный расход топлива на нагрев полосы; обеспечение равномерного включения горелок в пространстве протяжной печи для исключения местных перегревов и обеспечения щадящего режима работы радиантных труб, исключая значительные тепловые удары, ведущие к разрушению сварных швов.

Экономический эффект от внедрения системы на агрегате непрерывного горячего цинкования ОАО «ММК» составил более 600 тыс. руб в год.

Руководитель разработки – проф., д-р техн. наук Б.Н. Парсункин.

11. ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКАЯ система определения технического состояния промышленного оборудования, обеспечивающая: непрерывный мониторинг технического состояния механического оборудования прокатных станов, вальцешлифовальных станков; формирование базы данных их вибраций; разработку новых методик диагностики.

Внедрение вибродиагностических систем позволяет: определить фактическое состояние оборудования с целью проведения профилактических ремонтов; сократить количество аварийных отказов оборудования; определить режимы работы оборудования, позволяющие улучшить качество продукции и продлить срок эксплуатации оборудования без ремонта.

Руководители разработки: доц., канд. ф.-м. наук Ю.И. Савченко; канд. техн. наук А.А. Шпонько.