
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ

doi: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.03.053>
УДК 62-50+007.52 : [621.3.014/ 537.39] : 621.74:669.2/8

Ю.М. Запорожец¹, канд. техн. наук, **А.В. Иванов**¹, канд. техн. наук,
Ю.П. Кондратенко², д-р техн. наук, **В.Н. Цуркин**¹, канд. физ-мат. наук

¹ Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України
(пр. Богоявленський, 43-А, Николаєв, 54018, Україна,
e-mail: dpta@ijpt.com.ua),

² Черноморський національний університет ім. П. Могили
(ул. 68-ми Десантників, 10, Николаєв, 54003, Україна)

Компьютерные модели для управления режимами электротокерной обработки расплавов по заданным критериям качества литых изделий. Ч. I

Предложена схема построения автоматизированной системы управления режимами электротокерной обработки (АСУ–РЭТО) расплавов на основе гибридной интегрированной трехкомпонентной информационной системы (ИТИС). Показано, что особенности многофакторного воздействия управляющих параметров в процессе такой обработки на структурообразование отливок могут быть выявлены лишь в результате численных экспериментов с помощью адекватных компьютерных моделей. Сформулированы основные принципы построения АСУ–РЭТО. Разработана структура ИТИС для ее реализации с помощью компьютерных моделей мультифизических процессов электротокерной обработки (ЭТО) расплавов. Компьютерные модели являются системной базой заложенной в ИТИС алгоритмической парадигмы, включающей процедуры идеентификации экспериментальных образцов отливок с использованием стандартных прототипов, а также прогностические алгоритмы для управления режимами ЭТО расплава.

К л ю ч е в ы е с л о в а: отливка, качество, электротокерная обработка, режим, управление, информационная система, компьютерная модель, алгоритм.

В заготовительном производстве машиностроения более 60% деталей изготавливается методами литья. При таких масштабах выпуска литых изделий весьма актуальной в экономическом аспекте является проблема автоматизации технологических процессов. Вместе с тем, для обеспечения безопасности при эксплуатации машин и механизмов важнейшее требование — надежность литых деталей, обеспечиваемая, прежде всего, качеством отливок. Именно это является спорным относительно

© Запорожец Ю.М., Иванов А.В., Кондратенко Ю.П., Цуркин В.Н., 2020

возможностей автоматизации в литейном производстве, что в определенной мере сдерживает ее развитие.

Существует два способа обеспечения качества литых изделий. Одним из них является пассивный выходной контроль по внешним признакам, т.е. послеоперационная проверка отливок по критериям однородности структуры и соответствия регламентным требованиям (нормам) или их отбраковка при выявлении повреждений и внутренних дефектов [1—9]. При этом применяют различные методы неразрушающего контроля [2—4], позволяющие выявлять и классифицировать как поверхностные дефекты, так и некоторые внутренние изъяны литых изделий, и отбраковывать их.

Результаты выборочного аппаратного обследования отливок или массового контроля изделий, как правило, подвергаются математической обработке с использованием различных алгоритмов статистического анализа и(или) идентификации объектов по шаблонам и образцам с использованием нейросетевых процедур с помощью построения компьютерных моделей типа «черный (белый) ящик» и др. [4, 5]. Используя подобные алгоритмы, удастся внедрить в технологические цепочки литейного производства элементы автоматизации контроля качества литых изделий [4—6], позволяющие не допустить в эксплуатацию некачественные отливки. Однако, повысить таким способом качество изделий в процессе их изготовления и в целом повысить эффективность литейного производства не удастся.

Другой способ состоит в активном влиянии на внутренние процессы в начале процесса образования отливок, так как известно, что их основные структурные свойства закладываются еще на стадии расплава и далее, при кристаллизации и последующем затвердевании, подчиняются законам наследственности [9, 10]. Такое влияние осуществляется посредством обработки расплава, которая заключается в применении целенаправленных внешних воздействий на технологические факторы, формирующие конечные свойства отливок на промежуточных стадиях процесса их структурообразования [1, 8].

Для получения благоприятной структуры отливок в системе шихта—расплав—отливка применяют реагентные и энергетические (физические) методы обработки расплавов. Если реагенты действуют избирательно и локально, то энергетические методы реализуются посредством воздействия на весь объем расплава физическими полями различной природы (электромагнитное, акустическое и др.), возбуждая сопряженные явления и оказывая тем самым комплексное (многофакторное) действие на расплав. Иными словами, энергетические методы обработки по сути являются мультифизическими и многофункциональными. Поэтому их при-

менение должно быть строго дозированным, т.е. режимы обработки следует назначать с учетом соразмерности параметров внешних структуроформирующих воздействий и внутренних структурокинетических и фазовых преобразований в объекте обработки.

Управление таким процессом — весьма сложная инженерная задача, требующая глубокого понимания внутреннего содержания процессов, происходящих в расплаве при его обработке. В то же время получение экспериментальных результатов исследований энергетических воздействий сопряжено со значительными трудностями, так как такие результаты могут быть получены только с помощью анализа структурных свойств отливок, ибо внутренний объем высокотемпературного расплава для непосредственного измерения локальных параметров взаимодействующих сред до его затвердевания физически недоступен. В этих условиях единственно доступным средством определения влияния задающих воздействий на управляемые параметры и конечные результаты являются расчетные методы. Из них практическое применение нашли два различных по методологической основе подхода: эмпирический и имитационный.

Аналитические возможности расчетных алгоритмов с использованием эмпирических зависимостей имеют естественное ограничение по фактологической базе. Имитационное моделирование физических явлений на основе существующих теорий, т.е. численный эксперимент, реализуемый на компьютерных моделях, является наиболее эффективным инструментом исследований в указанной сфере. С одной стороны, такой подход позволяет существенно сократить время поиска оптимальных параметров обработки, а с другой, — формировать алгоритмы управления режимами обработки, соразмеряя степень их воздействия с критериями качества литых изделий.

Таким образом, управление процессом целенаправленного формирования требуемых показателей качества литых изделий является актуальной научно-технической проблемой, для решения которой необходимы новые подходы, основанные на использовании современных компьютерных технологий с применением имитационных моделей, адекватно воспроизводящих физические взаимодействия, происходящие при обработке расплава.

Характеристика проблемы. Изложенное выше в полной мере относится к одному из наиболее перспективных энергетических методов — обработке расплавов электрическим током [9—13]. В результате исследований [14—16] установлено, что распределение электрического тока и вызванных им электродинамических усилий при обработке расплава существенно влияет на формирование структуры отливки при ее дальнейшем затвердевании. Электротокковая обработка (ЭТО) заключается в

непосредственном пропускании через расплав электрического тока различных режимов (постоянного, пульсирующего, переменного, импульсного) с помощью электродов-тоководов. Используя различные режимы электрического тока и создавая с помощью определенной расстановки электродов в ковше с расплавом некоторое заданное распределение электрического поля и плотности тока, можно целенаправленно и эффективно воздействовать на кристаллизационную способность расплава, обеспечивая оптимальность процессов кристаллизации для формирования заданных характеристик структуры литого металла. Однако широкое внедрение этого метода в технологии литейного производства затруднено вследствие влияния на совокупность нелинейных процессов в расплаве многих взаимообусловленных факторов, а также большого набора управляемых и управляющих параметров [8, 13].

Обработка расплава выполняется для следующих целей:

гомогенизация расплава в макрообъеме при увеличении топологического беспорядка на мезо- и атомарном уровнях структуры;

дегазация расплава и удаление из него неметаллических включений;

минимизация отрицательных наследственных признаков шихты, которые через расплав проявляются в литом изделии [7].

При достижении указанных целей обеспечивается существенное улучшение качества литых изделий, поэтому при управлении формированием структуры отливок характеристики структуры, а также нормируемые эксплуатационные свойства отливок становятся управляемыми параметрами.

Управляющими в этой технологии являются внешние факторы, которые задают режим обработки расплава, а именно конструктивные характеристики реактора с электродной системой и параметры электрического тока. Объем ковша и расположение в нем электродов, их размеры, форма и заглубление в расплав, межэлектродный промежуток и другие конструктивы обуславливают возможность широких вариаций пространственного распределения плотности тока. При этом параметры тока, в частности амплитуда, частота, длительность импульсов и время обработки, задают энергетический спектр воздействий.

Следует заметить, что при протекании тока в расплаве возбуждаются сопряженные физические явления: самоиндукция, электровихревые течения в расплаве, пинч-эффект и другие, на которые накладывается тепловое действие тока, вызывающее изменения проводимости и вязкости среды, конвекцию и другие явления. Соответственно эти явления есть дополнительными сопряженными факторами, влияющими на структурообразование. Кроме того, в расплаве, как правило, имеются инородные включения (фазы), которые при ЭТО активизируются. Подобные вклю-

чения под действием полей мигрируют в объеме, взаимодействуют между собой и, в зависимости от их размеров, формы, физических свойств и общей массы, вызывают локальные аномалии параметров среды. Наличие таких включений и особенности их поведения являются внутренними факторами влияния на протекание процессов ЭТО. В результате эти процессы приводят к образованию предкристаллизационного состояния, из которого затем формируется структура затвердевшей отливки. Так внутренние и сопряженные факторы опосредуют воздействие внешних факторов на управляемые параметры — показатели качества отливок.

Управление таким комплексным процессом в следящем режиме требует сбора, обработки и контроля множества данных, различных как по своей физической природе, так и по пространственно-временным характеристикам. Однако, кроме температуры в расплаве и интегральных значений тока и напряжения на выходе источника тока, получение упомянутых данных о состоянии расплава непосредственно в процессе обработки физически невозможно. Фактически результаты обработки устанавливаются уже после затвердевания расплава посредством анализа структурных свойств отливки, т.е. временной интервал между воздействием и реакцией объекта совершенно неадекватен условиям внедрения даже примитивных схем автоматизации.

Таким образом, есть основания утверждать, что проблема автоматизации технологических процессов литья в части управления режимами ЭТО (УРЭТО) расплава по критериям качества структуры отливок в литейном производстве остается нерешенной и сдерживает дальнейший прогресс в этой отрасли.

В изложенных обстоятельствах стратегию построения системы УРЭТО и возможности ее автоматизации определяет тот факт, что практически единственным доступным средством получения информации об объекте в процессе ЭТО являются численные эксперименты [17, 18]. Их суть заключается в поиске оптимальных сочетаний параметров режима обработки и получение оценок показателей качества отливки посредством решения задач о распределении локальных параметров внутренних процессов в расплаве с помощью математической модели.

В настоящее время численное моделирование процессов ЭТО расплавов получило определенное развитие, хотя, по сути, специализированной компьютерной модели для решения задач ЭТО пока не создано. В качестве математической основы в этих задачах используются дифференциальные уравнения в частных производных (ДУЧП), которые описывают указанные выше физические процессы. Их численное решение выполняется чаще всего методами конечных элементов или разностей с помощью типовых программных пакетов [15, 17].

Несмотря на достаточно успешное применение такого подхода опыт решения практических задач ЭТО показывает, что в нем кроется ряд недостатков. Некоторые из них присущи самим численным методам, а другие — обусловлены особенностями их применения к задачам ЭТО, в результате чего моделирование может не вполне адекватно отражать реальные физические явления. Вследствие указанных обстоятельств многие важные аспекты происходящих при этом процессов, связанных с учетом влияния упомянутых внешних и внутренних структурообразующих факторов, пока не раскрыты. Поэтому остается невыясненной и роль, а главное, количественная оценка вклада указанных факторов в качественные параметры отливок.

В связи с этим приходится констатировать, что имеющихся в настоящее время сведений о характере взаимосвязи показателей качества отливок с параметрами режимов ЭТО недостаточно для того, чтобы построить автоматизированную систему, которая позволяла бы осуществлять контроль, управление и обеспечение необходимых условий обработки для формирования благоприятной структуры получаемых литых изделий. Более того, каждая из указанных выше групп структурообразующих факторов фактически определяет свой специфический класс задач, для решения которых унифицированные методы еще не выработаны. Отсюда следует, что управление указанным технологическим процессом нужно строить на принципиально иной концептуальной основе, сочетающей конкретность физического опыта, математическую точность и вариативность численного эксперимента.

В качестве такой основы предлагается построение интегрированной трехкомпонентной информационной системы (ИТИС), в которую с помощью адекватных компьютерных моделей мультифизических процессов заложены алгоритмические процедуры идентификации экспериментальных образцов отливок по стандартным прототипам [19, 20] и прогностические алгоритмы обеспечения управления режимами ЭТО [21, 22]. Обоснуем целесообразность и базовые принципы построения предлагаемой системы и алгоритмической парадигмы управления режимами ЭТО расплава, а также построение физически адекватных адаптированных к использованию в упомянутых алгоритмах компьютерных моделей, основанных на интегральных формах уравнений полей, и результатов их верификации.

Интегрированная трехкомпонентная информационная система обеспечения УРЭТО расплава. Анализ возможностей целенаправленного формирования требуемых показателей качества литых изделий и предпосылок для управления таким процессом показал, что система расплав — отливка как абстрактный объект управления имеет три практически не связанные между собой информационные проекции.

Первая проекция представляет набор данных о параметрах режима проведенного сеанса обработки экспериментального образца—темплета, а также о показателях качества структуры и свойствах полученной отливки, т.е. своего рода «досье темплета».

Вторая проекция — это мера соответствия или несоответствия структуры и эксплуатационных показателей качества темплета типовым образцам (прототипам) и нормативным требованиям.

Третью проекцию составляют обобщенные количественные оценки интенсивности происходящих в расплаве физико-энергетических процессов при его обработке в заданном темплете режиме, полученные на компьютерных моделях.

Очевидно, что такой неупорядоченный информационный массив, содержащий три автономных информационных компоненты, целесообразно объединить в продуктивную функциональную структуру, а именно ИТИС — систему сопряженных баз данных, которые посредством надлежащих алгоритмических процедур используются для управления режимами ЭТО. С учетом изложенного логично построить ИТИС на основе следующих компонент:

1. База экспериментальных данных (БЭД), в которой аккумулируется весь объем полученных в ходе сеансов ЭТО результатов и накапливаются данные вновь проводимых исследований.

2. База нормативных данных (БНД), содержащая справочный материал о характеристиках типичных структур литых изделий в виде атласов структур металлов и сплавов [23], стандартов на механические свойства, химический состав и другие регламентируемые параметры, т.е. это набор шаблонов, для которых определяются показатели качества литых изделий; БНД — условно постоянная компонента.

3. База данных числовых макетов (БДЧМ) режима структурообразования, формируемая на основании обобщенных количественных оценок интенсивности (ОКОИ) энергетических воздействий, полученных в результате численных экспериментов на компьютерных моделях физического процесса ЭТО расплава, которые используются для синтеза прогностических архетипов — прообразов структурных свойств отливок.

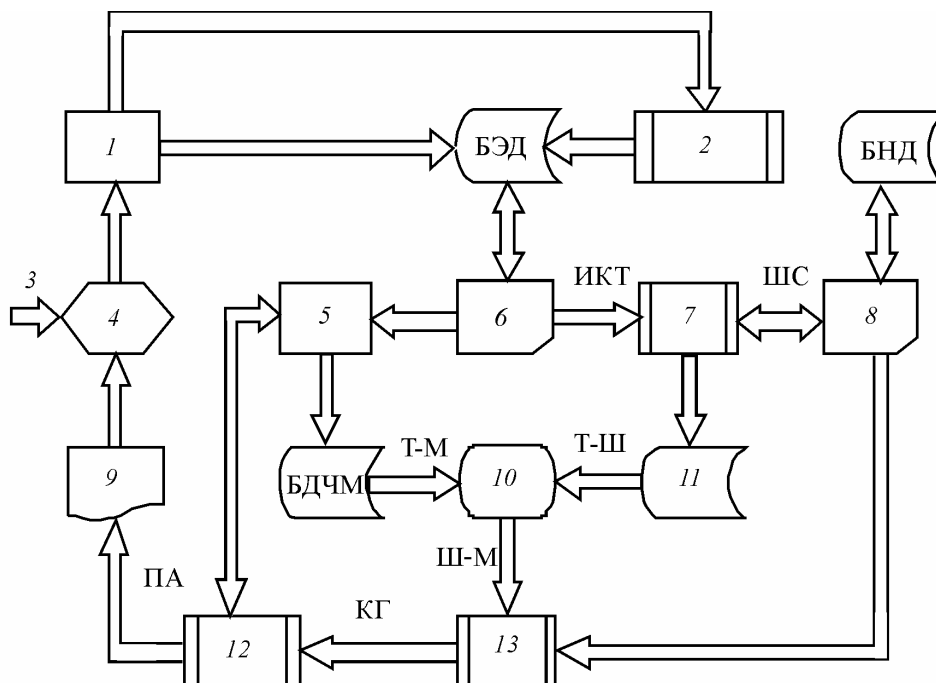
Алгоритмическая парадигма автоматизированной системы УРЭТО расплавов (АСУ—РЭТО). Создание алгоритмической процедуры выявления соответствий между элементами указанных баз данных 1—3 и выработки по ее результатам заданий на режимы обработки расплавов обеспечит возможность построения АСУ—РЭТО, совместимой с технологической средой литейно-заготовительного производства. Аппаратная реализация такой системы вполне может быть осуществлена на основе компьютерных модулей с обычными двух-четырёхядерными процессорами, оснащенными соответствующими периферийными устройствами.

Названную алгоритмическую парадигму можно представить такой последовательностью процедур:

- для каждого образца из БЭД, для которого получены характеристики темплета, БНД выполняют поиск шаблона с совпадающими или достаточно близкими характеристиками (идентифицируют темплет), в результате чего формируются парные (или групповые) выборки соответствия «темплет — шаблон» (Т-Ш); в случае отсутствия совпадений данные темплета заносят в отдельную базу неидентифицированных образцов;
- для каждого сеанса ЭТО, для которого в БЭД зафиксированы параметры режима обработки (внешние структурообразующие факторы), выполняют компьютерное моделирование физического процесса обработки и рассчитывают ОКОИ воздействия внутренних структурообразующих факторов, т.е. создают числовой макет режима структурообразования [22,24,25], на основании чего формируют парные выборки соответствия «темплет — макет» (Т-М);
- для каждого сеанса ЭТО по общему маркеру Т формируют парные выборки соответствия «шаблон — макет» (Ш-М) и проводят сопоставление ОКОИ внутренних воздействий из выборок Т-М со структурными характеристиками соответствующих выборок Т-Ш для выявления корреляции между ними и трендов взаимосвязи показателей качества структуры отливок с параметрами режимов обработки [24,26];
- приняв выявленные корреляционные зависимости за феноменологическую гипотезу модели процесса ЭТО, формируют алгоритм построения (синтеза) прогностического архетипа — прообраза предполагаемой структуры и свойств отливки, соответствующей задаваемым параметрам обработки.

Задачи, решение которых обеспечивается представленной ИТИС, можно подразделить на прямые и обратные. В прямой задаче требуется, исходя из заданных параметров обработки, определить вероятные показатели качества и свойства отливки. В обратной задаче необходимо определить параметры режима обработки для заданного типа и показателей качества отливки, заложенных в прогностический архетип. Для управления формированием требуемых показателей качества литых изделий в литейном производстве основной задачей является обратная. Решение прямой задачи необходимо в процессе выполнения исследований и настройки режимов ЭТО расплавов, т.е. при проектировании процессов литья с использованием ЭТО расплава.

Структура и функционирование ИТИС. Структура ИТИС, реализующей указанные процедуры и основные межэлементные функциональные связи, представлена в виде блок-схемы на рисунке. В БЭД от технологического реактора *1* поступают данные о параметрах режимов прово-



Блок-схема ИТИС: 1 — технологический реактор (ТР); 2 — блок структурного анализа и механических испытаний (БСА-МИ); 3 — оператор (ОП); 4 — блок управления технологического реактора (БУТР); 5 — блок компьютерного моделирования (БКМ); 6 — библиотека идентификационных карт темплетов (Б-ИКТ); 7 — блок поиска соответствий (БПС); 8 — библиотека шаблонов структур отливок (Б-ШС); 9 — блок задания режима обработки (БЗРО); 10 — блок сопряжения данных (БСД); 11 — база данных идентифицированных образцов (БДИО); 12 — блок прогнозирования параметров структуры (БППС); 13 — блок корреляционного анализа (БКА)

димой обработки образцов, а также передается информация из блока структурного анализа и механических испытаний 2 о показателях качества структуры отливок. По совокупности этих данных в БЭД формируется библиотека идентификационных карт темплетов 6 (параметры режима обработки, показатели качества отливки, эксплуатационные характеристики), систематизированная по категориям сопоставимых признаков и их количественным градациям.

Из совокупности данных БНД формируется библиотека шаблонов структур отливок 8, систематизированная так же, как Б-ИКТ. Из 6 данные каждого темплета поступают в блок поиска соответствий 7. Этот блок выполняет поиск в библиотеке шаблонов структур 8, структуры наиболее соответствующей заданному темплету, осуществляет его идентификацию и формирует парную выборку Т-Ш, которая передается в базу данных идентифицированных образцов 11.

В блок компьютерного моделирования 5 из БЭД загружают данные о комбинациях внешних параметров проведенных сеансов обработки. На основании этих данных в блоке 5 выполняются расчеты параметров внутренних процессов в расплаве с учетом влияния упомянутых ранее структурообразующих факторов и выводятся ОКОИ, которые передаются в БДЧМ.

Данные из БДЧМ, где формируются парные выборки Т-М, и из блока 11 поступают в блок сопряжения данных 10, где по маркеру Т сопрягаются с выборками Т-Ш. Полученные выборки Ш-М устанавливают соответствие между параметрами и характеристиками шаблонов и макетов, занесенными в БНД и БДЧМ. Затем генеральная совокупность данных выборок Ш-М из блока 10 передается в блок корреляционного анализа 13, где с помощью специализированных алгоритмов (таких, например, как нейросетевые модели [27, 28]) выявляются тренды взаимосвязи показателей качества отливок, заданных в БНД, и характеристик режимов структурообразования, зафиксированных в БДЧМ. Выявленные взаимосвязи представляют собой корреляционное отображение компьютерной модели процесса обработки расплава в пространство стандартных параметров шаблонов отливок — «коррелограмму» процесса (КГ).

Выраженную в надлежащей математической форме КГ транслируют в блок прогнозирования параметров структуры отливки 12. На ее основе с помощью синтетического (гибридного) алгоритма числовой макет преобразуют в прогностический архетип (ПА) — прообраз предполагаемой структуры отливки при заданных в макете параметрах обработки. В гибридном алгоритме предусмотрено сочетание элементов как стохастического (корреляционного), так и детерминистического (функционального) методов прогнозирования (оценки) влияния воздействующих факторов на характеристики структуры отливок [29, 30] в зависимости от физической природы воздействия.

Далее, для выполнения основной задачи ИТИС — определения параметров режима обработки заданного типа и показателей качества отливки, заложенных в ПА, — его содержание передается в блок 9, дополненный при необходимости указаниями оператора. В этом блоке по маркерам Ш-М-Т формируется набор параметров соответствующего данному ПА режима обработки. Наконец, задание на обработку транслируется на блок управления технологического реактора 4, реализующего функцию управления АСУ-РЭТО.

Следует заметить, что статистически представительность выборочных совокупностей БЭД и БНД в силу многофакторности связей между ними и других естественных причин может быть ограничена. Поэтому для обеспечения достоверности прогностической функции алгоритми-

ческой парадигмы необходимо максимально насытить данными БДЧМ и для восполнения пробелов в интервале градаций параметров БЭД использовать процедуры интерполяционного прогнозирования получения отливок с требуемыми показателями качества. За пределами интервала параметров режимов БЭД целесообразно применить алгоритмы экстраполяционного прогнозирования, например нейросетевые модели. Более подробно структуры и алгоритмы функционирования представленной АСУ-РЭТО будут рассмотрены в отдельной публикации.

Из приведенного краткого описания структуры предложенной АСУ-РЭТО расплавов видно, что основным ее звеном является БКМ 5, в котором с помощью компьютерных моделей формируются генеральная совокупность числовых макетов режима структурообразования и представительная выборка прогностических архетипов. Именно эта процедура предопределяет успешность реализации задачи целенаправленного формирования показателей качества литых изделий. Поэтому к компьютерным моделям, предназначенным для указанных целей, следует предъявлять самые высокие требования, как относительно достижимой точности и скорости сходимости решений, универсальности в отношении пространственных характеристик моделируемых объектов, так и относительно физической адекватности постановки расчетных задач и интерпретации получаемых результатов. Этому посвящена вторая часть работы.

Выводы

1. Выдвинутая впервые концепция автоматизации управления режимами ЭТО расплава предназначена для целенаправленного формирования оптимальных показателей качества литых изделий в технологиях литейного производства с помощью компьютерных прогностических моделей. Реализация такой концепции позволит сократить объем необходимых физических экспериментов, существенно снизить затраты как на тестовые, так и на регламентные исследования, что создаст явные конкурентные преимущества перед традиционной технологией.

2. Основная идея концепции выражена алгоритмической парадигмой, в которой с помощью процедур идентификации параметров расплавов и отливок достигнуто объективное объединение разнородных информационных потоков, отражающих конкретность физического эксперимента, статистическую представительность выборок прогностических архетипов и математическую точность компьютерного моделирования. В результате такого синтеза создаются предпосылки для учета всей совокупности факторов, оказывающих влияние на структурообразование и формирование таких управляющих воздействий, которые обеспечат оптимальный режим электротокерной обработки расплава.

3. Воплощение концепции в схеме гибридной ИТИС является уникальным техническим решением, которое создает научно-техническую базу для разработки целого спектра аппаратных и программных средств для многофакторных управляющих воздействий на структурообразование и показатели качества отливок в процессе ЭТО расплава.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цуркин В.Н. Концепции управления качеством литого металла // *Металл и литье Украины*, 2008, № 9, с. 25—28.
2. Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. М.: Энергоатом-издат., 1983, 272 с.
3. Dobrzański L.A., Krupiński M. and Sokolowski J.H. Methodology of automatic quality control of aluminium castings // *Jour. Achiev. Mater. Manuf. Eng. (JAMME)*, 2007, № 1-2 (20), pp. 69—78.
4. Świllo S.J., Perzyk M. Surface Casting Defects Inspection Using Vision System and Neural Network Techniques // *Arch. Foundry Eng.* 2013, Vol. 13, № 4, pp. 103—106.
5. Birkhold M., Friedrich C. and Lechler A. Automation of the Casting Process using a model-based NC Architecture // *Science Direct*, 2015, PapersOnLine 48-17, pp.195—200.
6. Frank Herold, Rolf-Rainer Grigat, Klaus Bavendiek. A New Analysis and Classification Method for Automatic Defect Recognition in X-Ray Images of Castings // *NDT.net*, 2002, 10, (7). Режим доступа: <https://www.ndt.net/article/ecndt02/207/207.htm>
7. Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю. и др. Наследственное влияние структуры шихтовых металлов на плотность алюминиевых расплавов системы Al-Si // *Изв. вузов. Цветная металлургия. Литейное производство*, 2014, № 6, с. 22—27.
8. Tsurkin V.N., Sinchuk A.V., Ivanov A.V. Electric current treatment of liquid and crystallizing alloys in casting technologies // *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2011, 46, pp. 456—464.
9. Ban C., Han Y., Ba Q. et al. Influence of pulse electric current on solidification structure of Al-Sn alloy // *Electromagn. Process. Mater.*, 2007, 8, pp. 34—37.
10. He Lijia, Wang Jianzhong, Qi Jingang, Du Huiling and Zhao Zuofu. Influences of electric pulse on solidification structure of LM-29 Al-Si alloy // *China Foundry*, 2010, Vol. 7, No. 2, pp. 153—156.
11. Zhang Y., Song C., Zhu L. et al. Influence of Electric-Current Pulse Treatment on the Formation of Regular Eutectic Morphology in an Al-Si Eutectic Alloy // *Metall. Mater. Trans.*, 2011, 42, pp. 604—611.
12. Jingang Qi, Yang Li, Tukur S.A. et al. A model study for the electric pulse frequency effects on the solidification behavior of Al-5%Cu alloy // *Intern. Journal of Scientific & Technology Research*, 2014, Vol 3, № 9, pp. 267—274.
13. Nakada M., Shiohara Y., Flemings M.C. Modification of solidification structures by pulse electric discharging // *ISIJ Int.*, 1990, 30, pp. 27—33.
14. Ivanov A.V., Sinchuk A.V., Ruban A.S. Effect of the Technological Parameters of the Melt Treatment by a Electric Pulse Current on the Mixing Process // *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2012, 48, pp. 180—186.
15. Zhang Y. H., Xu Y. Y., Ye C. Y. et al. Relevance of electrical current distribution to the forced fow and grain refinement in solidified Al-Si hypoeutectic alloy // *Scientific Reports*, 2018, 8:3242 | DOI: 0.1038/s41598-018-21709-y.
16. Eskin D.G., Mi J. Solidification Processing of Metallic Alloys under External Fields. Springer Series. Materials Science, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019, 328 p.

17. *Ivanov A.V., Tsurkin V.N.* Peculiarities of Distribution of Electromagnetic and Hydrodynamic Fields for Conductive Electric Current Treatment of Melts in Different Modes // Surf. Eng. Appl. Electrochem, 2018, 55, pp. 53—64.
18. *Yuriy Zaporozhets, Artem Ivanov, Yuriy Kondratenko.* Geometrical Platform of Big Database Computing for Modeling of Complex Physical Phenomena in Electric Current Treatment of Liquid Metals / *Data* 2019, 4(4), 136; <https://doi.org/10.3390/data4040136>
19. *Кольцов Д.А.* Методы анализа и идентификации неопределенных моделей эксперимента. Автореф. диссер. ...канд. физ.-мат. наук. М., 2006, 30 с.
20. *Кондратенко Ю.П., Козлов О.В., Запорожець Ю.М.* та ін. Нейронечіткі спостерегачі для ідентифікації притискного зусилля магнітокеруваних рушіїв мобільних роботів // Технічна електродинаміка, 2017, № 5, с. 53—61.
21. *Якунин Е. А.* Математическое моделирование процесса кристаллизации в применении к прогнозированию структуры закаленных из жидкого состояния металлов // Научный вестник НГУ (Нац. горный ун-т), 2012, № 3, с. 63—67.
22. *Farrokhnejad Mehdi.* Numerical Modeling of Solidification Process and Prediction of Mechanical Properties in Magnesium Alloys (2013). Electronic Thesis and Dissertation Repository, 1459. Режим доступа: <https://ir.lib.uwo.ca/etd/1459>.
23. Атлас микроструктур черных и цветных металлов и сплавов: учеб. пособие / Составитель Андрушевич А.А. [и др.]. Минск : БГАТУ, 2012, 100 с.
24. *Nikrityuk P.A., Eckert K., Grundmann R.* Numerical study of the influence of an applied electrical potential on the solidification of a binary metal alloy. Wiley Online Library: published 26 November 2005 // 2-nd Sino-German Workshop on Electromagnetic Processing of Materials, Dresden, Germany. October 16-19, 2005. <https://DOI.org/10.1002/9783527607969.ch41>.
25. *Jianzheng Guo and Mark Samonds.* Simulation of Casting and Solidification Processes. // The journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2011, July | DOI: 10.1007/s11837-011-0104-4.
26. *Поводатор А. М., Конашков В. В., Цепелев В. С.* и др. Применение корреляционного анализа при исследовании свойств высокотемпературных металлических расплавов // Изв. вузов. Черная металлургия, 2012, № 2, с. 18—21.
27. *Manjunath Patel, Robins Mathew, Prasad Krishna & Mahesh B. Parappagoudar.* Investigation of squeeze cast process parameters effects on secondary dendrite arm spacing using statistical regression and artificial neural network models // ScienceDirect, Procedia Technology, 2014, 14, pp. 149—156.
28. *Федин С. С.* Адаптивная нейросетевая модель прогнозирования и управления качеством многоэтапных технологических процессов // Энергосбережение-Энергетика-Энергоаудит, 2010, № 4 (74), с. 62—70.
29. *Nastac L. and Zhang D.* 3D Stochastic Modeling of Microstructure Evolution During the Solidification of Dendritic Alloys // 2nd International Congress on 3D Materials Science, TMS, 2014, pp. 17—18.
30. *Zhu M.F., Hong C.P., Stefanescu D.M. and Chang Y.A.* Computational Modeling of Microstructure Evolution in Solidification of Aluminum Alloys. DOI: 10.1007/s11663-007-9052-3 // Metallurgical and Materials Transactions B, 2007, Vol. 38B, pp. 517—524.

Получена 13.03.20

REFERENCES

1. Tsurkin, V.N. (2008), "Cast metal quality management concepts", *Metall i lit'ye Ukrainy*, no. 9, pp. 25-28.
2. Gerasimov, V.G., Kliuev, V.V. and Shaternikov V.E. (1985), *Metody i pribory elektromagnitnogo kontrolya promyshlennykh izdelij* [Methods and tools for electromagnetic testing of industrial products], Energoatomizdat, Moscow, Russia.
3. Dobrzański, L.A., Krupiński, M. and Sokolowski, J.H. (2007), "Methodology of automatic quality control of aluminium castings", *Jour. Achiev. Mater. Manuf. Eng. (JAMME)*, Vol. 20, no. 1-2, pp. 69-78.
4. Świłło, S.J. and Perzyk, M. (2013), "Surface Casting Defects Inspection Using Vision System and Neural Network Techniques", *Arch. Foundry Eng*, Vol. 13, no. 4, pp. 103-106.
5. Birkhold, M., Friedrich, C. and Lechler, A. (2015), "Automation of the Casting Process using a model-based NC Architecture", *Science Direct*, pp. 195-200.
6. Herold, F., Grigat, R.R. and Bavendiek, K. (2002), "A New Analysis and Classification Method for Automatic Defect Recognition in X-Ray Images of Castings", *NDT.net*, Vol. 10, no. 7, available at: <https://www.ndt.net/article/ecndt02/207/207.htm> (accessed May 26, 2020).
7. Nikitin, K.V., Nikitin, V.I. and Timoshkin, I.Yu. (2014), "Hereditary influence of the structure of charge materials on the density of aluminum alloys of the Al-Si system", *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*, no. 6, pp. 22-27. DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2014-6-22-27>.
8. Tsurkin, V.N., Sinchuk, A.V. and Ivanov, A.V. (2011), "Electric current treatment of liquid and crystallizing alloys in casting technologies", *Surf. Eng. Appl. Electrochem*, Vol. 46, no. 5, pp. 456-464.
9. Ban, C., Han, Y. and Ba, Q. (2007), "Influence of pulse electric current on solidification structure of Al-Sn alloy", *Electromagn. Process. Mater*, no. 8, pp. 3-37.
10. Lijia, H., Jianzhong, W., Jingang, Q., Huiling, D. and Zuofu, Z. (2010), "Influences of electric pulse on solidification structure of LM-29 Al-Si alloy", *China Foundry*, Vol. 7, no. 2, pp. 153-156.
11. Zhang, Y., Song, C. and Zhu, L. (2011), "Influence of Electric-Current Pulse Treatment on the Formation of Regular Eutectic Morphology in an Al-Si Eutectic Alloy", *Metall. Mater. Trans*, Vol. 42, pp. 604-611. DOI:10.1007/s11663-011-9502-9.
12. Jingang, Qi., Yang, Li. and Tukur, S.A. (2014), "A model study for the electric pulse frequency effects on the solidification behavior of Al-5%Cu alloy", *Intern. Journal of Scientific & Technology Research*, Vol 3, no. 9, pp. 267-274.
13. Nakada, M., Shiohara, Y. and Flemings, M.C. (1990), "Modification of solidification structures by pulse electric discharging", *ISIJ Int*, Vol. 30, pp. 27-33.
14. Ivanov, A.V., Sinchuk, A.V. and Ruban, A.S. (2012), "Effect of the Technological Parameters of the Melt Treatment by a Electric Pulse Current on the Mixing Process", *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, Vol. 48, no. 2, pp. 180-186.
15. Zhang, Y.H., Xu, Y.Y. and Ye, C.Y. (2018), "Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al-Si hypoeutectic alloy", *Scientific Reports*. DOI: 0.1038/s41598-018-21709-y.
16. Eskin, D.G. and Mi, J. (2019), *Solidification Processing of Metallic Alloys under External Fields*, Springer, Berlin/Heidelberg, Germany.
17. Ivanov, A.V. and Tsurkin, V.N. (2018), "Peculiarities of Distribution of Electromagnetic and Hydrodynamic Fields for Conductive Electric Current Treatment of Melts in Different Modes", *Surf. Eng. Appl. Electrochem*, Vol. 55, no. 1, pp. 53-64.

18. Zaporozhets, Y., Ivanov, Artem. and Kondratenko, Y. (2019), "Geometrical Platform of Big Database Computing for Modeling of Complex Physical Phenomena in Electric Current Treatment of Liquid Metals", *Data*, Vol. 4, Iss. 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/data4040136>.
19. Kol'cov, D.A. (2006), *Metody analiza i identifikacii neopredelennykh modelej eksperimenta* [Methods of analysis and identification of uncertain experimental models], Avtoref. disser. ...kand. fiz.-mat. nauk, Moscow.
20. Kondratenko, Y.P., Joachim Rudolph, Kozlov, O.V., Zaporozhets, Y.M. and Gerasin, O.S. (2017), "Neuro-fuzzy observers of clamping force for magnetically operated movers of mobile robots", *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 5, pp. 53-61.
21. Yakunin, Ye.A (2012), "Mathematical simulation of crystallization process in application to prognostication of structure of hard-tempered from the liquid state metals", *State Higher Educational Institution "National Mining University"*, no. 3, pp. 63-67.
22. Mehdi, F. (2013), Numerical Modeling of Solidification Process and Prediction of Mechanical Properties in Magnesium Alloys, Electronic Thesis and Dissertation Repository, available at: <https://ir.lib.uwo.ca/etd/1459> (accessed May 26, 2020).
23. Andrushevich, A.A (2012), *Atlas mikrostruktur chernykh i cvetnykh metallov i splavov: ucheb. posobie* [Atlas of microstructures of ferrous and non-ferrous metals and alloys: textbook], Minsk, Belarus.
24. Nikrityuk, P.A., Eckert, K. and Grundmann, R. (2005), "Numerical study of the influence of an applied electrical potential on the solidification of a binary metal alloy", *Wiley Online Library*, Dresden, Germany. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527607969.ch41>.
25. Guo, J. and Samonds, M. (2011), "Simulation of Casting and Solidification Processes", *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. DOI: 10.1007/s11837-011-0104-4.
26. Povodator, A. M., Konashkov, V. V., Tcepelev, V. C. and V'yuhin, V. V. (2012), "Study on the high-temperature melts properties through the use of correlation analysis", *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, Vol. 55, no. 2, pp. 18-21.
27. Manjunath, P., Robins, M., Prasad, K. and Mahesh, B.P. (2014), "Investigation of squeeze cast process parameters effects on secondary dendrite arm spacing using statistical regression and artificial neural network models", *ScienceDirect, Procedia Technology*, Vol. 14, pp. 149-156.
28. Fedin, S.S. (2010), "Adaptive neurosetevaya model of prognostication and quality of multistage technological processes management", *Energy saving-Power engineering-Energy audit*, Vol. 4, no. 74, pp. 62-70.
29. Nastac, L. and Zhang, D. (2014), "3D Stochastic Modeling of Microstructure Evolution During the Solidification of Dendritic Alloys", *2nd International Congress on 3D Materials Science, TMS*, pp. 17-18. DOI: 10.1007/978-3-319-48123-4_3.
30. Zhu, M.F., Hong, C.P., Stefanescu, D.M. and Chang, Y.A. (2007), "Computational Modeling of Microstructure Evolution in Solidification of Aluminum Alloys", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 38B, pp. 517-524. DOI: 10.1007/s11663-007-9052-3.

Received 13.03.20

Ю.М. Запорожець, А.В. Иванов, Ю.П. Кондратенко, В.М. Цуркін

КОМП'ЮТЕРНІ МОДЕЛІ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ
РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОСТРУМОВОЇ ОБРОБКИ РОЗПЛАВІВ
ЗА ЗАДАНИМИ КРИТЕРІЯМИ ЯКОСТІ ЛИТИХ ВИРОБІВ. Ч. I

Запропоновано схему побудови автоматизованої системи управління режимами електрострумової обробки (АСУ-РЕСО) розплавів на основі гібридної інтегрованої трикомпонентної інформаційної системи (ІТІС). Показано, що особливості багатофакторного впливу керуючих параметрів в процесі обробки розплаву на структуроутворення виливків можуть бути виявлені лише у результаті чисельних експериментів за допомогою адекватних комп'ютерних моделей. Сформульовано основні принципи побудови АСУ-РЕСО і розроблено структуру ІТІС для її реалізації за допомогою комп'ютерних моделей мультифізичних процесів ЕСО. Комп'ютерні моделі є системною базою алгоритмічної парадигми, закладеної в ІТІС, до якої включено процедури ідентифікації експериментальних зразків виливків зі стандартними прототипами і прогностичні алгоритми для управління режимами ЕСО розплаву.

К л ю ч о в і с л о в а: виливок, якість, електрострумова обробка, режим, управління, інформаційна система, комп'ютерна модель, алгоритм.

Yu.M. Zaporozhets, A.V. Ivanov, Yu.P. Kondratenko, V.M. Tsurkin

COMPUTER MODELS FOR MODE CONTROL OF ELECTRIC
CURRENT TREATMENT OF MELTS AT SPECIFIED QUALITY
CRITERIA FOR CAST PRODUCTS. PART I

The possibility of modes control of electric current treatment (MCECT) is justified. It is shown that features of multifactor influence of control parameters in the process of melt treatment on castings structural formation can be revealed only by numerical experiments with the help of adequate computer models. The main principles of construction of the automated system of MCECT are formulated and the structure of the integrated three-component information system (ITIS) for its realization by means of computer models of ECT multiphysical processes is developed. Computer models serve as the system base of the algorithmic paradigm embedded in ITIS, which includes the identification of experimental samples of castings with standard prototypes and prognostic algorithms for the modes controlling of electric current melt processing.

K e y w o r d s: casting, quality, electric current treatment, mode, control, information system, computer model, algorithm.

ЗАПОРОЖЕЦЬ Юрій Михайлович, канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. Інститута імпульсних процесів і технологій НАН України. В 1973 г. закончил Николаевский кораблестроительный институт им. адмирала С.И. Макарова. Область научных исследований — моделирование электромагнитных полей технических объектов; процессы преобразования энергии, энергетическое оборудование и системы; автоматизация и моделирование технологических процессов.

ИВАНОВ Артем Владимирович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Института импульсных процессов и технологий НАН Украины. В 2002. г. окончил Николаевский кораблестроительный институт им. адмирала С.И. Макарова. Область научных исследований — процессы энергетической обработки металлических материалов.

КОНДРАТЕНКО Юрий Пантелеевич, д-р техн. наук, профессор Черноморского национального университета им. П. Могилы. В 1976 г. окончил Николаевский кораблестроительный институт им. адмирала С.И. Макарова. Область научных исследований — автоматизация, робототехника, датчики и системы управления, интеллектуальные системы поддержки принятия решений, нечеткая логика.

ЦУРКИН Владимир Николаевич, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Института импульсных процессов и технологий НАН Украины. В 1974 г. окончил Харьковский политехнический институт. Область научных исследований — процессы энергетической обработки металлических материалов.