



Дымко Е. П.,  
Высоцкий С. В.,  
Красноухова А. А.,  
Николаева Ю. Е.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АДАПТАЦИИ КОМПЬЮТЕРНО- ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ СМЕСЕПРИГОТОВЛЕНИЯ К УСЛОВИЯМ ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ УКРАИНСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ, ПРОИЗВОДЯЩИХ ИЗНОСОСТОЙКИЕ ЧУГУНЫ

*Показано, что использование современных компьютерно-интегрированных систем смесеприготовления импортного производства является эффективным, если имеется возможность допечения ее моделями и алгоритмами украинских разработок в области синтеза формовочных смесей и оптимального управления процессам смесеприготовительных отделений. Показано, что обеспечение заданного качества смеси является важным фактором, определяющим эксплуатационные износостойкие свойства чугунных отливок специального назначения.*

**Ключевые слова:** *формовочная смесь, компьютерно-интегрированная технология, смесеприготовительное отделение, синтез регулятора.*

### 1. Введение

Износостойкие чугуны являются тем материалом, которые хорошо зарекомендовали себя в условиях эксплуатации с интенсивным абразивным трением. Среди областей применения приоритетное место им отводится в оборудовании, предназначенного для получения строительных материалов. Более того, известно использование таких чугунов и для более жестких условий эксплуатации, например, для лопаток дробебетных аппаратов. Альтернативу им составляют, конечно, легированные стали, прошедшие соответствующую термическую обработку [1, 2], однако изготовление износостойких отливок из стали более дорогостоящее. В связи с этим, актуальным является разработка таких составов износостойких чугунов, которые обеспечивают заданные эксплуатационные свойства, и это подтверждается рядом работ последних лет, выполненных за рубежом [3–5]. Однако, как следует из этих работ, основной уклон делается в сторону управления свойствами самого материала, в то время как на качество поверхности не особо смотрят. И если речь идет об управлении поверхностными свойствами с помощью специальных современных технологий химико-термической обработки и нанотехнологий [1, 6], то на факторы формирования литейной корочки отводится гораздо меньший объем исследований. Хотя фактор качества поверхности, подверженной интенсивному абразивному износу, очень важен. Поэтому, так как чугунные отливки подобного назначения изготавливаются литьем в разовые песчаные формы и качество их поверхности формируется в месте контакта с формовочной смесью, актуальным является исследование, посвященное управлению качеством формовочной смеси.

### 2. Анализ литературных данных

Рассматривая проблему получения высоких эксплуатационных свойств износостойких чугунов, видно, что основная доля исследований посвящена синтезу оптимальных химических составов чугуна [7–9]. При этом для решения задачи синтеза выявлено три основных подхода: параметрическая классификация [8, 9], использование традиционных методов планирования эксперимента и регрессионного анализа на основе методов нечеткой математики [10, 11]. При этом исследование самого материала выполняется с привлечением знаний металловедческого характера с целью выявления механизмов формирования износостойкости [12, 13]. Отдельно вопросы, связанные с управлением качества формовочных смесей с указанием на важность области их применения, описаны в работах [14–16], причем акцент в них сделан именно на вопросы математического моделирования на основе методов планирования эксперимента с целью выбора таких составов смесей, которые обеспечивают получение заданного комплекса свойств. Подобных подход можно считать достаточно гибким, так как он может быть использован для получения широкой номенклатуры смесей для отливок различного функционального назначения. Речь может идти также и об износостойких чугунах, так как современные добавки к формовочным смесям обеспечивают высокое их качество. С другой стороны, здесь очень важно отметить, что если поверхность отливки, непосредственно работающая на трение, имеет дефекты, именно в этих местах будут формироваться локальные напряжения и критические нагрузки, приводящие к выходу таких отливок из строя. Самым простым примером этого являются отливки лопаток дробебетных

аппаратов, для которых бездефектное качество поверхности является даже более значимым с точки зрения долговечности, чем сам химический состав чугуна. В связи с этим, нужно сделать вывод о том, что наличие в цехе по изготовлению износостойкого чугуна высококачественных смесей зависит от надежной работы систем смесеприготовления, гарантом которой является внедрение решений в области автоматизации.

### 3. Объект, цель и задачи исследования

*Объектом исследования* выбрана реально существующая и предлагаемая на рынке литейного оборудования система управления смесеприготовлением QualiMaster AT1/SandReport/SandExpert.

*Предмет исследования* — использование системы QualiMaster AT1/SandReport/SandExpert в литейных цехах украинских предприятий на основе возможности дополнения ее моделями и алгоритмами украинских разработок в области синтеза формовочных смесей и оптимального управления процессом смесеприготовительных отделений.

*Целью работы* являлась разработка решений по компьютерно-интегрированному управлению процессом смесеприготовления.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка принципиальных технических решений для схемы системы управления смесеприготовительным оборудованием QualiMaster AT1/SandReport/SandExpert;
- выбор законов регулирования для схемы системы управления.

### 4. Методика исследования схемы системы управления смесеприготовительным оборудованием

В состав рассматриваемой системы QualiMaster AT1/SandReport/SandExpert входят интенсивные смесители Айрих типовой серии D и R [17]. Конструктивные особенности смесителя типовой серии D определяют три компонента: поворотный смесительный резервуар, вращающиеся специальные смесительные инструменты, регулируемое комбинированное устройство, способствующее формированию прочного вертикального компонента потока смеси и ускорению процесса опорожнения в конце смешивания. Интенсивные смесители Айрих типовой серии R имеют конструкцию, формирующую следующие преимущества: оптимальная гомогенизация смеси, кратчайшее время смешивания, незначительная подверженность износу, конструкция, не требующая интенсивного техобслуживания, постоянное отличное качество смеси (на продолжительное время), непрерывный или периодический режим работы. В смесителях Айрих используется система регулирования и измерения Айрих QualiMaster AT1. Однако, производителем не раскрываются алгоритмы работы и математические модели, используемые в системе управления оборудованием QualiMaster AT1/SandReport/SandExpert. Поэтому, приобретение такой системы украинскими предприятиями, вероятно, будет связано с необходимостью адаптации под свои реально существующие условия. Предлагаются варианты возможной адаптации или компьютерно-интегрированного развития системы по следующим направлениям: блок формирования свойств смеси, блок дозировки компонентов, система управления оборудованием (рис. 1).

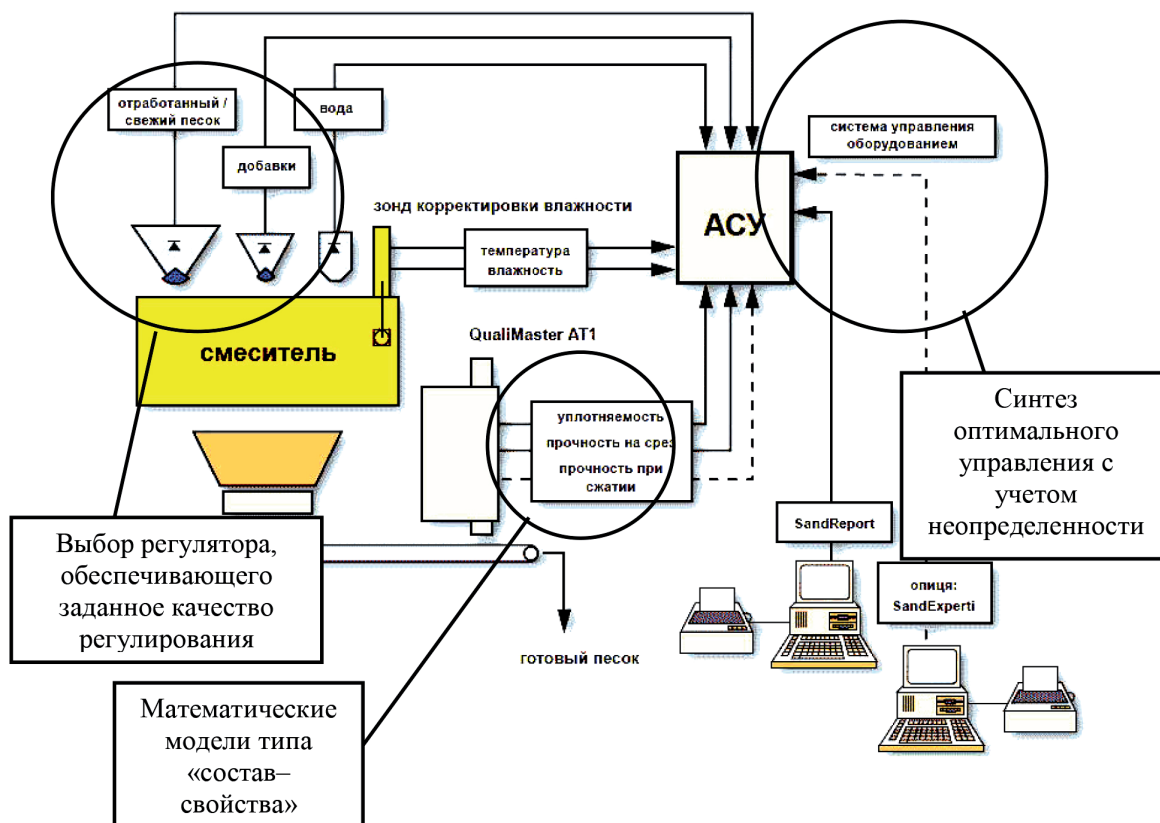


Рис. 1. Направления технических решений для схемы системы управления QualiMaster AT1/SandReport/SandExpert [17]

Опция «Математические модели типа «состав — свойства»» предполагает наличие математических моделей, описывающих зависимость свойств смеси от ее рецептуры. Методика построения этих моделей предполагает реализацию любого из описанных выше трех подходов.

Опция «Выбор регулятора, обеспечивающего заданное качество регулирования» предполагает реализацию алгоритма выбора и расчета регулятора на основе инженерной методики. Для этого используется следующая процедура.

1. Расчет динамического коэффициента регулирования (для статического объекта  $R_{\text{д}} = x_1^{\Delta} / k_{\text{об}} \Delta y$ , для астатического объекта  $R_{\text{д}} = x_1^{\Delta} T_{\text{об}} / \tau_{\text{об}} \Delta y$ ). Здесь  $k_{\text{об}}$  — коэффициент передачи объекта для рабочего значения нагрузки объекта управления, определяемый отношением единицы регулируемой величины к единице входной величины;  $T_{\text{об}}$  — постоянная времени объекта;  $\tau_{\text{об}}$  — время запаздывания.

2. Построение графика для определения динамических коэффициентов и выбирается простейший регулятор и проверка обеспечения выбранным регулятором допустимого времени регулирования  $t_{\text{р}}$ , и выбор в противном случае более сложного закона управления.

3. Расчет статической ошибки и выбор типа регулятора, обеспечивающего допустимую ее величину, и определение настроек регулятора, обеспечивающих заданное качество переходного процесса.

Опция «Синтез оптимального управления с учетом неопределенности» предполагает реализацию алгоритма поиска оптимального управления в случае, если входные переменные процесса заданы нечетко. Для этого возможна реализация методики, принципы которой изложены в работах [18, 19]: выбор приоритетных критериев качества управления, задаваемых в виде соответствующего функционала, и синтез оптимального управления на основе принципа максимума Понтрягина. При этом выходная характеристика процесса может задаваться уравнением многомерной регрессии в функции нечетких входных переменных (влажности смеси, температуры смеси, содержания плохо контролируемых или неконтролируемых компонентов).

### 5. Пример расчетов по блокам компьютерно-интегрированной системы

Для опции «Математические модели типа «состав — свойства»» могут быть использованы любые доступные модели, поэтому в данном примере они не рассматривались.

Для опции «Выбор регулятора, обеспечивающего заданное качество регулирования», выполнялись расчеты регулятора в среде электронных таблиц EXCEL на основе экспериментальных точек, снимаемых для построения кривой разгона. Результаты расчетов постоянной времени объекта и времени запаздывания, а также параметров для определения динамических коэффициентов, показали, что  $\tau_{\text{об}} = 0,1$  с,  $T_{\text{об}} = 0,8$  с,  $k_{\text{р}} = 11,138$ . Расчет оптимальных настроек регулятора показал, что заданное качество регулирования обеспечивается применением простого П-регулятора или ПИ-регулятора.

Для опции «Синтез оптимального управления с учетом неопределенности» аналитическое выражение для оптимального управления может иметь вид [20]:

$$u_{\text{опт}} = u_0 \operatorname{sgn} \left[ \frac{1}{2u_0} (x_1 - q)^2 \operatorname{sgn}(q - x_1) - x_2 \right], \quad (1)$$

где  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $q$  — входные переменные, выбор которых определяется с учетом специфики задачи. Например, для оптимизации управления уровнем смеси или жидких добавок,  $x_1 = \Delta Q_1$  — изменение расхода смеси (жидкого),  $x_2 = F \Delta h$  — изменение объема смеси (жидкого) в бункере при увеличении расхода  $Q_2$ ,  $q = \Delta Q_2$  — изменение расхода смеси (жидкого) при выдаче её из бункера потребителю,  $u = kU$  — управление, пропорциональное напряжению, приложенному к электродвигателю, играющего роль исполнительного механизма.

### 6. Обсуждение результатов исследования схемы системы управления смесеприготовительным оборудованием

Таким образом, можно говорить о том, что предложенные решения по адаптации систем, подобных по структуре к системам QualiMaster AT1/SandReport/SandExpert, к реальным условиям украинских литейных цехов, будут эффективными благодаря гибкости. Под гибкостью, при этом, понимается возможность использования широкого класса математических моделей типа «состав смесей — свойства смесей» в виде уравнений регрессии, разрабатываемых украинскими учеными; возможность инженерного подбора регуляторов, обеспечивающих заданное качество регулирования; возможность использования оптимальных законов управления на основе типизации математического описания систем смесеприготовления. Реализация этих мероприятий даст возможность повышения качества смеси и качества рабочей поверхности отливок из износостойкого чугуна.

### 7. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Показано, что использование современных компьютерно-интегрированных систем смесеприготовления импортного производства предполагает возможность дополнения ее моделями и алгоритмами украинских разработок в области синтеза формовочных смесей и оптимального управления процессам смесеприготовительных отделений. Предложенные опции, которые могут дополнять систему QualiMaster AT1/SandReport/SandExpert, являются вариантом ее адаптации к условиям литейных цехов украинских предприятий. Данные опции основаны на математических моделях «состав смесей — свойства смесей» в виде уравнений регрессии и алгоритмах оптимального управления процессам смесеприготовительных отделений.

2. В частности, показано, что существует возможность инженерного подбора регуляторов, обеспечивающих заданное качество регулирования, а также использование оптимальных законов управления на основе типизации математического описания систем смесеприготовления.

Применение данных решений обеспечивает возможность повышения эксплуатационных характеристик, в частности долговечности отливок из износостойкого чугуна, работающих в условиях интенсивного абразивного трения. При этом, основным фактором, влияющим на повышение долговечности, является высокое (без

поверхностных дефектов) качество рабочей поверхности отливок, формируемой на границе раздела «поверхность отливки — формовочная смесь».

### Литература

1. Костик, К. О. Розробка швидкісної технології буровання легваної сталі [Текст] / К. О. Костик // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2015. — № 6/11(78). — С. 8–15. doi:10.15587/1729-4061.2015.55015
2. Костик, К. О. Порівняльний аналіз впливу газового та іонно-плазмового азотування на зміну структури і властивостей легваної сталі 30X3BA [Текст] / К. О. Костик, В. О. Костик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. — 2014. — № 48. — С. 21–41.
3. Yaer, X. Erosive wear characteristics of spheroidal carbides cast iron [Text] / X. Yaer, K. Shimizu, H. Matsumoto, T. Kit-sudo, T. Momono // Wear. — 2008. — Vol. 264, № 11–12. — P. 947–957. doi:10.1016/j.wear.2007.07.002
4. Wei, M. Selection of Heat Treatment Process and Wear Mechanism of High Wear Resistant Cast Hot-Forging Die Steel [Text] / M. Wei, S. Wang, L. Wang, X. Cui, K. Chen // Journal of Iron and Steel Research, International. — 2012. — Vol. 19, № 5. — P. 50–57. doi:10.1016/s1006-706x(12)60099-5
5. Milosan, I. The Manufacturing of a Special Wear-resistant Cast Iron Used in Automotive Industry [Text] / I. Milosan // Procedia – Social and Behavioral Sciences. — 2014. — Vol. 109. — P. 610–613. doi:10.1016/j.sbspro.2013.12.515
6. Костик, К. О. Зміцнення прес-форм лиття під тиском на нанотехнології [Текст] / К. О. Костик // Машинобудування. — 2013. — № 12. — С. 113–118.
7. Емелюшин, А. Н. Влияние титана и бора на износостойкость чугуна предназначенного для механической обработки неметаллических материалов инструмента из хромистых чугунов [Текст] / А. Н. Емелюшин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2000. — № 2. — С. 28–29.
8. Васенко, Ю. А. Моделирование износостойкости чугуна, легированного титаном, по данным пассивного эксперимента [Текст] / Ю. А. Васенко // Технологический аудит и резервы производства. — 2011. — № 2/2(2). — С. 3–8. — Режим доступа: \www/URL: http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4858
9. Васенко, Ю. А. Совершенствование технологии получения износостойкого чугуна [Текст] / Ю. А. Васенко // Технологический аудит и резервы производства. — 2012. — № 1/1(3). — С. 17–21. — Режим доступа: \www/URL: http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4870
10. Демин, Д. А. Применение искусственной ортогонализации в поиске оптимального управления технологическими процессами в условиях неопределенности [Текст] / Д. А. Демин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2013. — № 5/9(65). — С. 45–53. — Режим доступа: \www/URL: http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18452
11. Демин, Д. А. Нечеткая кластеризация в задаче построения моделей «состав — свойство» по данным пассивного эксперимента в условиях неопределенности [Текст] / Д. А. Демин // Проблемы машиностроения. — 2013. — № 6. — С. 15–23.
12. An, W. Optimization of composition of as-cast chromium white cast iron based on wear-resistant performance [Text] / W. An, A. Cai, Y. Luo, H. Chen, W. Liu, T. Li, M. Chen // Materials & Design. — 2009. — Vol. 30, № 7. — P. 2339–2344. doi:10.1016/j.matdes.2008.11.003
13. Bedolla-Jacuinde, A. Abrasive wear of V-Nb-Ti alloyed high-chromium white irons [Text] / A. Bedolla-Jacuinde, F. V. Guerra, I. Mejia, J. Zuno-Silva, M. Rainforth // Wear. — 2015. — Vol. 332–333. — P. 1006–1011. doi:10.1016/j.wear.2015.01.049
14. Пономаренко, О. И. Влияние жидких отвердителей с разными добавками на свойства жидкостекольных смесей [Текст] / О. И. Пономаренко, Н. С. Евтушенко, Т. В. Берлизова // Литейное производство. — № 4. — 2011. — С. 21–24.
15. Евтушенко, Н. С. Исследование свойств регенируемых смесей на основе ОФОС [Текст] / Н. С. Евтушенко, О. И. Шинский, О. И. Пономаренко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2013. — № 4. — С. 48–51.
16. Берлизова, Т. В. Влияние фурфурилоксипропилциклокарбонатов (ФОПЦК) с различными добавками на свойства холодно-твердеющих смесей на жидком стекле [Текст] / Т. В. Берлизова, О. И. Пономаренко, А. М. Каратеев, Д. А. Литвинов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2013. — № 3. — С. 26–29.
17. Оборудование для смешивания, Техника гранулирования, Сушильная техника, Оборудование для тонкого помола [Электронный ресурс] // EIRICH. — Режим доступа: \www/URL: http://www.eirich.ru
18. Демин, Д. А. Методология формирования функционала для задачи оптимального управления электроплавкой [Текст] / Д. А. Демин // Технологический аудит и резервы производства. — 2011. — № 1/1(1). — С. 15–24. — Режим доступа: \www/URL: http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4082
19. Demin, D. A. Synthesis of optimal temperature regulator of electroarc holding furnace bath [Text] / D. A. Demin // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. — 2012. № 6. — P. 52–58.
20. Демин, Д. А. Типизация математического описания в задачах синтеза оптимального регулятора технологических параметров литейного производства [Текст] / Д. А. Демин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2014. — № 1/4(67). — С. 43–56. doi:10.15587/1729-4061.2014.21203

### ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ АДАПТАЦІЇ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ ПРИГОТУВАННЯ СУМІШЕЙ ДО УМОВ ЛИВАРНИХ ЦЕХІВ УКРАЇНСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВ, ЩО ВИРОБЛЯЮТЬ ЗНОСОСТІЙКІ ЧАВУНИ

Показано, що використання сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем приготування сумішей імпортного виробництва є ефективним, якщо є можливість доповнення її моделями і алгоритмами українських розробок в області синтезу формувальних сумішей і оптимального управління процесам сумішо-приготуванняльних відділень. Показано, що забезпечення заданої якості суміші є важливим фактором, що визначає експлуатаційні зносостійкі властивості чавунних виливків спеціального призначення.

**Ключові слова:** формувальна суміш, комп'ютерно-інтегрована технологія, виготовлення сумішей відділення, синтез регулятора.

*Дымко Егор Павлович, заместитель начальника эксплуатационно-технического отдела, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина, e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.*

*Висоцький Святослав Викторович, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина.*

*Красноухова Анастасия Александровна, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина.*

*Николаева Юлия Евгеньевна, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина.*

*Дымко Егор Павлович, заступник начальника експлуатаційно-технічного відділу, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.*

*Висоцький Святослав Вікторович, кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.*

*Красноухова Анастасія Олександрівна, кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.*

*Николаева Юлия Евгеньевна, кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.*

*Dymko Iegor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.*

*Vysotskyi Sviatoslav, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine.*

*Krasnoukhova Anastasiia, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine.*

*Nikolaieva Yuliia, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine*