

УДК 621.74

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69836

ПРИМЕНЕНИЕ ЖИДКОСТЕКЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С ПОНИЖЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЖИДКОГО СТЕКЛА КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОТЛИВОК МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© П. С. Зинченко, М. П. Аксененко, А. В. Йовбак, Ю. В. Орендарчук

Исследованы возможности замены формовочных смесей с традиционным количеством жидкого стекла в качестве связующего смесями с пониженным содержанием жидкого стекла. Проанализированы возможные варианты рецептур и выполнено моделирование физико-механических свойств смесей. На примере оптимизации состава смеси с жидким стеклом и высокоэффективным отвердителем показано, что оптимальные составы формовочных смесей могут быть найдены с применением гребневого анализа математических моделей «состав смеси – свойства»

Ключевые слова: жидкое стекло, формовочная смесь, компьютерно-интегрированная технология, гребневой анализ

Possibilities of substitution of molding sand with conventional amounts of liquid glass as binder by mixtures with a low content of liquid glass are studied. The possible variants of formulations are analyzed and physical and mechanical properties of mixtures are simulated. In the example of optimization of mixture composition of liquid glass with a high-performance hardener it is shown that the optimum composition of molding sand can be found using a ridge analysis of mathematical models "composition – properties"

Keywords: liquid glass, molding sand, computer-integrated technology, ridge analysis

1. Введение

Стратегия борьбы за качество литья в условиях современных литейных цехов предприятий Украины предполагает повсеместное внедрение компьютерно-интегрированных технологий. Это значит, что использование специализированных программных продуктов, позволяющих моделировать литейные процессы и просчитывать напряженное состояние литых деталей на этапе проектирования, является приоритетом в конструкторско-технологической подготовке производства. Накопленный опыт в вопросах моделирования литейных процессов для разной номенклатуры деталей [1–3] позволяет говорить об эффективности таких методов подготовки литейного производства, ведь получаемый результат обеспечивает снижение времени на освоение новых видов отливок и позволяет учесть возможные проблемы на этапе технологии их изготовления. Все это дает возможность говорить об актуальности исследований данного направления.

2. Анализ литературных данных

Работы, посвященные применению компьютерно-интегрированных технологий, как правило, различаются по двум ключевым направлениям. Первое из них связано с моделированием процессов заполнения форм расплавов и его кристаллизации [4–6],

второе – с прочностными расчетами и связанными с ними исследованиями влияния предшествующих технологических операций на формирование внутреннего качества отливок [7, 8]. Очевидно, что комплексный подход к решению задач повышения качества отливок должен базироваться, с одной стороны, на исследовании всей технологической цепочки – с целью предотвращения вероятных проблем на этапе изготовления, а с другой – на возможности устранения проблем после изготовления отливок на основе анализа полученного непосредственно в цехе результата. В последнем случае обязателен учет опыта экспертов, не задействованных непосредственно в процессе компьютерного моделирования, но обеспечивающий возможность корректировки результатов моделирования на всех технологических этапах изготовления отливки – от плавки и формообразования, до термической обработки [9, 10]. Однако если посмотреть внимательно на характер указанных публикаций, посвященных компьютерно-интегрированному проектированию литейной формы, становится очевидным, что не все важные вопросы этой подготовки рассматриваются в необходимой степени. Например, вопрос выбора формовочных смесей под конкретную технологию. И если тенденциями последних 10 лет являются рекомендации по использованию холоднотвердеющих смесей (ХТС) и выбору

их компонентов и технологий изготовления [11, 12], то необходимо также рассматривать возможности использования соответствующего оборудования и необходимость проведения технического перевооружения цеха [13]. Однако что делать в том случае, если предприятие не имеет возможности тратить большие средства на проведение модернизации? Нужно исходить из своих возможностей, пытаться найти внутренние ресурсы. Такие ресурсы, применительно к формовочным участкам литейных цехов, как правило, находятся за счет совершенствования технологических процессов изготовления смесей или оптимизации их рецептуры [14, 15]. Поэтому представляет практический интерес задача подбора состава смесей, обеспечивающих предприятию возможность без дополнительных затрат повысить качество отливок собственного производства. Речь в основном должна идти о применении смесей с использованием в качестве связующего жидкого стекла, т. к., во-первых, большая часть оборудования в эксплуатируемых цехах Украины ориентирована именно на такие смеси, а, во-вторых, использование жидкого стекла как связующего добавляет проблему выбиваемости.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является нахождение оптимального состава формовочной смеси на основе связующего жидкого стекла, обеспечивающего максимум прочности на сжатие.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- проведение лабораторных исследований свойств смесей;
- моделирование прочности смеси с низким содержанием жидкого стекла.

4. Методика исследования свойств формовочной смеси

В лабораторных исследованиях содержание жидкого стекла старались держать на нижнем пределе, поэтому для сохранения технологических свойств смеси предварительно обрабатывали кварцевый песок смеси раствором едкого натра. Едкий натр при этом, частично растворяя мелкодисперсные частицы песка, образовывал как бы дополнительное количество связующего. Использовали 40–45 %-ный раствор едкого натра, т. к. его плотность, составляющая 1,43–1,48 г/см³, примерно соответствует плотности обычного применяемого жидкого стекла. Количество вводимого в песок водного раствора едкого натра составляло 1,5–2 %. Перемешивание песка с раствором едкого натра осуществляли в смешивающих бегунах, из обработанных едким натром песков готовились смеси с различным содержанием жидкого стекла. Исследуемое жидкое стекло имело плотность 1,48–1,50 г/см³ и модуль 2,6–3.

5. Результаты исследования состава смесей и обсуждение их влияния на свойства

Было установлено, что чем ниже модуль стекла, применяемого при изготовлении смеси, тем меньшее количество едкого натра требуется для об-

работки песка. При этом аппроксимация данных эксперимента методом наименьших квадратов позволила установить линейный характер данной зависимости: $KEN=92,667+25M$ со степенью достоверности аппроксимации $R^2=0,7948$. Здесь KEN – количество едкого натра в частях на 1 кг жидкого стекла, M – модуль жидкого стекла, выбранный из диапазона (2,41–2,7).

Наиболее благоприятные результаты получались тогда, когда «модульность смеси находилась в диапазоне 1,4–1,5. Они достигались в тех случаях, когда песок предварительно обрабатывался 1,1–1,3 % раствора едкого натра 40–45 %-ной концентрации. В смесь при этом вводилось 3–4 % жидкого стекла с модулем 2,5–2,7. Такие технологические параметры обеспечивали «низкомодульность» смеси с длительной живучестью (24 ч) и, как следствие, хорошую формуемость. Прочность на сжатие по сырому составу составила 0,15–0,20 кг/см². Соответствующее содержание компонентов в составе смеси, по весу: песок – 91 %, глина огнеупорная 3 %, едкий натр 40 %-ной концентрации – 1 %, жидкое стекло с модулем $M=2,4–3,0–4$ %, вода – 1 %. Дальнейшее уменьшение количества жидкого стекла с целью повышения выбиваемости смеси и сохранением заданного уровня прочности на сжатие, как отмечено, например, в работе [15] возможно с использованием высокоэффективных отвердителей жидкого стекла, одним из которых является пропиленкарбонат. В этом случае необходимо решение задачи оптимизации состава смеси на основе использования двух альтернативных методик исследования: применения методов планирования эксперимента с последующей реализацией ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП) [15] или искусственной ортогонализации [16, 17]. В первом случае предполагается наличие возможности активно вмешиваться в лабораторный процесс с точным выбором и контролем входных переменных. Второй случай применяется в условиях, когда есть возможность использовать для построения моделей «состав – свойства» только реальные доступные данные. Для исследования возможности снижения количества жидкого стекла за счет использования пропиленкарбоната выбрана математическая модель, приведенная в работе [15], и описывающего зависимость прочности смеси на сжатие от входных переменных – концентрации жидкого стекла из диапазона (масс. ч) (3–4) и пропиленкарбоната – (0,3–0,4):

$$y = 1,14 - 0,19x_1 + 0,3x_2 + 0,07x_1^2 - 0,11x_2^2 + 0,07x_1x_2, \quad (1)$$

где x_1 – содержание жидкого стекла, масс.ч, x_2 – содержание пропиленкарбоната, масс.ч.

Для нахождения оптимальных параметров используем методы гребневого анализа поверхности отклика, описанного в работе [18]. Решение оптимизационной задачи в параметрическом виде при этом выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} x^*(\lambda) = (\lambda I - A)^{-1} a, \\ r(\lambda) = \sqrt{x^* x^*}, \\ y^*(\lambda) = a_0 + 2a' x^* + x^* A x^*, \end{cases} \quad (2)$$

где $a_0=1,14$, $a = \begin{pmatrix} -0,095 \\ 0,15 \end{pmatrix}$, $A = \begin{pmatrix} 0,07 & 0 \\ 0 & -0,11 \end{pmatrix}$ –

коэффициенты модели (1) в каноническом виде описания поверхности отклика, λ – собственные числа матрицы A , $x^*(\lambda)$ – оптимальные значения входных переменных, $r(\lambda)$ – радиус-вектор, описывающий положение оптимальной точки с координатами (x_1^*, x_2^*) в факторном пространстве, $y^*(\lambda)$ – оптимальные значения выходной переменной (прочность формовочной смеси на сжатие, МПа).

Преобразование модели (1) в соответствии с параметрическим описанием (2) приводит к оптимальным значениям входных переменных:

$$x^* = \begin{pmatrix} \frac{-0,095}{\lambda - 0,07} \\ \frac{0,15}{\lambda + 0,11} \end{pmatrix}.$$

Радиус-вектор, описывающий положение этой точки в факторном пространстве, имеет вид:

$$r^2(\lambda) = \left(\frac{-0,095}{\lambda - 0,07} \right)^2 + \left(\frac{0,15}{\lambda + 0,11} \right)^2.$$

Оптимальные значения выходной переменной имеют вид:

$$y^*(\lambda) = 1,14 + \frac{0,01805}{\lambda - 0,07} + \frac{0,045}{\lambda + 0,11} + \frac{0,00063}{(\lambda - 0,07)^2} - \frac{0,00248}{(\lambda + 0,11)^2}.$$

Решение уравнения $|A - \lambda I = 0|$ дает два значения собственных чисел λ из диапазона $-\infty < \lambda < +\infty$, обеспечивающие оптимальные значения выходной переменной. Эти значения соответствуют: $\lambda_1=0,07$, $\lambda_2=-0,11$ и являются полюсами функций $r(\lambda)$. Исследование характера функции $y^*(\lambda)$ в диапазонах $]-\infty < \lambda < -0,11[$, $]-0,11 < \lambda < 0,07[$, $]0,07 < \lambda < +\infty[$ дает возможность найти оптимальные значения выходной переменной и обеспечивающие ее значения входных переменных на границе рассмотренной области планирования. Данные значения являются субоптимальными и обеспечивают возможность получения высоких показателей прочности на сжатие формовочной смеси при минимальном количестве жидкого стекла.

6. Выводы

Как видно из результатов лабораторных исследований рецептур и свойств формовочных смесей с жидким стеклом в качестве связующего, предварительная обработка песков едким натром обеспечивает возможность снижения количества жидкого стекла без ухудшения рассматриваемых свойств, в частности прочности на сжатие по сырому. Дальнейшим ресурсом повышения выбиваемости смесей является использование высокоэффективных отвердителей жидкого стекла. Оптимальное содержание компонен-

тов такой смеси, в частности жидкого стекла и отвердителей, может быть получено путем анализа математических моделей типа «состав – свойства», получаемых либо методами планирования эксперимента, либо методами искусственной ортогонализации. На примере использования в качестве отвердителя пропиленкарбоната показан способ получения оптимального решения по снижению количества жидкого стекла в смеси при сохранении приемлемой прочности по сырому с использованием гребневого анализа.

Литература

1. Алёхин, В. И. Моделирование литейных процессов при изготовлении автомобильных поршней [Текст] / В. И. Алёхин, А. В. Белогуб, А. П. Марченко, О. В. Акимов // Цветные металлы. – Москва, 2010. – № 8. – С. 81–83.
2. Алёхин, В. И. Компьютерно-интегрированное моделирование литейных процессов в автомобильных поршнях на основе конструкторско-технологической методики проектирования деталей ДВС [Текст] / В. И. Алёхин, А. В. Белогуб, А. П. Марченко, О. В. Акимов // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – № 2. – С. 101–104.
3. Акимов, О. В. Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование материалов для блок-картера ДВС [Текст] / О. В. Акимов, А. П. Марченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2008. – Т. 5, № 1 (35). – С. 52–57. – Режим доступа: http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/Vejpt/2008_5_1/EEJE_T_5_1_2008_52-57.pdf
4. Краснокутский, Е. А. Компьютерное моделирование процессов кристаллизации литой детали в кокиле [Текст] / Е. А. Краснокутский // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – Т. 1, № 1 (3). – С. 3–8. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4867/4518>
5. Пономаренко, О. И. Компьютерное моделирование процессов кристаллизации как резерв повышения качества поршней ДВС [Текст] / О. И. Пономаренко, Н. С. Тренёв // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – Т. 6, № 2 (14). – С. 36–40. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/19529/17205>
6. Савченко, Ю. Применение компьютерно-интегрированных систем и технологий в производстве поршней [Текст] / Ю. Савченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – Т. 1, № 1 (3). – С. 8–13. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4868/4519>
7. Акимов, О. В. Анализ погрешностей формования отливок колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВС на этапе изготовления их восковых моделей [Текст] / О. В. Акимов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – № 3. – С. 16–24.
8. Акимов, О. В. Анализ собственных колебаний отливки блок-картера дизеля “СМД” [Текст] / О. В. Акимов, Ю. П. Анацкий, В. А. Солошенко // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. – № 66. – С. 40–47.
9. Хорошилов, О. Н. Исследование конструктивных характеристик срезов на дорне при производстве полых заготовок из цветных сплавов [Текст] / О. Н. Хорошилов, О. И. Пономаренко // Литье и металлургия. – 2006. – № 2. – С. 187–189.
10. Костик, К. О. Зміцнення прес-форм лиття під тиском по нанотехнології [Текст] / К. О. Костик // Машинобудування. – 2013. – № 12. – С. 113–118.
11. Евтушенко, Н. С. Исследование свойств регенерируемых смесей на основе ОФОС [Текст] / Н. С. Евтушенко, О. И. Шинский, О. И. Пономаренко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 4. – С. 48–51.

12. Берлизова, Т. В. Влияние фурфурилокси-пропилциклокарбонатов (ФОПЦК) с различными добавками на свойства холоднотвердеющих 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.

13. Дёмина, Е. Б. Выбор оптимальной стратегии технического перевооружения предприятия с металлургическим производством [Текст] / Е. Б. Дёмина // Технологический аудит и резервы производства. – 2011. – Т. 2, № 2 (2). – С. 40–52. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4866/4517>

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. – 2011. – № 4. – С. 21–24.

15. Коваленко, Б. П. Оптимизация состава холоднотвердеющих смесей (ХТС) с пропиленкарбонатом [Текст] / Б. П. Коваленко, Д. А. Дёмин, А. Б. Божко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – Т. 6, № 1 (18). – С. 59–61. – Режим доступа: http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/vejpt/2005_6_1/EEJET_6_1_2005_59-61.pdf

16. Дёмин, Д. А. Применение искусственной ортогонализации в поиске оптимального управления технологическими процессами в условиях неопределенности [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 5, № 9 (65). – С. 45–53. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18452/16199>

17. Дёмин, Д. А. Нечеткая кластеризация в задаче построения моделей «состав – свойство» по данным пассивного эксперимента в условиях неопределенности [Текст] / Д. А. Дёмин // Проблемы машиностроения. – 2013. – Т. 16, № 6. – С. 15–23.

18. Дьомін, Д. О. Деякі аспекти управління якістю чавуну з пластинчастим графітом [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Д. О. Дьомін. – Харків, 1995. – 181 с.

References

1. Aljohin, V. I., Belogub, A. V., Marchenko, A. P., Akimov, O. V. (2010). Modelirovanie litejnyh processov pri izgotovlenii avtomobil'nyh porshnej. *Cvetnye metally*. Moscow, 8, 81–83.

2. Aljohin, V. I., Belogub, A. V., Marchenko, A. P., Akimov, O. V. (2009). Komp'juterno-integrirovannoe modelirovanie litejnyh processov v avtomobil'nyh porshnjah na osnove konstruktorskogo-tehnologicheskoy metodiki proektirovaniya detalej DVS. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. Kharkov: NTU «HPI», 2, 101–104.

3. Akimov, O. V., Marchenko, A. P. (2008). Jeksperimental'nye issledovanija i komp'juternoe modelirovanie materialov dlja blok-kartera DVS. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 5/1 (35), 52–57. Available at: http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/vejpt/2008_5_1/EEJET_5_1_2008_52-57.pdf

4. Krasnokutskij, E. A. (2012). The simulation of crystallization in a metal mold cast parts. *Technology audit and produc-*

tion reserves, 1/1 (3), 3–8. Available at: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4867/4518>

5. Ponomarenko, O. I., Trenjov, N. S. (2013). Computer modeling of crystallization processes as a reserve of improving the quality of pistons of ice. *Technology audit and production reserves*, 6/2 (14), 36–40. Available at: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/19529/17205>

6. Savchenko, Ju. (2012). Use of computer-integrated systems and technology in the production of pistons. *Technology audit and production reserves*, 1/1 (3), 8–13. Available at: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4868/4519>

7. Akimov, O. V. (2003). Analiz pogreshnostej formoobrazovanija otlivok koles turbin turbokompressorov dlja nad-duva DVS na jetape izgotovlenija ih voskovyh modelej. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 3, 16–24.

8. Akimov, O. V., Anackij, Ju. P., Soloshenko, V. A. (1999). Analiz sobstvennyh kolebanij otlivki blok-kartera dizelja “SMD”. *Vestnik Har'kovskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta*. Kharkov: HGPU, 66, 40–47.

9. Horoshilov, O. N., Ponomarenko, O. I. (2006). Issledovanie konstrukcionnyh karakteristik srezov na dorne pri proizvodstve polyh zagotovok iz cvetnyh splavov. *Lit'e i metallurgija*, 2, 187–189.

10. Kostyk, K. O. (2013). Zmichennja pres-form lyttja pid tyskom po nanotehnologii. *Mashynobuduvannja*, 12, 113–118.

11. Evtushenko, N. S., Shinskij, O. I., Ponomarenko, O. I. (2013). Issledovanie svojstv regeneriruemym smesej na osnove OFOS. *Kompressornoe i jenergeticheskoe mashinostroenie*, 4, 48–51.

12. Berlizova, T. V., Ponomarenko, O. I., Karatееv, A. M., Litvinov, D. A. (2013). Vlijanie furfurioloksi-propil-ciklokarbonatov (FOPCK) s razlichnymi dobavkami na svojstva holodnotverdejušhij smesej na zhidkom stekle. *Kompressornoe i jenergeticheskoe mashinostroenie*, 3, 26–29.

13. Djomina, E. B. (2011). Optimal strategy with technical re-manufacture of basic metals. *Technology audit and production reserves*, 2/2 (2), 40–52. Available at: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4866/4517>

14. Ponomarenko, O. I., Evtushenko, N. S., Berlizova, T. V. (2011). Vlijanie zhidkih otverditelej s raznymi dobavkami na svojstva zhidkostekol'nyh smesej. *Litejnoe proizvodstvo*, 4, 21–24.

15. Kovalenko, B. P., Djomin, D. A., Bozhko, A. B. (2006). Optimizacija sostava holodnotverdejušhij smesej (HTS) s propilenkarbonatom. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 6/1 (18), 59–61. Available at: http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/vejpt/2005_6_1/EEJET_6_1_2005_59-61.pdf

16. Djomin, D. A. (2013). Artificial orthogonalization in searching of optimal control of technological processes under uncertainty conditions. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 5/9 (65), 45–53. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18452/16199>

17. Djomin, D. A. (2013). Nechetkaja klasterizacija v zadache postroenija modelej «sostav – svojstvo» po dannym passivnogo jeksperimenta v uslovijah neopredel'jonnosti. *Problemy mashinostroenija*, 16 (6), 15–23.

18. D'omin, D. O. (1995). Dejaki aspekty upravlinnja jakistju chavunu z plastynchastym grafitom. Kharkiv, 181.

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Хорошилов О. М.

Дата надходження рукопису 07.04.2016

Зинченко Павел Сергеевич, главный металлург ПАО «Свет Шахтера», ул. Свет Шахтера, 4/6, г. Харьков, Украина, 61001

Аксененко Марина Петровна, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалия, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Йовбак Алёна Владимировна, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалия, 21, г. Харьков, Украина, 61002

Орендарчук Юлия Владимировна, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалия, 21, г. Харьков, Украина, 61002