



Ю. А. Васенко*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЧУГУНА, ЛЕГИРОВАННОГО ТИТАНОМ, ПО ДАННЫМ ПАССИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В статье описаны результаты исследований влияния химического состава на свойства белого легированного чугуна. Показано, что на основании технологического аудита процесса выплавки износостойкого чугуна можно провести математическое моделирование и найти области химических составов, обеспечивающих заданный комплекс свойств. Полученные при этом результаты могут быть использованы для оптимизации шихты по критерию минимума ресурсозатрат предприятия.

Ключевые слова: ресурсозатраты предприятия, технологический аудит, химический состав.

1. Введение

Сегодня в промышленности накоплен значительный опыт применения высокохромистых, хромомарганцевых, хромоникелевых и других белых чугунов в качестве износостойких материалов для изготовления литых деталей машин и механизмов, работающих в условиях абразивного трения. Однако проблемы применения и получения таких материалов до сих пор актуальны, т. к. с каждым годом ужесточается конкуренция на рынке производителей подобной литой продукции, а затраты на ее изготовление при существующем уровне литейного производства могут быть весьма значительными. Эти затраты связаны с необходимостью применения при выплавке чугуна дорогостоящих легирующих элементов — титана, бора, вольфрама, ванадия и т. д. Поэтому для сохранения позиций производителя на рынке жизненно важным для предприятия является поиск потенциальных скрытых резервов производства, которые могут быть выявлены только путем тщательного технологического аудита и математической обработки полученных данных. Последняя предполагает возможность построения и последующего исследования математических моделей по тем промышленным данным, которые доступны для контроля, т. е. непосредственно по данным проведенного технологического аудита.

Немаловажным при решении этой задачи является предварительный ответ на вопрос о том, какие же из факторов наиболее значимы при исследовании эксплуатационных свойств чугуна.

Анализом данных эксплуатации деталей установлено, что сопротивление металла гидроабразивному и абразивному изнашиванию зависит от состояния металла — его химического состава, структуры, режимов термической обработки, которые придают ему высокую твердость и износостойкость, с одной стороны, и условий эксплуатации деталей, с другой. Износ в гидроабразивных и абразивных средах является сложной и неоднозначной функцией условий взаимодействия металла детали с абразивными частицами и средой. Он зависит от многих факторов: продолжительности эксплуатации, концентрации абразива в жидкости, размера, формы и твердости абразивных частиц, их скорости в момент удара о поверхность детали, угла атаки частицами изнашиваемой поверхности, снижения механических свойств материала вследствие разупрочняющего воздействия на него среды. Поскольку управлять перечисленными факторами в условиях производства практически невозможно, остается только одно — улучшение свойств материала, то есть его эксплуатационных характеристик.

Одним из направлений решения такой задачи может быть использование теоретических и технологических наработок управления процессами формирования структуры и свойств металла в отливках из белых чугунов определением соотношения в них основных химических элементов, комплексным их легированием, микролегированием и модифицированием, изменением условий кристаллизации металла в отливках и режимами их термической обработки [1].

* Работа выполнена под руководством профессора кафедры литейного производства Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» Дёмина Д. А.

2. Цель исследования

Целью исследования является нахождение рациональных химических составов чугуна, легированного титаном, обеспечивающих удовлетворение заданному комплексу свойств: износостойкости и высокому пределу прочности на разрыв.

3. Задачи исследования

Для достижения заданной цели были сформулированы следующие задачи:

- Построить по данным пассивного эксперимента математическую модель, описывающую влияние углеродного эквивалента и содержания титана на коэффициент износостойкости.
- Построить по данным пассивного эксперимента математическую модель, описывающую влияние углеродного эквивалента и содержания титана на предел прочности.
- Проверить точность полученных моделей и определить области существования химических составов чугуна, удовлетворяющих заданному комплексу свойств, в координатах « $C_{\text{экв}} - Ti$ ».

4. Анализ литературных источников по проблематике исследования

Область применения отливок из чугунов охватывает практически все отрасли народного хозяйства — сельское хозяйство, добычу и обогащение полезных ископаемых, металлургию, энергетику, строительную-дорожную технику, производство цемента и других строительных материалов, и т. д. Однако, как показывает опыт эксплуатации чугунных деталей машин, работающих в условиях абразивного трения, главной причиной выхода их из строя является износ. В условиях износа, не связанных с большими ударными нагрузками, хорошо зарекомендовали себя отливки из белых износостойких чугунов, которые имеют износостойкость в 5–10 раз больше, чем конструкционные стали [2]. Современные белые износостойкие чугуны — сложнелегированные многокомпонентные сплавы, разнообразные по структуре и свойствам. Они представляют собой отдельную группу промышленных сплавов, при затвердевании которых формируется карбидная фаза. Именно она определяет специфические свойства белых износостойких чугунов и, в то же время, создает значительные трудности при производстве и эксплуатации этих сплавов [3].

Для повышения эксплуатационной стойкости и долговечности агрегатов, механизмов и их узлов, работающих в условиях износа, большое значение имеет создание и внедрение новых сплавов, превосходящих по свойствам известные. Преобладающее влияние на эксплуатационную стойкость отливок

из отбеленного чугуна оказывает количество и форма карбидов, и структура продуктов превращения аустенита. Как правило, эксплуатационные свойства отливок из белого чугуна определяются их твердостью — для нелегированного отбеленного чугуна она обычно не превышает 70 ед. по Шору. Для увеличения твердости и износостойкости отбеленных чугунов применяют низкое и среднее легирование их Ni, Cr, Mn, Mo, V, B, Ti и др. Низкое и среднее легирование отбеленных чугунов приводит к уменьшению количества и размеров графитных включений, увеличению дисперсности продуктов превращения аустенита и, вследствие этого, к повышению твердости и износостойкости чугуна. Наряду с этим, увеличение содержания Cr и особенно Mn приводит к значительной трансформации структуры по сечению отливок и снижению их эксплуатационной прочности [4].

Высокохромистые чугуны, содержащие свыше 3,6 % C, для изготовления износостойких деталей применяются сравнительно редко, так как при их кристаллизации выпадают крупные легко выкрашивающиеся заэвтектические карбиды. Эти чугуны при закалке в масле дают трещины, а при охлаждении на воздухе их твердость повышается незначительно. Поэтому для повышения твердости в них приходится вводить элементы, способствующие переохлаждению аустенита (Ni, Mo и др.), например, ввод в чугун 5–20 % Mo или W меняет природу карбидов. Хромовольфрамовые, хромомолибденовые карбиды мельче и более равномерно распределены в сплаве, причем одновременно меняется и структура металлической основы. Более значительное влияние на основу оказывает молибден. Так, при содержании 5 % Mo структура матрицы аустенитно-сорбитная, а при 10–20 % Mo она становится аустенитно-мартенситной; твердость соответственно повышается с HRC 59–61 до HRC 62–65 при 10 % Mo и до 64–66 при 20 % Mo. Вольфрам оказывает менее эффективное влияние. Сплавы с 10 % W имеют сорбитную металлическую матрицу и твердость в литом состоянии HRC 58–60. При 20 % W твердость литых сплавов составляет HRC 62–65. Ванадий является сильным карбидообразующим и раскисляющим элементом. Его введение в чугун повышает плотность отливок и измельчает карбиды. Анализ микроструктуры ванадиевых чугунов показал, что карбиды ванадия не препятствуют росту карбидов тригонального типа. Титан является очень сильным карбидообразующим и раскисляющим элементом, он способствует размельчению карбидной фазы уже при содержании 0,2 % Ti. Карбиды титана присутствуют в металлической матрице и эффективно противодействуют развитию кристаллов карбида хрома. Карбиды титана распределены в матрице, в карбидах хрома они практически не содержатся. Титансодержа-

Таблица 1

Экспериментальные данные

Тип белого чугуна	Химический состав в %				Механические свойства σ_B , кг/мм ²	Коэффициент износостойкости, $K_{и}$, %
	C	Si	Mn	Ti		
Нелегированный	2,17	1,27	0,89	—	41,7	3,38
	2,68	1,3	0,96	—	27,5	5
	3,3	1,28	1,07	—	28	4,05
Легированный титаном	2,25	1,31	0,95	0,32	45,2	6,2
	2,37	1,4	0,99	0,63	44,4	11,54
	2,26	1,03	1,01	0,94	38,8	9,57
	2,21	1,53	0,95	1,69	30	9,44
	2,4	1,16	1,14	2,1	31,1	10,8
	2,68	1,08	0,6	0,37	28,4	8,19
	2,69	0,93	1,07	0,75	27,4	9,7
	2,53	1,5	1,02	1,26	36,2	12,27
	2,73	1,1	1,21	2,94	27,9	9,7
	3,13	1,6	0,78	0,28	20,1	8,26
	3,34	1,4	1,1	0,73	24,5	11,07
	3,24	1,4	0,98	1,54	33,9	9,19
3,34	1,72	0,98	2,5	17,8	8,07	

щие чугуны имеют повышенную окисляемость и требуют особых мер для получения здоровых отливок [5].

Титан обладает большим сродством к углероду, чем хром, и при кристаллизации чугуна образует дисперсные карбиды, которые, являясь центрами зарождения, способствуют измельчению структурных составляющих чугуна, что благоприятно сказывается на износостойкости. При этом карбиды титана находятся в виде изолированных включений, устойчивы, обладают высокой твердостью (30...32 ГПа), что также приводит к увеличению износостойкости и твердости чугуна. Кроме того, повышению износостойкости, твердости и жаростойкости может способствовать то, что образование специальных карбидов титана приводит к увеличению концентрации хрома в твердом растворе. Для получения мелкозернистого строения, повышения механических свойств и износостойкости белых чугунов титан обычно используют в количестве 0,15...0,40 %. Введение титана в количестве меньше 0,1...0,15 % неэффективно и даже может привести к снижению износостойкости. Введение больших количеств титана (более 2,0 %) нецелесообразно из-за резкого уменьшения жидкотекучести чугуна, увеличения его газонасыщенности, снижения плотности и повышения пористости изделия. Необходимо также учитывать, что титан является достаточно дорогим материалом [6].

Таким образом, даже краткий обзор существующих результатов исследования позволяет сделать вывод о том, что эффективным для решения поставленной задачи является подбор легирующих элементов и расчет их оптимального количества. Наличие огромного экспериментально-промышленного материала за прошедшие десятилетия позволяют приблизиться к решению задачи формализации и последующего использования полученных результатов при разработке программных продуктов для литейного производства, что расширит возможности интеграции литейного производства в сферу IT-технологий и повысит конкурентоспособность отечественной литой продукции, в первую очередь за счет эффективного управления литейными процессами.

5. Используемые экспериментальные данные и методы моделирования

Технология получения математических моделей, в соответствии с поставленными задачами исследования, выполнялась по данным экспериментально-промышленных плавок, приведенным в работе [7]. Предел прочности на разрыв определялся по стандартной методике, сравнительная износостойкость материала определялась по потерям веса испытуемого и эталонного образцов из стали марки Ст5 (табл. 1).

В качестве метода моделирования использовался метод наименьших квадратов (МНК), изложенный в работе [8]. Входными переменными выбирались величина углеродного эквивалента чугуна $C_{экр} = C + 0,3Si - 0,03Mn$, % (x_1) и содержание титана Ti , % (x_2). В качестве выходных переменных — коэффициент износостойкости $K_{и}$, % (y_1) и предел прочности на растяжение (y_2). В качестве структуры модели был выбран полином $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + \dots$, где a_i — коэффициенты модели, рассчитываемые с помощью МНК. Учитывая ограниченность числа экспериментов и влияние двух факторов, было сделано предположение о линейном виде модели: $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$. Оценки коэффициентов модели рассчитывались по уравнению

$$A = (F^T F)^{-1} F^T Y. \tag{1}$$

В этом уравнении F — матрица плана эксперимента, F^T — транспонированная матрица плана эксперимента, $(F^T F)^{-1} = C$ — дисперсионная матрица, Y — матрица выходных переменных, A — матрица оценок коэффициентов. Операциям расчета оценок коэффициентов моделей предшествовали операции нормирования [9]:

$$x_1 = \frac{x_1^* - \bar{x}_1}{I_1}, \tag{2}$$

$$x_2 = \frac{x_2^* - \bar{x}_2}{I_2}, \tag{3}$$

где x_1, x_2 – нормированные значение входных переменных, x_1^*, x_2^* – натуральные значения входных переменных, \bar{x}_1, \bar{x}_2 – средние значения входных переменных ($\bar{x}_1 = 3,088\%$, $\bar{x}_2 = 0,65\%$), I_1, I_2 – интервалы варьирования входных переменных ($I_1 = 0,564\%$, $I_2 = 0,65\%$). Минимальные и максимальные значения входных переменных для моделирования выбирались на основании данных табл. 1. Таким образом, формулы, связывающие натуральные и нормированные значения входных переменных, имели вид:

$$x_1 = \frac{x_1^* - 3,088}{0,564}, \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{x_2^* - 0,65}{0,65}, \quad (5)$$

Для оценки точности полученной модели рассчитывались нижняя и верхняя допустимые границы выходных переменных:

$$y_n = y_{расч} - t_{кр} s, \quad (6)$$

$$y_v = y_{расч} + t_{кр} s, \quad (7)$$

где s – среднее квадратическое отклонение, определяемое из формулы:

$$s^2 = \frac{S_R^2}{\phi}, \quad (8)$$

где $S_R = (y_{эксп} - y_{расч})^2$ – сумма квадратов отклонений экспериментальных значений выходных переменных от расчетных, полученных по математической модели, $\phi = N - (k + 1)$ – число степеней свободы, N – число экспериментов ($N = 16$), k – число входных переменных ($k = 2$), $t_{кр}$ – критическое значение распределения Стьюдента для доверительной вероятности 95 % и числа степеней свободы $\phi = 13$.

6. Результаты моделирования и их интерпретация

Математическая модель $K_{и} = f(C_{экр}, Ti)$, полученная реализацией МНК по экспериментальным данным, приведенным в табл. 1, имеет вид:

$$y = 7,984 - 0,245x_1 + 0,996x_2. \quad (9)$$

На основании модели (9) могут быть сделаны следующие выводы: увеличение углеродного эквивалента приводит к снижению износостойкости чугуна, а увеличение содержания титана – к его увеличению; сила влияния титана на величину износостойкости примерно в 4 раза больше, чем сила влияния углеродного эквивалента, что выражается в отношении величин оценок коэффициентов при входных переменных.

Пересчет оценок коэффициентов модели из нормированных в натуральные значения выпол-

няется путем подстановки формул (4) и (5) вместо значений входных переменных в модель (9). В итоге, модель имеет вид:

$$y = 8,33 - 0,435x_1 + 1,533x_2. \quad (9)$$

Результаты точности полученной модели приведены на рис. 1.

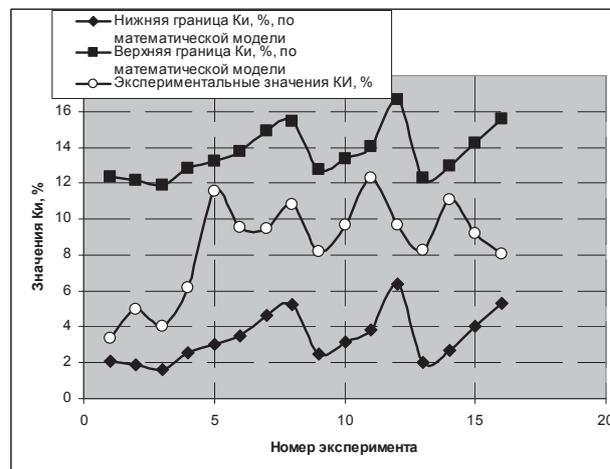


Рис. 1. Сравнительная оценка экспериментальных и расчетных значений коэффициента износостойкости чугуна, легированного титаном

Из рис. 1 следует, что полученная математическая модель достаточно точно описывает влияние исследованных факторов на износостойкость чугуна в выбранной области планирования.

Математическая модель $\sigma_B = f(C_{экр}, Ti)$, полученная реализацией МНК по экспериментальным данным, приведенным в табл. 1, имеет вид:

$$y = 31,853 - 6,791x_1 - 1,179x_2. \quad (11)$$

На основании модели (11) могут быть сделаны следующие выводы: увеличение и углеродного эквивалента, и содержания титана приводит к снижению износостойкости чугуна; сила влияния углеродного эквивалента на величину предела прочности чугуна примерно в 6 раз больше, чем сила влияния содержания титана.

Пересчет оценок коэффициентов модели из нормированных в натуральные значения приводит модель к виду:

$$y = 70,216 - 12,041x_1 - 1,815x_2. \quad (12)$$

Результаты точности полученной модели приведены на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что полученная математическая модель достаточно точно описывает влияние исследованных факторов на предел прочности чугуна в выбранной области планирования.

Таким образом, математические модели (11) и (12) могут быть использованы для синтеза химического состава чугуна, обеспечивающего заданные показатели, как износостойкости, так и предела

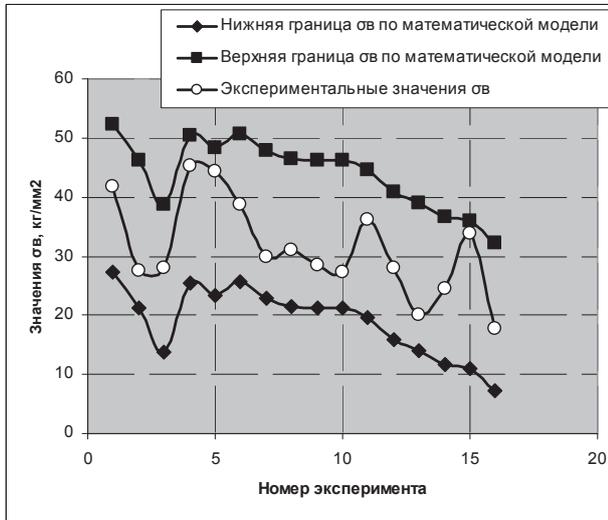


Рис. 2. Сравнительная оценка экспериментальных и расчетных значений предела прочности на растяжение чугуна, легированного титаном

прочности. Для этого последовательно фиксируется значение одного из факторов в рассмотренном диапазоне нормированных значений (-1; +1) и строится зависимость обоих выходных переменных от второго фактора. Затем выбирается заданное значение выходных переменных и с полученных графиков снимаются соответствующие значения второй входной переменной. Сопоставление значений первой и второй входных переменных при заданном значении выходных переменных позволяет получить множество точек в координатах « $x_1 - x_2$ ». Пример такого представления для двух фиксированных значений $K_{и}$ и $\sigma_{в}$ приведен на рис. 3.

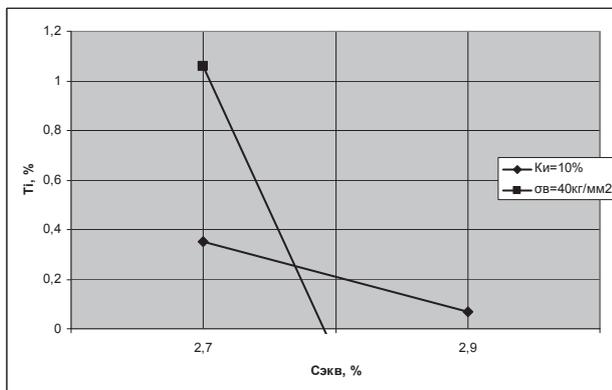


Рис. 3. График зависимостей между входными переменными, обеспечивающими одновременное удовлетворение требованиям к выходным переменным

Полученный график может быть использован для выбора допустимой области химических составов чугуна и для решения в дальнейшем задачи оптимизации подбора шихты по критерию минимума ресурсозатрат с помощью методов линейного программирования.

7. Выводы

1. Увеличение углеродного эквивалента приводит к снижению износостойкости чугуна, а увеличение содержания титана — к его увеличению; сила влияния титана на величину износостойкости примерно в 4 раза больше, чем сила влияния углеродного эквивалента.
2. Увеличение и углеродного эквивалента, и содержания титана приводит к снижению износостойкости чугуна; сила влияния углеродного эквивалента на величину предела прочности чугуна примерно в 6 раз больше, чем сила влияния содержания титана.
3. Полученные математические модели могут быть использованы для синтеза химического состава чугуна и определения областей существования химических составов чугуна, удовлетворяющих заданному комплексу свойств.

Литература

1. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства [Текст] / И. И. Цыпин. — М. : Металлургия, 1983.
2. Гарбер М. Е. Отливки из белых износостойких чугунов [Текст] / М. Е. Гарбер. — М. : Машиностроение, 1972.
3. Войнов Б. А. Износостойкие сплавы и покрытия [Текст] / Б. А. Войнов. — М. : Машиностроение, 1980.
4. Кривошеев А. Е. Высокотвердый износостойкий отбеленный легированный чугун [Текст] / А. Е. Кривошеев, Н. П. Котешов // Литейное производство. — 1967. — № 9.
5. Китайгора Н. И. Стойкость высокохромистых чугунов в условиях ударно-абразивного износа [Текст] / Н. И. Китайгора // Литейное производство. — 1972. — № 2.
6. 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.
7. Конторов Б. М. Износостойкие белые чугуны, легированы бором и титаном [Текст] / Б. М. Конторов, Н. М. Кунин // Литейное производство. — 1960. — № 4.
8. Дёмин Д. А. Обработка экспериментальных данных и построение математической модели технологического процесса методом наименьших квадратов (МНК) [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — X. : Технологический Центр. — 2005. — № 4. — С. 48–58.

9. Дёмин Д. А. Оптимизация технологического процесса в цехе предприятия [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — Х. : Технологический Центр. — 2005. — № 6. — С. 48–59.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЛЕГОВАНОГО ТИТАНОМ ЧАВУНУ ЗА ДАНИМИ ПАСИВНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Ю. О. Васенко

У статті описані результати досліджень впливу хімічного складу на властивості білого легованого чавуну. Показано, що на підставі технологічного аудиту процесу виплавки зносостійкого чавуну можна провести математичне моделювання та знайти області хімічних складів, які забезпечують заданий комплекс властивостей. Отримані при цьому результати можуть бути використані для оптимізації шихти за критерієм мінімуму ресурсовитрат підприємства.

Ключові слова: ресурсовитрати підприємства, технологічний аудит, хімічний склад.

Юрій Олексійович Васенко, магістрант кафедри ливарного виробництва Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

WEAR RESISTANCE OF TITANIUM DOPED SIMULATION OF IRON ON THE DATA PASSIVE EXPERIMENT

Y. Vasenko

The article describes the results of studies on the effect of chemical composition on the properties of white cast iron doped. It is shown that on the basis of technological audit of the process of smelting iron can wear to mathematical modeling, and find the area of chemical compounds that provide a specified set of properties. The results obtained can be used to optimize the charge on the criterion of minimum resource consumption of the enterprise.

Keywords: resource consumption enterprises, technology audit, the chemical composition.

Yuriy Vasenko, student of foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

Адрес для переписки:

61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21
 Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»
 Кафедра «Литейное производство»
 E-mail: nauka@jet.com.ua

УДК 621.74

Л. В. Фролова*

ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЗЕРВОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО АУДИТА РАБОТЫ ФОРМОВОЧНЫХ ВСТРЯХИВАЮЩИХ МАШИН

В статье описан процесс моделирования влияния режимов уплотнения формовочных смесей на эффективность процесса уплотнения, выполненного по данным технологического аудита работы встряхивающей машины. Показано, что применение полученных результатов моделирования позволяет выявить резервы энергосбережения в технологическом процессе.

Ключевые слова: технологический аудит, режимы уплотнения, резервы энергосбережения, встряхивающая машина.

1. Введение

Встряхивающие формовочные машины до недавнего времени были наиболее распространенным видом оборудования для уплотнения песчано-глинис-

тых форм. Процесс уплотнения встряхиванием — наиболее распространенный, широкоуниверсальный, достаточно простой и надежный способ формовки, в наибольшей степени приближающийся к технологическим требованиям по распределению

* Работа выполнена под руководством профессора кафедры литейного производства Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» Дёмина Д. А.