
ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАНИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 669.15.26.74-196

О. В. Соценко, И. Ю. Посыпайко

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

ОПТИМАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЬЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ НАКЛАДОК НА ШНЕКИ СМЕСИТЕЛЕЙ

Методом компьютерного моделирования выполнена оптимизация технологического процесса литья износостойких накладных элементов на лопасти шнеков промышленных смесителей. Установлено оптимальное сочетание основных технологических параметров, обеспечивающих минимизацию количества усадочных дефектов в отливках.

Ключевые слова: компьютерная модель, оптимизация, технологический процесс, отливка, усадочные дефекты.

Методом комп'ютерного моделювання виконана оптимізація технологічного процесу лиття зносостійких накладних елементів на лопасті шнеків промислових змішувачів. Встановлено оптимальне поєднання основних технологічних параметрів, що забезпечують мінімізацію кількості усадкових дефектів у виливках.

Ключові слова: комп'ютерна модель, оптимізація, технологічний процес, виливок, усадкові дефекти.

Computer simulation the optimization process casting wear worn elements on the blade of industrial mixers. The optimal combination of the main technological parameters which provides a minimum amount of shrinkage defects in castings.

Keywords: computer model, optimization, process, casting, shrinkage defects.

Постановка проблемы и состояние вопроса. Для многих предприятий проблемы повышения долговечности лопастей и шнеков промышленных смесителей, работающих в условиях абразивного износа, и, соответственно, увеличения межремонтных сроков оборудования по-прежнему остаются актуальными. Абразивостойкость изделий увеличивают за счет электродной наплавки, плазменного или газотермического напыления износостойкого материала на поверхность деталей, поверхностного легирования отливок, управления их структурой путем разработки и оптимизации химического состава износостойких чугунов и сталей [1-10].

Анализ состояния бывших в эксплуатации лопастей промышленного смесителя, применяемого для смешивания мелких отходов металлургического производства с цементом и их последующего брикетирования [11], показал, что среди основных изменений исходной формы лопастей выделяются: укорачивание рабочей части,

образование площадок износа на входной кромке, уменьшение толщины лопастей, увеличение углов заострения. В результате изменение формы лопастей в процессе их эксплуатации приводит к постепенному снижению качества перемешивания, прочности производимых брикетов и уменьшению производительности оборудования. Длительность эксплуатации лопастей в составе смесительного оборудования не превышает 70 ч.

Одним из направлений защиты лопастей от износа является использование накладок, выполненных из абразивостойких сплавов, в частности, отбеленного чугуна. Области наибольшего износа лопастей шнека защищают износостойкими накладками, которые крепятся к лопасти болтами, что позволяет сократить время на ремонтно-восстановительные работы. В накладках на лопасти и шнеки смесителей не должно быть значительных усадочных дефектов – наружных и внутренних раковин, а также рыхлот в области их интенсивного износа.

Разработка технологии литья деталей типа накладок на лопасти и шнеки в основном основывается на опыте инженера-технолога – разработчика технологии. Однако, в технологии изготовления отливок в процессе ее освоения в производственных условиях независимо от уровня квалификации разработчика часто приходится вносить уточнения или дополнения. Обычно технология изготовления отливки корректируется путем изменения положения отливки в форме, доработки конструкции, пересчета размеров литниковопитающей системы и (или) ее отдельных элементов, назначения других мест подвода расплава в рабочую полость формы, использования новой формовочной смеси и т. д. Изменения, внесенные в технологию изготовления отливок, неизбежно связаны со значительными материальными и временными затратами и не всегда бывают успешными. В таких ситуациях существенную помощь оказывают результаты компьютерного моделирования процесса затвердевания отливок и образования в них усадочных дефектов.

В последние годы для разработки эффективных износостойких сплавов и получения из них бездефектных деталей применяют компьютерное моделирование процессов формирования отливок, а также современные методы планирования модельных экспериментов для оптимизации этих процессов.

Постановка задачи исследования. Задача исследований – оптимизация технологии литья накладок из износостойкого чугуна на лопасти смесителя по критерию минимального количества прогнозируемых усадочных дефектов (раковин и рыхлот) посредством реализации полного факторного эксперимента на основе результатов компьютерного моделирования процесса затвердевания отливки.

Основные результаты исследований. В данной работе в качестве объекта оптимизации была принята технология изготовления отливок «Накладка», назначение которой – защита лопастей шнеков в составе смесительного и прессового оборудования. Объект исследования – отливка «Накладка» (рис. 1, а) массой 2,07 кг и габаритными размерами 122x158,2x41,6 мм при средней толщине стенки 15 мм. Материал накладки – чугун марки ИЧХ28Н2.

Компьютерное моделирование технологического процесса литья данного изделия проводили с использованием комплекса программных пакетов SolidWorks – LVMFlow (V. 3) [12, 13]. Для оптимизации процесса изготовления отливки использовали компьютерную программу STATGRAPHICS Plus 5.1 [14], в которой реализован полный факторный эксперимент (ПФЭ 2^4) на двух уровнях изменения переменных [15]. Площадь усадочных дефектов в трех сечениях модели отливки для каждого варианта технологического решения (ТР) определяли в программе ImageJ [16].

Выбрали 4 варьируемых фактора, которые предположительно в разной степени влияют на формирование отливки в литейной форме. Оптимизируемыми параметрами являлись: температура заливки металла (t_3), толщина и материал холодильника, положение отливки и холодильника в литейной форме (рис. 1, в, г).

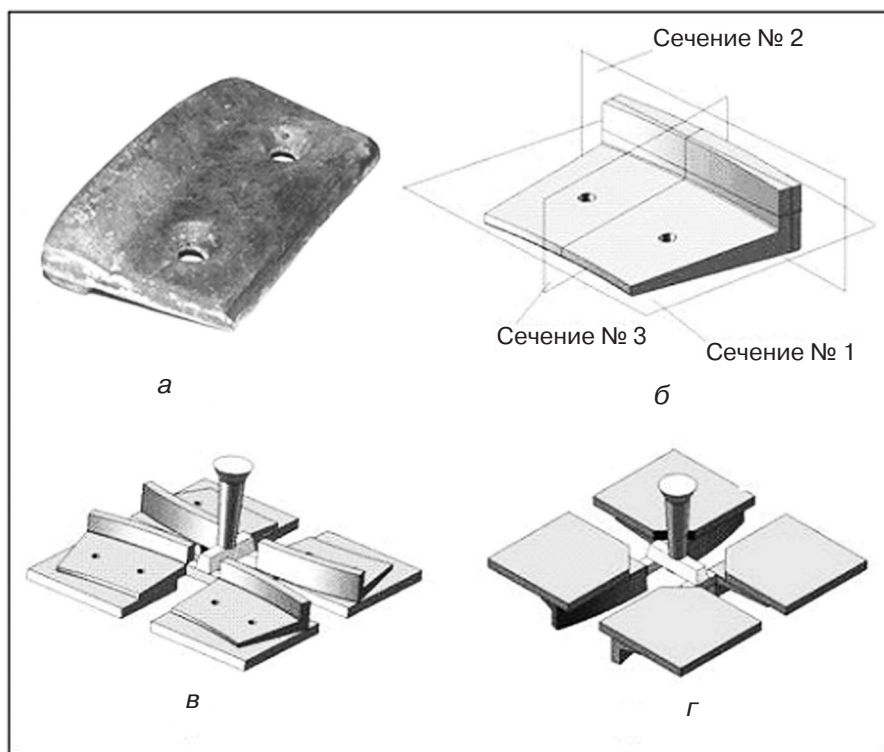


Рис. 1. Отливка «Накладка» (а); 3D модель и схема ее сечений (б); положение отливки в формах № 1 (в) и 2 (г)

Созданная в программе SolidWorks 3D-модель из 4-х отливок с элементами литниково-питающей системы (рис. 1, в, г) экспортировалась для последующего моделирования в программу LVMFlow. По плану эксперимента 2⁴ в процессе моделирования было реализовано 16 вариантов технологических решений (ТР) изготовления отливки (табл. 1).

Таблица 1. План и результаты ПФЭ 2⁴

Но- мер ТР	Толщина холо- дильни- ка, мм	Положе- ние холо- дильника, №	$t_3, ^\circ\text{C}$	Материал холодиль- ника	Площадь усадочных дефектов, %		
					в сече- нии № 1	в сече- нии № 2	в сече- нии № 3
1	15	1	1450	серый чугун	1,78	1,91	1,07
2	8	1	1350	серый чугун	13,62	6,46	2,25
3	8	1	1350	сталь 35Л	13,24	6,40	2,26
4	15	1	1450	сталь 35Л	1,92	2,02	1,25
5	15	1	1350	серый чугун	3,11	3,17	1,67
6	8	2	1350	сталь 35Л	4,80	5,90	3,29
7	15	1	1350	сталь 35Л	2,66	2,64	1,38
8	15	2	1350	сталь 35Л	3,05	3,25	2,06
9	8	2	1450	сталь 35Л	3,55	4,13	2,63
10	15	2	1450	серый чугун	2,40	2,94	1,76
11	8	1	1450	серый чугун	5,04	3,94	1,40
12	15	2	1350	серый чугун	2,94	3,63	2,25
13	8	1	1450	сталь 35Л	4,56	3,84	1,35
14	15	2	1450	сталь 35Л	2,48	2,89	1,74
15	8	2	1350	серый чугун	4,65	6,32	3,17
16	8	2	1450	серый чугун	3,67	4,25	2,24

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

При моделировании было принято: материал формы – песок кварцевый; материал холодильника – серый чугуи или сталь 35Л; температура заливки – $t_3 = 1350$ или 1450 °С; начальная температура песчаной формы, стержня и холодильника – 20 °С; способ заливки формы расплавом чугуна – из ковша.

Для повышения надежности оценки определение количества усадочных дефектов выполняли в 3-х сечениях моделей отливок (рис. 1, б). Численные результаты моделирования отливок, “изготовленных” по различным вариантам ТР, приведены в табл. 1.

Усадочные дефекты в сечении № 1. На рис. 2, а показаны места образования усадочных дефектов в отливке. Во всех вариантах ТР места образования дефектов находятся в этой части отливки, но площадь их изменяется в зависимости от различных факторов.

Анализ результатов влияния исследуемых параметров на величину усадки (табл. 1) по карте Парето (рис. 2, б) показал, что толщина холодильника (В), температура заливки металла (D), парное взаимодействие расположения отливки в форме и толщины холодильника (AB), положение отливки в форме (A), а также парное взаимодействие толщины холодильника и температуры заливки (BD) имеют статистически значимые эффекты. На это указывает то, что соответствующие горизонтальные столбцы пересекают вертикальную линию, которая

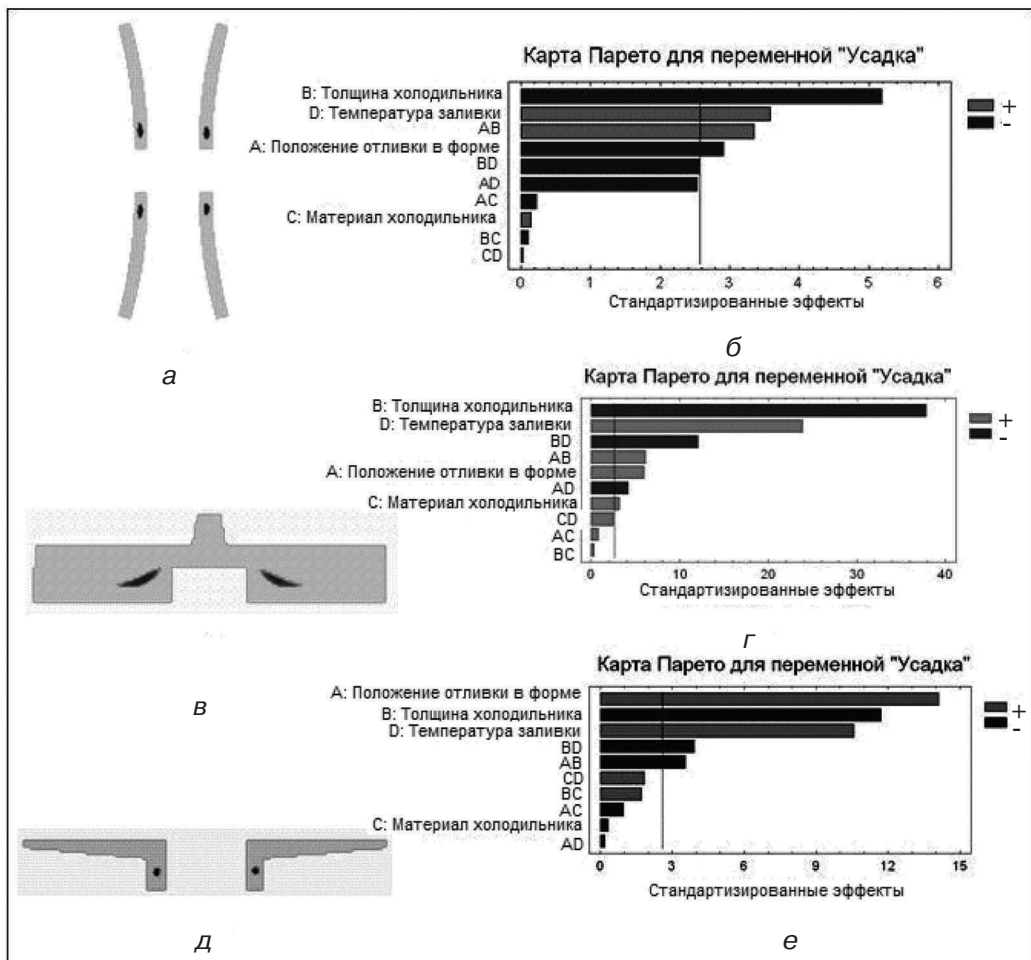


Рис. 2. Расположение усадочных дефектов в сечениях № 1 (а), 2 (в), 3 (д) и соответствующие этим сечениям карты Парето для переменной усадки (б), (г), (е)

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

составляет 95 % теста для определения значимости. Графики нормальности (рис. 3, б) и главных эффектов (рис. 4, а) также подтверждают этот вывод.

Результаты дисперсионного анализа (рис. 3, а) подтверждают, что факторы: положение отливки в форме (А), толщина холодильника (В), температура заливки металла (D), парное взаимодействие расположения отливки в форме и толщины холодильника (АВ), а также парное взаимодействие толщины холодильника и температуры заливки (BD), дают статистически важные эффекты (значение параметра $p < 0,05$). В то же время влияние других факторов является несущественным ($p > 0,05$).

На графике нормальности распределения вероятностей для переменной «Усадка» (рис. 3, б) факторы с наиболее сильным воздействием на величину усадки значительно отклоняются от линии графика. Это толщина холодильника (В), температура заливки металла (D), парное взаимодействие расположения отливки в форме и толщины холодильника (АВ), положение отливки в форме (А), парное взаимодействие толщины

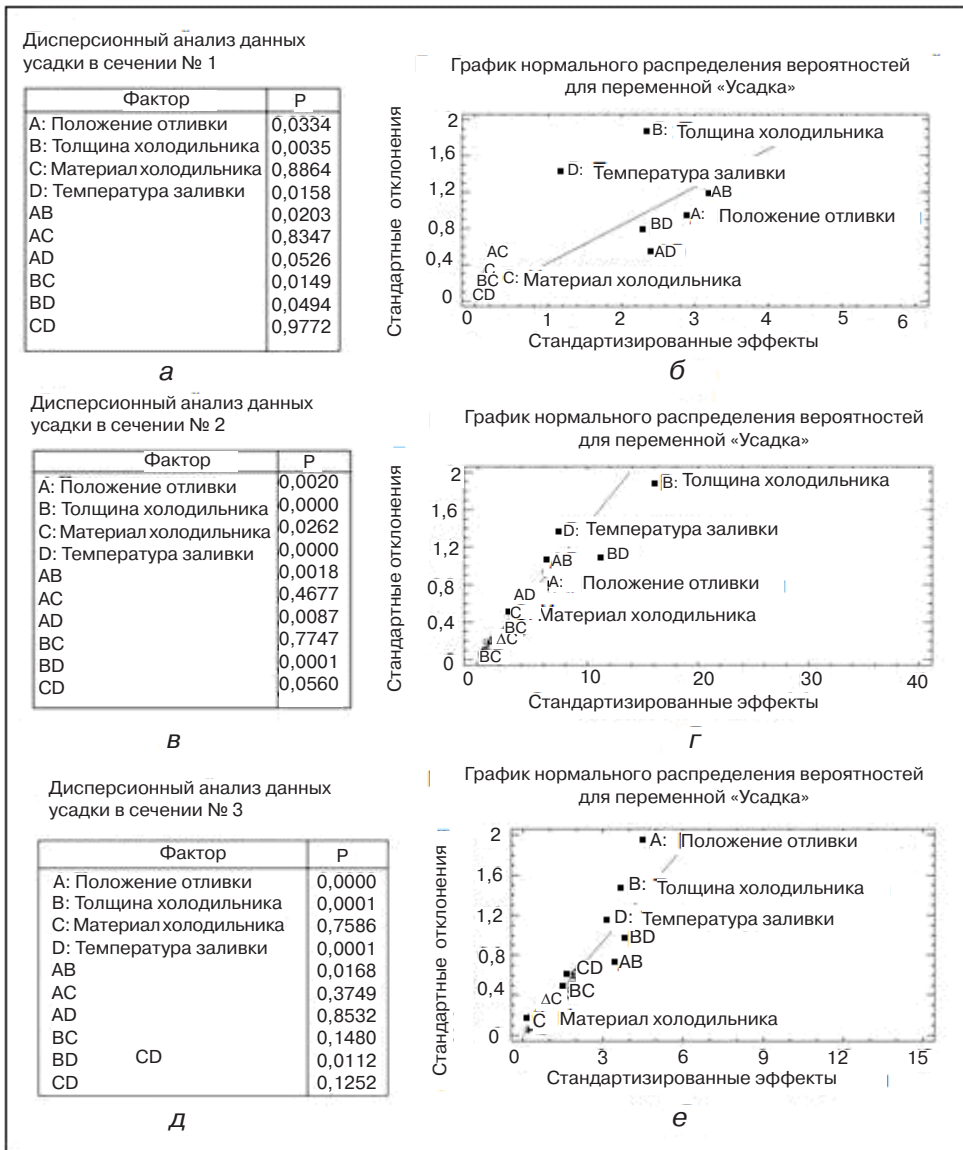


Рис. 3. Результаты дисперсионного анализа данных усадки в сечениях № 1 (а), 2 (в), 3 (д) и соответствующие этим сечениям графики нормальности (б, г, е)

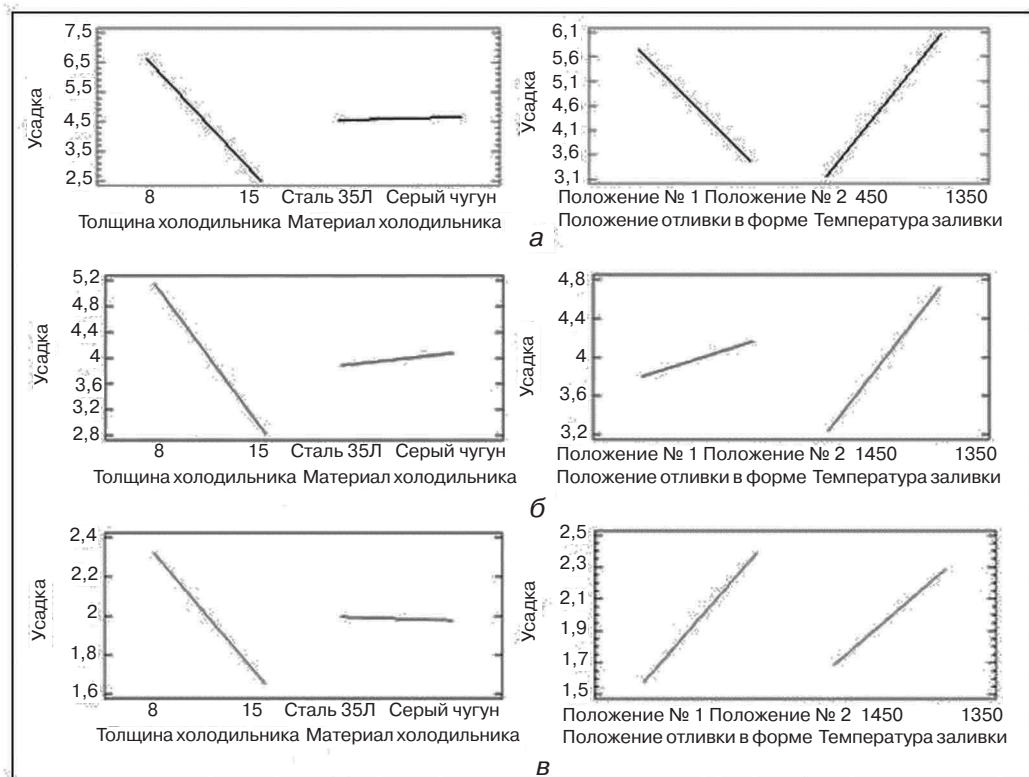


Рис. 4. Графики главных эффектов для сечений № 1 (а), 2 (б), 3 (в) с оптимальными ТР

холодильника и температуры заливки (BD), парное взаимодействие положения отливки в форме и температуры заливки металла (AD), парное взаимодействие положения отливки в форме и материала холодильника (AC), а также материал холодильника (C).

Из графиков главных эффектов (рис. 4, а) видно, что наименьшее количество усадочных дефектов наблюдается в случае ТР № 14 при следующих условиях: отливка располагается в форме в положении № 2, толщина холодильника составляет 15 мм, $t_3 = 1450$ °С и материал холодильника – сталь 35Л.

Усадочные дефекты в сечении № 2. Характер расположения усадочных дефектов в сечении № 2 модели отливки показан на рис. 2, в. На карте Парето (рис. 2, г) видно, что статистически значимое влияние на усадку оказывают (в порядке уменьшения оценки статистической надежности влияния): толщина холодильника (B), температура заливки металла (D), парное взаимодействие толщины холодильника и температуры заливки (BD), парное взаимодействие положения отливки в форме и толщины холодильника (AB), положение отливки в форме (A), парное взаимодействие положения отливки и температуры заливки (AD) а также материал холодильника (C). Графики нормальности и главных эффектов (рис. 3, г; 4, б), а также числовые данные дисперсионного анализа (рис. 3, в) подтверждают этот вывод.

Статистически значимыми факторами (рис. 3, г) являются толщина холодильника (B), температура заливки металла (D), парное взаимодействие толщины холодильника и температуры заливки (BD), так как они наиболее отклоняются от прямой на графике. Числовые данные дисперсионного анализа (рис. 3, в) подтверждают значимость влияния положения отливки в форме (A), толщины холодильника (B), материала холодильника (C), температуры заливки металла (D), парного взаи-

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

модействия положения отливки в форме и толщины холодильника (AB), парного взаимодействия положения отливки и температуры заливки (AD), а также парного взаимодействия толщины холодильника и температуры заливки (BD). Влияние этих факторов дает статистически значимые эффекты (параметр $p < 0,05$). В то же время влияние других факторов является несущественным ($p > 0,05$).

Из графиков главных эффектов (рис. 4, б) видно, что наименьшая усадка наблюдается в случае TP № 4, когда отливка находится в форме в положении № 1, толщина холодильника составляет 15 мм, температура заливки – 1450 °С, материал холодильника – сталь 35Л.

Усадочные дефекты в сечении № 3. Расположение усадочных дефектов в сечении № 3 модели отливки показано на рис. 2, д. Из карты Парето (рис. 2, е) видно, что статистически значимое влияние на усадку оказывают: положение отливки в форме (A), толщина холодильника (B), температура заливки металла (D), парное взаимодействие толщины холодильника и температуры заливки (BD), парное взаимодействие положения отливки в форме и толщины холодильника (AB). Графики нормальности (рис. 3, е) и главных эффектов (рис. 4, в), а также результаты дисперсионного анализа (рис. 3, д) подтверждают этот вывод.

Дисперсионный анализ (рис. 3, д) показал, что статистически значимым является влияние на усадку положения отливки в форме (A), толщины холодильника (B), температуры заливки металла (D), парного взаимодействия положения отливки в форме и толщины холодильника (AB), парного взаимодействия толщины холодильника и температуры заливки (BD), так как значение параметра $p < 0,05$. Влияние других факторов является несущественным.

Из графиков главных эффектов (рис. 4, в) следует, что наименьшее количество усадочных дефектов в рабочем слое отливки обеспечивает TP № 1, в котором отливку заливают в положении № 1 при температуре 1450 °С, а холодильник имеет толщину 15 мм и изготовлен из серого чугуна.

В табл. 2 приведена обобщенная сводка ранжированных оценок статистической значимости влияния варьируемых факторов и их парных взаимодействий на формирование усадочных дефектов в отливках накладок. Параметры значимости по картам Паре (рис. 2, б, г, е) и дисперсионному анализу (рис. 3, а, в, д) имеют строгие количественные оценки, что удобно использовать при ранжировании их значимости. Ранжирование по степени отклонения варьируемых параметров от линии нормального распределения (рис. 3, б, г, е) и по наклону графиков главных эффектов (рис. 4) имеет в значительной мере качественный характер, так как основано на визуальных оценках.

На основании усредненных значений рангов параметров по убыванию статистической значимости влияние варьируемых факторов на формирование усадочных дефектов в трех сечениях отливки можно представить в следующей последовательности:

$$B \rightarrow D \rightarrow A \rightarrow AB \rightarrow BD \rightarrow C \rightarrow AD \rightarrow BC = CD.$$

Как следует из приведенной последовательности факторов наибольшее влияние на формирование отливки оказывают толщина холодильника (B) и температура заливки металла (D). Из числа варьируемых факторов наименьшая статистическая значимость влияния на процесс формирования усадочных дефектов наблюдается для фактора C (материал холодильника). Это объясняется тем, что различие теплофизических свойств холодильников из чугуна и стали при их одинаковой толщине не оказывает существенного влияния на формирование отливки.

Таблица 2. Сводка оценок значимости влияния факторов на усадочные дефекты

Сечение	Параметр значимости	Ранжирование параметров значимости влияния варьируемых факторов и их парных взаимодействий									
		A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD
1	по карте Парето	4	1	-	2	3	-	-	-	5	-
	по дисперсионному анализу	4	1	-	2	3	-	-	-	5	-
	по нормальному распределению	4	1	-	2	3	-	6	-	5	-
	по главным эффектам	3	1	4	2	-	-	-	-	-	-
2	по карте Парето	5	1	7	2	4	-	6	-	3	-
	по дисперсионному анализу	5	1	6	2	4	-	7	-	3	-
	по нормальному распределению	-	1	-	-	-	-	-	-	2	-
	по главным эффектам	3	1	4	2	-	-	-	-	-	-
3	по карте Парето	1	2	3	5	-	-	-	-	4	-
	По дисперсионному анализу	1	2	-	3	5	-	-	-	4	-
	по нормальному распределению	1	-	-	-	3	-	-	-	2	-
	по главным эффектам	1	2	4	3	-	-	-	-	-	-
Средний ранг по трем сечениям		2,9	1,3	4,7	2,5	3,6	0	6,3	0	3,7	0
<p><i>Примечание 1:</i> А – влияние положения отливки в форме В – влияние толщины холодильника С – влияние материала холодильника D – влияние температуры заливки АВ – влияние парного взаимодействия А+В АС – влияние парного взаимодействия А+С AD - влияние парного взаимодействия А+D BC - влияние парного взаимодействия В+С BD - влияние парного взаимодействия В+D CD - влияние парного взаимодействия С+D</p>						<p><i>Примечание 2:</i> цифрами для карты Парето и дисперсионного анализа характеризуется возрастание параметра – снижение уровня достоверности влияния фактора; для нормального распределения – уменьшение отклонения от линии нормальности, а для главных эффектов – убывание интенсивности влияния; влияние взаимодействий АС, ВС и CD оказалось статистически незначительным</p>					

Выводы

• По результатам моделирования установлено, что в трех сечениях отливки частными оптимальными технологическими решениями являются TP № 1, 4 и 14 как обеспечивающие наименьшее количество усадочных дефектов. Во всех 3-х сечениях толщина холодильника составляет 15 мм, температура заливки металла – 1450 °С. В вариантах TP № 1 и 4 холодильник располагался в нижней части формы, а в вариантах TP № 4 и 14 материалом холодильника была сталь 35Л. Статистическая значимость результатов компьютерного моделирования подтверждена картами Парето, дисперсионным анализом, оценкой нормального распределения вероятностей и графиками главных эффектов.

• Оптимальным для модели в целом является технологическое решение (TP) № 1, соответствующее условию минимизации количества усадочных дефектов во всех 3-х сечениях отливки. Оно обеспечивает условия затвердевания отливки с получением минимального количества усадочных дефектов (1,07-1,91 %). Это до-

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

стигается при температуре заливки металла 1450 °С в результате использования чугунного холодильника толщиной 15 мм, расположенного в нижней части формы. Исследование качества отливок «Накладка», изготовленных литьем в песчано-глинистую форму по ТР № 1, показало адекватность результатов моделирования по количеству и местам расположения усадочных дефектов.



Список литературы

1. Крушенко Г. Г., Талдыкин Ю. А., Усков И. В. Стальные отливки с поверхностно легированным износостойким слоем // Литейн. пр-во. – 2000. – № 3. – С. 21-22
2. Брыков Н. Н., Попов С. Н. Влияние структуры сплавов лопаток асфальтосмесительных установок на сопротивляемость изнашиванию // Строительные и дорожные машины. – 1991. – № 2. – С. 18-19
3. Синтез комплексно легированных белых чугунов в литом и термообработанном состояниях/ Х. Ри, Э. Х. Ри, А. С. Рабзина и др. // Литейн. пр-во. – 2006. – № 7. – С. 2-4.
4. Капустин М. А., Шестаков И. А. Оптимизация химического состава износостойкого чугуна для литых мелющих шаров // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 1999. – № 2. – С. 32-33
5. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны: Структура и свойства. – М.: Metallurgia, 1983. – 176 с.
6. Поддубный А. Н., Романов Л. М. Износостойкие отливки из белых чугунов для металлургии и машиностроения. – Брянск: Придесенье, 1999. – 120 с.
7. Лагута В. И., Колесников В. А., Хинчагов Г. В. Повышение износостойкости высокомарганцевых чугунов за счет дополнительного легирования. – Луганск, 2001. – 107 с.
8. Бобырь С. В., Большаков В. И. Марганцовистые чугуны как износостойкие конструкционные материалы // Техника машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 28-31
9. Влияние особенностей отливки на качество деталей из высокохромистых чугунов / Ю. А. Ем, О. П. Юшкевич, В. Т. Калинин и др. // Металл и литье Украины. – 2005. – № 5. – С. 36-39.
10. Жуков А. А., Сильман Г. И., Фрольцов М. С. Износостойкие отливки из комплексно легированных белых чугунов. – М.: Машиностроение, 1984. – 104 с.
11. Бетоносмесительный комплекс KR-0110 – Оборудование – Режим доступа: <http://strom-mashina.com.ua/ru/equip/concrete/kr0110>. – Загл. с экрана.
12. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов и др. – Петербург: СПб, 2006. – 800 с.
13. ЗАО «НПО МКМ, LVMFlow, LVMFlow CV. – Режим доступа: <http://www.csoft.ru/catalog/soft/lvmflow/lvmflow-291.html>. – Загл. с экрана.
14. Дюк В. Обработка данных на ПК в примерах. – Петербург: СПб, 1997. – 240 с.
15. Организация металлургического эксперимента: Учебное пособие для вузов / Г. Е. Белай, В. В. Дембовский, О. В. Соценко и др. – М.: Metallurgia, 1993. – 256 с.
16. ImageJ 1.43m. Processing and Analysis in Java. – Режим доступа: http://portablev07.ucoz.ru/news/imagej_143m/2009-12-09-1637. – Загл. с экрана.

Поступила 12.09.2012