

УДК 621.74

П.С. СЕРЕНКОВ, д-р техн. наук; Ф.И. РУДНИЦКИЙ, канд. техн. наук; Т.С. ВОРОНОВА
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Р.Е. ВОЛКОТРУБ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Предложена стратегия повышения эффективности процесса разработки инновационных материалов и покрытий в области машиностроения посредством виртуального проектирования технологического процесса, основанного на принципах функционального моделирования. Определена методика экспертной оценки значений факторов, определяющих параметры технологического процесса, с точки зрения предпочтительности. Установлен алгоритм выбора рациональных областей значений данных факторов на основании экспертных оценок.

Ключевые слова: машиностроение, инновационные материалы, планирование эксперимента, экспертное оценивание, метод альтернатив

Процесс установления рациональных областей значений факторов, влияющих на показатели качества технологического процесса разработки инновационных материалов и покрытий, требует проведения экспериментальных исследований посредством моделирования всех возможных сочетаний параметров технологического процесса. Однако на практике экспериментальное воспроизведение всего множества сочетаний является труднодостижимым и связано с большими материально-техническими, временными и финансовыми затратами. Как правило, разработчик сталкивается с проблемой определения и экспериментальной реализации необходимого и достаточного количества экспериментов, позволяющих с большой долей вероятности говорить о том, что установленные области значений факторов, определяющих показатели качества технологического процесса, являются наилучшим вариантом из всего множества решений.

Наиболее эффективным способом организации экспериментальных исследований в подобного рода задачах выступает этап предварительного виртуального моделирования вариантов технологического процесса с использованием методов экспертного оценивания. Именно их применение позволяет снизить расходы временных, финансовых и материально-технических ресурсов.

Однако следует иметь в виду, что суждение эксперта, как источника информации, носит субъективный характер и, соответственно, обладает невысоким уровнем достоверности и надежности [1–4].

Комплексные исследования процессов экспертного оценивания в самых разных областях позволили сделать вывод, что существующие экспертные методы обладают рядом критических недостатков [4, 5]. Например, их достоверность определяется и управляется главным образом косвенно, через показатели компетентности экспертов и согласованности мнений группы экспертов [1–4, 6]. В процессе исследований авторами также выявлен неявный источник снижения достоверности экспертных оценок — индивидуальная несогласованность мнений одного эксперта, как вариация его мнения в отношении одного и того же объекта оценивания.

Установлено, что индивидуальная несогласованность мнений одного эксперта вносит в снижение достоверности экспертной информации вклад, соизмеримый с групповой вариацией мнений группы экспертов [5].

Для повышения эффективности разработки оптимальной технологии получения инновационных материалов и покрытий с заданными свойствами авторами была предложена пошаговая стратегия:

- Шаг 1. Идентификация и формализация целей — функциональных показателей разрабатываемого инновационного материала или покрытия;
- Шаг 2. Выбор приоритетной технологии получения инновационного материала или покрытия;
- Шаг 3. Определение рациональных областей значений параметров приоритетной технологии получения инновационного материала или покрытия с заданными свойствами.

Стратегия реализуется посредством использования комплекса методов экспертного оценивания, отличающихся особым подходом к сбору, анализу и оцениванию эвристических суждений экспертов. Комплекс включает три базовых оригинальных метода:

- метод альтернатив как метод экспертного оценивания единичным экспертом объектов инноваций по одному показателю результативности [5];
- метод альтернатив как метод экспертного оценивания группой экспертов объектов инноваций по одному показателю результативности [5];
- метод покоординатного спуска как метод экспертного оценивания объектов инноваций одновременно по нескольким показателям результативности [7].

Реализация первых двух шагов стратегии подробно рассмотрена в [8]. В данном докладе описана апробация третьего шага стратегии. На этом шаге технологический процесс рассматривается с точки зрения процессного подхода в виде модели типа «поток работ», представленной в нотации IDFE0 [5]. Т. е. технологический процесс представляется как совокупность последовательно-параллельных операций (подпроцессов) (рисунок 1).

При этом каждая операция определяется рядом факторов, соответствующих категориям «вход», «меха-

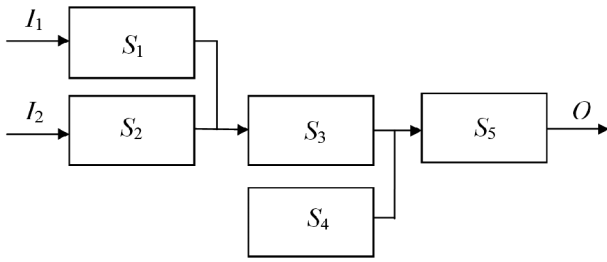


Рисунок 1 — Функциональная модель технологического процесса типа «поток работ»: I_1, I_2 — ресурсы (сырье, оборудование, персонал, финансы и т. п.), являющиеся исходной базой для осуществления технологического процесса; S_1-S_5 — операции (подпроцессы), составляющие основу технологического процесса; O — объект, являющийся результатом осуществления технологического процесса

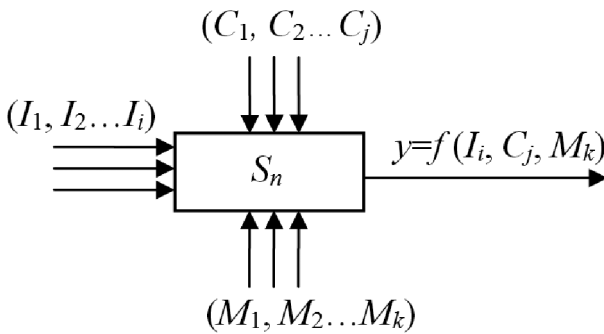


Рисунок 2 — Факторы, определяющие единичную операцию техпроцесса: S_n — единичная из множества операций (подпроцессов), формирующих техпроцесс; I_1-I_i — факторы категории «вход»; C_1-C_j — факторы категории «управление»; M_1-M_k — факторы категории «механизм»

низм», «управление» (рисунок 2), определяющих ее вариативность.

Данный подход был применен при реализации проекта по разработке технологии литья заготовок из быстрорежущей стали вставок резцов для ротора горнодобывающего комбайна, предназначенного для добычи калийной соли (ОАО «Беларуськалий»), на базе научно-исследовательской лаборатории «Литейные технологии» Белорусского национального технического университета. В результате реализации первых двух шагов виртуального моделирования [8] в качестве приоритетной технологии литья была определена технология свободной заливки сплава в разовую разъемную форму из химически твердеющей смеси без регулирования скорости охлаждения.

Для реализации третьего шага экспертами исследовательской группы была сформирована функциональ-

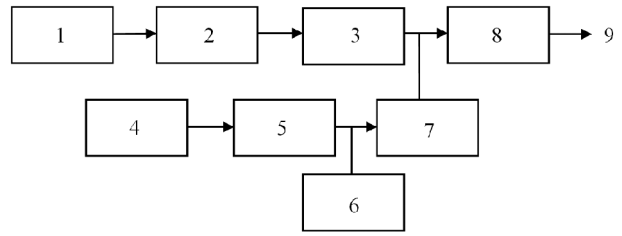


Рисунок 3 — Модель типа «поток работ» процесса свободной заливки расплава в разовую разъемную форму без регулирования скорости охлаждения: 1 — подготовка шихты; 2 — плавка; 3 — управление структурой; 4 — разработка модели; 5 — разработка формы и литниковой системы; 6 — подготовка смеси для формы; 7 — подготовка разовой разъемной формы; 8 — разлив в форму; 9 — заготовка с требуемыми характеристиками

ная модель типа «поток работ» для установленной приоритетной технологии (рисунок 3).

По результатам анализа каждой операции приоритетной технологии, в соответствии с методологией моделирования IDEF0, экспертами в совокупности было идентифицировано 7 значимых факторов, а также на основе априорной информации были определены диапазоны варьирования значений этих факторов (таблица 1).

Для каждой категории факторов из таблицы 1 было осуществлено ранжирование с точки зрения их приоритетности в отношении достижения комплексной цели — получения отливок с заданными физико-механическими свойствами с учетом производственных возможностей организации (приемлемой технологичностью) в необходимом количестве (приемлемой производительностью). Ранжирование производилось с оценением по методу альтернатив [5].

Для определения предпочтительной совокупности значений факторов приоритетной технологии авторами был разработан метод фрактально-покоординатного планирования виртуального эксперимента. Ключевым моментом метода фрактально-покоординатного планирования является разработка плана виртуального эксперимента по аналогии с классическим методом симплексного планирования или методом «крутого восхождения» [9, 10]. В качестве симплекса (единичного элемента планирования) при реализации данного метода принят фрактал, структурно представляющий собой план полнофакторного эксперимента типа 2^3 [9, 10]. В качестве переменных в рамках фрактала выступают три фактора (каждый из которых имеет два уровня варьирования), представляющие, соот-

Таблица 1 — Определенные значимые факторы и диапазоны варьирования из значений

№	Фактор	Категория фактора	Ранг фактора	Диапазоны варьирования значений фактора (уровни варьирования фактора)	
1	Марка лома	«вход»	I_2	$I_2^1 \rightarrow P18$	$I_2^2 \rightarrow P6M5$
2	Модель	«вход»	I_5	$I_5^1 \rightarrow$ неокрашенная	$I_5^2 \rightarrow$ окрашенная
3	Модификатор висмут	«вход»	I_4	$I_4^1 \rightarrow (0-1\%)$	$I_4^2 \rightarrow (1-2\%)$
4	Модификатор бор	«вход»	I_1	$I_1^1 \rightarrow (0-0,1\%)$	$I_1^2 \rightarrow (0,1-0,2\%)$
5	Легирующий элемент кобальт	«вход»	I_3	$I_3^1 \rightarrow 0$	$I_3^2 \rightarrow 2\%$
6	Производственная среда подготовки смеси для формы	«механизм»	M_2	$M_2^1 \rightarrow$ сухая	$M_2^2 \rightarrow$ влажная
7	Тип печи	«механизм»	M_1	$M_1^1 \rightarrow$ обычная	$M_1^2 \rightarrow$ вакуумная

ветственно, категории «вход» (I_1, I_2, \dots, I_i), «механизм» (M_1, M_2, \dots, M_j), «управление» (C_1, C_2, \dots, C_k). Остальные факторы, характеризующие приоритетную технологию, должны быть закреплены в рамках фрактала на одном уровне (произвольно). Для формирования первого фрактала в качестве переменных для каждой категории устанавливаются факторы высшего (первого) с точки зрения предпочтительности ранга с учетом уровней их варьирования ($I_1^1, I_1^2, C_1^1, C_1^2, M_1^1, M_1^2$). Графически единичный фрактал данного плана можно представить в виде куба, вершины которого представляют собой комбинацию трех факторов, выбранных в качестве переменных, закрепленных на определенном уровне (рисунок 4).

Сущность виртуального эксперимента в данном случае заключается в «покоординатном перемещении к потенциально лучшему варианту технологии» (по аналогии с методом «крутого восхождения»). Реализация виртуального эксперимента заключается в том, что руководитель исследовательской группы задает вопросы эксперту типа: «Вариант технологического процесса (I_1^1, C_1^1, M_1^1) лучше или хуже варианта (I_1^1, C_1^1, M_1^1) для достижения комплексной цели?». Переход от одного варианта технологического процесса к другому (из одной вершины куба в другую, соседнюю) возможен в случае, если эксперт определит, что последующий вариант лучше предыдущего. Если эксперт затрудняется ответить на вопрос о преимуществе оцениваемого варианта технологического процесса, представленного в данной вершине куба, по сравнению с предыдущим, то в этих двух точках плана эксперимента необходимо поставить физический эксперимент и количественно определить какой вариант лучше.

Последовательность вопросов в рамках фрактала можно интерпретировать как пространственную непрерывную ломаную линию по ребрам куба. «Движение» по этой линии и есть реализация метода покоординатного спуска (см. рисунок 4) [7].

Результатом проработки первого фрактала как последовательности вопросов экспертам является наилучшая комбинация уровней факторов первого ранга

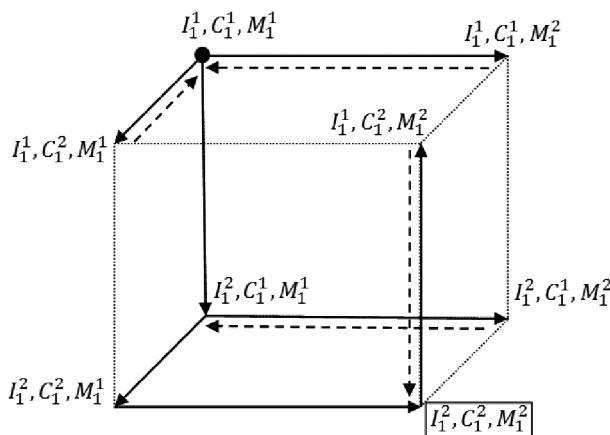


Рисунок 4 — Графическое представление фрактально-покоординатного плана виртуального эксперимента. Фрактал 1: — прямое перемещение между соседними вариантами технологического процесса как поиск потенциально лучшего варианта технологии; <--- — возврат к исходному варианту технологического процесса в случае, если последующий вариант оценен как худший по сравнению с исходным вариантом; • — начальная точка проработки фрактала

I_i^i, M_j^j, C_k^k , которая в наибольшей мере обеспечивает, по мнению экспертов группы, достижение комплексной цели.

Формирование второго и последующих фракталов осуществляется аналогично первому. В качестве переменных из каждой категории выбираются факторы, чей ранг соответствует номеру фрактала. Факторы высших (предпочтительных) рангов при этом закрепляются на уровнях, соответствующих наилучшей комбинации (определенных в результате проработки «высших» фракталов). Факторы «низших» рангов при этом закрепляются на том же уровне, что и при проработке первого («высшего») фрактала.

Пошаговую процедуру экспертного анализа вариантов технологического процесса следует проводить до тех пор, пока все идентифицированные факторы, характеризующие ресурсы категорий «вход», «механизм», «управление» (см. рисунки 1, 2), не будут задействованы в виртуальном планировании эксперимента.

Примечание. В случае, если количество факторов каждой категории не одинаково, на некотором этапе виртуального эксперимента фрактал может быть представлен двумя (например, $(I_i^i, I_j^j, C_j^j, C_j^j)$) или даже одним фактором (например, (I_i^i, I_i^i)). Соответственно, полнофакторный план типа куб 2^3 трансформируется в квадрат типа 2^2 или отрезок типа 2^1 .

Результатом последовательной проработки всех фракталов является вариант предпочтительной технологии с определенными уровнями варьирования (диапазонами значений) факторов, в наибольшей мере обеспечивающий, по мнению экспертов, достижение комплексной цели.

Процесс применения метода фрактально-покоординатного планирования для определения рациональных диапазонов значений факторов приоритетной технологии получения отливок из быстрорежущей стали графически можно представить в виде фрактально-покоординатного плана виртуального эксперимента (рисунок 5). Ранги факторов и уровни их варьирования соответствуют установленным в таблице 1.

Для примера, в таблице 2 приведен алгоритм проработки первого фрактала виртуального эксперимента группой экспертов. Следует обратить внимание, что на этапе проработки фрактала возникла необходимость в проведении физического эксперимента, поскольку эксперты затруднялись дать однозначный ответ на вопрос, повлияет ли введение дополнительного количе-

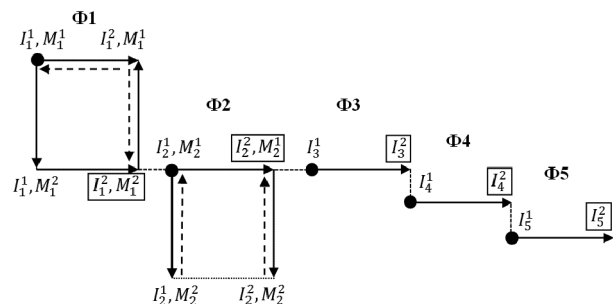


Рисунок 5 — Графическое представление фрактально-покоординатного плана виртуального эксперимента по определению рациональных областей параметров приоритетной технологии получения отливок из быстрорежущей стали: • — начальная точка проработки фрактала; Ф1–Ф5 — фракталы рангов 1–5 соответственно

Таблица 2 — Проработка фрактала первого ранга для виртуального эксперимента по определению рациональных диапазонов значений факторов приоритетной технологии получения отливок из быстрорежущей стали

№ пере-хода	Начальная точка перехода		Конечная точка перехода		Оценка предпочтительности		Оценка руководителя проекта
					Эксперт 1	Эксперт 2	
1	I_1^1, M_1^1	0–0,1 % бора, печь обычная	I_1^2, M_1^1	0,1–0,2 % бора, печь обычная	неизвестно	неизвестно	неизвестно
2	I_1^1, M_1^1	0–0,1 % бора, печь обычная	I_1^1, M_1^2	0–0,1 % бора, печь вакуумная	лучше	лучше	лучше
3	I_1^1, M_1^2	0–0,1 % бора, печь вакуумная	I_1^2, M_1^2	0,1–0,2 % бора, печь вакуумная	неизвестно	неизвестно	неизвестно
Проведение физического эксперимента в точках (I_1^1, M_1^2) и (I_1^2, M_1^2)							
4	I_1^2, M_1^2	0,1–0,2 % бора, печь вакуумная	I_1^2, M_1^1	0,1–0,2 % бора, печь обычная	хуже	хуже	хуже

ства модификатора бора на улучшение структуры и физико-механических свойств заготовки с точки зрения ее функционального назначения.

По результатам проработки всех фракталов виртуального эксперимента установлено, что для обеспечения комплексной цели приоритетная технология изготовления отливок должна быть реализована путем плавки в вакуумной печи (M_1^2) шихты из лома стали Р6М5 (I_2^2) с добавлением 1–2 % висмута (I_4^2), 0,1–0,2 % бора (I_1^2), 2 % кобальта (I_3^2). Для изготовления отливок необходимо использовать форму из химически твердеющей смеси в сухой среде (M_2^1). Используемая для формы модель должна быть окрашена (I_5^2).

Заключение. Предложена стратегия повышения эффективности разработки технологических процессов получения инновационных материалов и покрытий в области машиностроения с использованием принципов виртуального моделирования с применением экспертных методов оценивания. Определен алгоритм определения влияющих факторов технологического процесса и установления их предпочтительных диапазонов значений с применением метода альтернатив и метода поперечного спуска. Реализация стратегии продемонстрирована на примере разработки технологии литья заготовок из быстрорежущей стали вставок резцов для ротора горнодобывающего комбайна, предназначенного для добычи калийной соли (ОАО «Беларуськалий»).

Список литературы

1. Орлов, А.И. Эконометрика: учеб. для вузов / А.И. Орлов. — М.: Экзамен, 2002. — 576 с.
2. Сатаров, Г.А. Общий подход к анализу экспертных оценок методами неметрического многомерного шкалирования / Г.А. Сатаров, В.С. Каменский. — В кн.: Статистические методы анализа экспертных оценок. — М., 1977. — 107 с.
3. Хамханова, Д.Н. Теоретические основы обеспечения единства экспертных измерений / Д.Н. Хамханова. — Улан-Удэ: ВСГТУ, 2006. — 170 с.
4. Подиновский, В.В. О некорректности метода анализа иерархий / В.В. Подиновский, О.В. Подиновская // Проблемы управления. — 2011. — № 1. — С. 8–13.
5. Методы менеджмента качества. Методология управления риском стандартизации / П.С. Серенков [и др.]. — Минск, 2012. — 243 с.
6. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати; пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. — М.: Радио и связь, 1993. — 278 с.
7. Серенков, П.С. Системный подход к качеству физкультурно-оздоровительных услуг / П.С. Серенков, А.С. Хорлоогийн // Стандарты и качество. — 2017. — № 10(964). — С. 98–101.
8. Повышение эффективности техники планирования эксперимента на этапе разработки инновационных материалов и покрытий / П.С. Серенков [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2019. — Вып. 8. — С. 348–351.
9. Ящерицын, П.И. Планирование эксперимента в машиностроении / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. — Минск: Выш. шк., 1985. — 286 с.
10. Григорьев, Ю.Д. Методы оптимального планирования эксперимента: линейные модели: учеб. пособие / Ю.Д. Григорьев. — СПб: Лань, 2015. — 320 с.

Serenkov P.S., Rudnitsky F.I., Voranova T.S., Volkotrub R.E.

Efficiency improving of developing technological processes of obtaining innovative materials and coatings with desired properties

The strategy of increasing the process efficiency of developing innovative materials and coatings in the field of mechanical engineering is proposed. It can be realized by technological process of virtual designing which is based on the principles of functional modeling. The methodology of expert assessments for the characteristics of technological process at the sight of preferences is defined. The algorithm of choosing the rational ranges of values of these characteristics is developed on the basis of the expert assessments.

Поступила в редакцию 16.06.2020.