

Сложность создаваемых технологических систем по производству новых материалов с требуемыми физико-механическими и служебными свойствами сегодня такова, что за время, необходимое для принципиальной разработки, проектирования, испытания и промышленного использования, первоначальное техническое задание может устареть. В связи с этим требуются принципиально новые подходы к процессу проектирования материала и технологии его получения, обеспечивающие сокращение сроков разработки технологической системы, снижение трудовых и материальных затрат на разработку с одновременным повышением качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции.

УДК 621.763

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ
ЛЕГКОПЛАВКИХ ПОДШИПНИКОВЫХ СПЛАВОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ
УЛЬТРАДИСПЕРСНОЙ АЛМАЗОГРАФИТОВОЙ ШИХТОЙ**

акад., д-р техн. наук, проф. П.А. ВИТЯЗЬ
(Национальная академия наук Беларуси, Минск),
В.И. ЖОРНИК, О.В. ЖИЛИНСКИЙ, Н.Н. ПРОКОПОВИЧ
(Институт механики и надежности машин НАН Беларуси, Минск),
Т.В. ЛАКТЮШИНА
(Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск)

Изложены основы компьютерной методологии проектирования технологии получения легкоплавких подшипниковых сплавов, модифицированных ультрадисперсной алмазографитовой шихтой. Показано, что технологическая система относится к классу многомерных, нелинейных и стохастических систем. Установлено, что многомерное пространство состояний технологии содержит большое число областей устойчивости, в пределах которых находится бесконечное множество вариантов материала с заданными свойствами.

Введение. Технологические системы как объекты проектирования обладают целым рядом специфических особенностей: многокритериальностью, многопараметричностью, стохастичностью (рассеивание значений параметров), наличием внутрисистемных связей и их нелинейностью, взаимозависимостью и противоречивостью характеристик, уровень которых определяется не только значениями параметров, но и сочетаниями этих значений. Кроме того, функционирование технологической системы происходит в условиях постоянного случайного изменения значений параметров системы под влиянием различных внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Поэтому подавляющее большинство задач материаловедения требует решения обратной задачи. Только в этом случае появляется возможность, задаваясь необходимым комплексом характеристик системы, определить необходимые для их обеспечения значения параметров состава и технологического процесса. Необходимо отметить, что в материаловедении в основном решается только прямая задача, в которой по заданным значениям параметров режима процесса и состава находят характеристики материала и технологии его получения. Несмотря на широкое распространение этого подхода, он не может обеспечить решение всего комплекса вопросов, возникающих на современном уровне.

Цель работы - исследование и компьютерное проектирование технологии получения легкоплавких подшипниковых сплавов, модифицированных алмазографитовой шихтой.

Методы исследования. В традиционных методологиях проектирование, в том числе и автоматизированное, технологических систем выполняется чаще всего только в виде компьютерной поддержки исследователя, практически самостоятельно выполняющего процедуры обработки данных и принятия решения. Характерной чертой таких методов является недопустимо большой объем неформализованных процедур, которые выполняет исследователь или специалист-материаловед на основе своих знаний, накопленного опыта и интуиции. В современных условиях, учитывая постоянное усложнение создаваемых технологических систем и все ускоряющийся рост уровня требований к качеству создаваемых материалов и надежности технологий их получения, сложность выполнения неформализованных процедур уже

превышает некоторый естественный для человека порог. Кроме того, традиционный подход к решению задач проектирования обычно базируется на методе решения прямых задач. Несмотря на широкое распространение этого подхода, он не может обеспечить решение всего комплекса возникающих вопросов на современном уровне. Многие проектные процедуры требуют комбинированного использования методов прямых и обратных задач.

Предлагаемый метод многомерного проектного синтеза технологии получения легкоплавких подшипниковых сплавов, модифицированных алмазографитовой шихтой, учитывает многокритериальность и стохастичность реальной системы. Он позволяет оперировать не только математическими, но и техническими критериями оптимальности.

Для реализации процедур многомерного проектного синтеза технологической системы «легкоплавкий подшипниковый сплав - ультрадисперсная алмазографитовая шихта» использован комплекс оригинальных методов. Их использование инициирует новые результаты при решении ряда перманентных проблем материаловедения. К числу наиболее значимых методов, использованных при разработке математической модели технологии получения легкоплавких подшипниковых сплавов, модифицированных ультрадисперсной алмазографитовой шихтой, можно отнести метод решения обратных многокритериальных задач и метод компьютерного выбора технически оптимального варианта. Уникальными являются метод выделения областей устойчивости в многомерном пространстве состояний и метод построения дискретных портретов пространства состояний технологической системы.

Для решения обратной многокритериальной задачи проектирования разработан специальный алгоритм. Практически все процедуры многомерного синтеза системы компьютеризированы, что является концептуальной особенностью данной методологии проектирования системы. Исследователю поручены только выполнение натурального эксперимента и постановка задачи проектирования в виде требований к уровню качества. Это позволяет:

- устранить неопределенности, связанные с субъективными предпочтениями разработчиков, исследователей и лиц, принимающих решение;
- гарантировать как опытным, так и начинающим специалистам выбор объективно наилучшего решения;
- выбирать технически оптимальный вариант, обладающий наибольшей устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов;
- одновременно решать две обратные многокритериальные задачи: выделение в пространстве состояний областей устойчивости, где «существуют» варианты материала с заданными свойствами, и выбор технически оптимального варианта системы в одной из областей устойчивости при условии обеспечения требуемого уровня воспроизводимости свойств материала [1].

Компьютерные программы обеспечивают в автоматическом режиме выбор технически оптимального варианта. При этом гарантируется стабильное воспроизведение заданных свойств материала и нормальное функционирование технологической системы.

Ряд предлагаемых методов и программ компьютерного проектирования и исследования технологии получения легкоплавких подшипниковых сплавов, модифицированных ультрадисперсной алмазографитовой шихтой, являются уникальными, не имеющими аналогов в отечественной и мировой науке и практике решения материальных проблем.

Результаты и их обсуждение. Для исследований был выбран сплав Б83 (ГОСТ 1320-74), широко применяемый в подшипниках скольжения различных машин. В качестве модификатора была использована ультрадисперсная алмазографитовая шихта- УДАГ (ТУ РБ 28619110001-95). Для получения композиционного материала на основе Б83 использовали метод порошковой металлургии [2]. По сформулированному исходному пространству параметров состава и технологии были изготовлены образцы. В качестве критерия качества модели была взята микротвердость полученного материала. На основе экспериментальных данных определена математическая модель.

Математическая модель технологии получения легкоплавкого подшипникового сплава, модифицированного УДАГ, описывается следующим уравнением:

$$K_1 = -1822,585 + 2,038216P_1 + 62,50109P_2 - 66,09487P_3 + 140,9254P_4 - 0,00976045 P_1^2 - 0,3011554 P_2^2 + + 0,5588087 P_3^2 + 699,6538 P_4^2 + 0,00001857264 P_1^3 + 0,0004928235 P_2^3 - 0,001501513 P_3^3 - 808,4257 P_4^3 - - 0,001269789P_1P_2 - 0,001379833P_1P_3 - 0,03734242 P_1P_4 - 0,006904116P_2P_3 - 0,4048621P_2P_4 - 1,335166P_3P_4,$$

где K_1 – микротвердость подшипникового сплава, Н/мм²; P_1 – давление прессования, МПа; P_2 – температура спекания, °С; P_3 – время спекания, мин; P_4 – концентрация ультрадисперсной алмазографитовой шихты, мас. %.

Анализируя представленное уравнение, можно сделать следующее заключение: технологическая система «подшипниковый сплав - ультрадисперсная алмазографитовая шихта» является нелинейной, что создает значительные трудности при прогнозировании поведения данной системы, однако с помощью математической модели, варьируя технологическими параметрами и содержанием ультрадисперсной алмазографитовой шихты, можно получить материал с более высокими эксплуатационными характеристиками по сравнению с материалом, полученным экспериментальным путем, причем с наименьшими экономическими затратами.

Следует отметить, что одна из причин возможной некорректности решения, принимаемого по законам традиционной методологии при выборе оптимальных технологических параметров, состоит в том, что в большинстве случаев при разработке материала процесс его получения рассматривается как детерминированный, происходящий при определенных значениях параметров технологической системы. В действительности детерминированных систем на практике не существует, поскольку значения параметров реальных технологических систем всегда являются случайными величинами, сами системы относятся к классу стохастических.

Проблема выбора технически оптимального варианта была решена методом компьютерной методологии проектирования технологической системы многомерности пространства управляемых параметров, стохастичности процессов и наличия набора взаимосвязанных (часто противоречивых) требований к свойствам материала и показателям качества технологической системы. У каждого реального объекта значения параметров отличаются от расчетных и случайным образом распределены в поле рассеивания. Следовательно, нет гарантии, что реальной системе будет соответствовать точка из области устойчивости, которая была найдена исходя из условий «математической устойчивости». Следствием такой ситуации будет появление материала с несоответствующими заданному уровню свойствами. Чтобы такого не произошло, уже при проектировании системы предусмотрен определенный запас устойчивости системы. Его наличие позволяет предотвратить часто возникающее ухудшение качества функционирования системы по критерию воспроизводимости свойств материала.

Для оценки результатов, полученных при решении задачи исследования и проектирования технологии получения легкоплавкого подшипникового сплава, модифицированного УДАГ, полезно рассмотреть топологию многомерного пространства управляемых параметров системы. Исследования топологии дискретных портретов, отражающих возможные состояния технологической системы и разрабатываемого материала, позволяют заглянуть в гиперкуб пространства управляемых параметров и увидеть все особенности технологического комплекса.

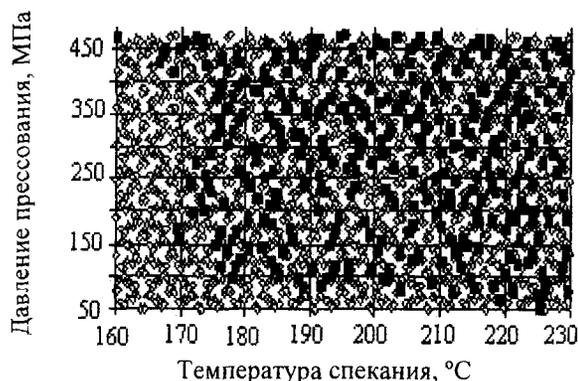
Выделения областей устойчивости в многомерном пространстве состояний является важной составной частью оценки качества технологической системы «легкоплавкий подшипниковый сплав - ультрадисперсная алмазографитовая шихта» и выбора технически оптимального варианта системы.

На рисунке показано пространство состояний технологической системы при содержании модификатора 0,01...0,1 мас. %. В качестве критерия выступает микротвердость модифицированного материала. Представлены дискретные пространства состояний системы при желаемом уровне микротвердости: 20...30; 30...40; 40...50; 50...60 Н/мм². Каждая точка из числа темных и светлых представляет собой один из возможных вариантов системы производимого ею материала. Качества функционирования системы и свойства материала известны и представлены соответствующим набором показателей. Координаты вариантов в пространстве состояний также известны и определены как значения параметров. Темные точки - это варианты, у которых свойства соответствуют заданным, а светлые представляют варианты, для которых требования по свойствам материала не выполняются.

Как видим, с повышением микротвердости уменьшается число осуществимых вариантов, у которых микротвердость соответствует заданной. Характеристики технических систем и материала меняются при изменении значений одного из параметров. Очевидно, что изменение хотя бы одного из технологических параметров приводит к новому уровню характеристик материала. Пока новые характеристики не выходят за пороговые, значения система находятся в области устойчивости. Выход одного или нескольких параметров за пределы области устойчивости свидетельствует о том, что материал с заданными свойствами не будет получен. Система находится в области неустойчивости. Так, технологическая система «легкоплавкий подшипниковый сплав - ультрадисперсная алмазографитовая шихта» как многомерная, нелинейная система со многими показателями характеризуется любым числом устойчивых областей. Каждый вариант системы из этих областей характеризуется определенным соотношением значений показателей качества.

Из сказанного следует, что качественное состояние системы (устойчивое, неустойчивое) определяют в совокупности значения физико-механических, функциональных и других характеристик. В этом случае необходимо говорить о выделении областей устойчивости по выходу, подразумевая под последним весь комплекс заданных свойств материала. На множестве областей устойчивости может существовать бесконечное число вариантов, соответствующих заданным свойствам материала.

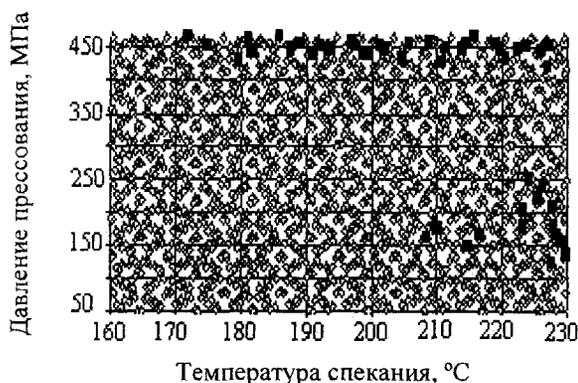
Однако большинство предъявленных вариантов не может быть принято как решение задачи проектирования технологии получения легкоплавкого подшипникового сплава, модифицированного УДАГ, ввиду того, что они не соответствуют необходимому уровню воспроизводимости свойств материала. Также следует отметить, что технологическое оборудование не всегда позволяет точно следовать расчетным технологическим параметрам.



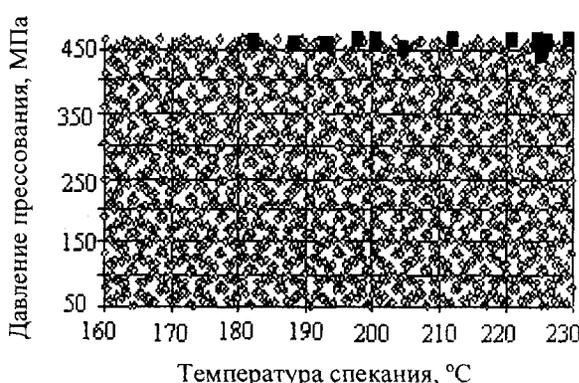
а)



б)



в)



г)

Дискретный портрет пространства состояний технологической системы «легкоплавкий подшипниковый сплав – ультрадисперсная алмазграфитовая шихта»:

- а – микротвердость 20...30 Н/мм²; б – микротвердость 30...40 Н/мм²;
- в – микротвердость 40...50 Н/мм²; г – микротвердость 50...60 Н/мм²;
- – вариант системы, обеспечивающий заданную микротвердость;
- ◇ – вариант системы, не обеспечивающий заданную микротвердость

Для выполнения требований по воспроизводимости свойств материала необходимо обеспечить очень высокую точность и стабильность рекомендованных значений режимов технологии. Может даже оказаться, что такую технологию вообще невозможно реализовать из-за отсутствия приборов, обеспечивающих требуемую точность установки и поддержания режимов.

На основе проведенных исследований и с учетом вышеизложенного были отобраны оптимальные варианты создаваемого материала и технологического процесса его производства, разработана технологическая карта получения легкоплавкого подшипникового сплава, модифицированного УДАГ. В технологической карте для каждой требуемой микротвердости представлены расчетные значения верхних и нижних границ, их наличие обусловлено случайностью технологических параметров системы, которые могут принимать разные значения в пределах рекомендованных для них полей допусков. В карте также указаны номинальные значения всех технологических параметров (давление прессования, температура и время спекания, содержание алмазграфитовой шихты), обеспечивающих заданные показатели качества материала. Кроме этого, для каждого параметра указывается допустимая величина разброса (поле допусков), в пределах которого системой обеспечивается выполнение задания по показателям качества с вероятностью, равной единице, что обеспечивает стопроцентный уровень воспроизводимости свойств продукции.

В нашем случае трудности возникают при поддержании заданной температуры, так как в некоторых вариантах отклонения по температуре составляют всего ± 5 °С. Представление сведений о допусках на технологические параметры является концептуальной особенностью метода многомерного проектного синтеза технических объектов, технологий и материалов, позволяющего решать задачи выбора с учетом стохастичности процессов в реальных объектах. В общем случае предлагаемая карта технологических режимов процесса получения материала в результате компьютерного проектирования системы есть результат решения обратной задачи.

Выводы. Результаты решения научно-исследовательских и прикладных задач показывают, что поведение технологической системы в многомерном виртуальном пространстве может быть описано с помощью методов решения локальных задач проектирования на основе алгоритмов, реализованных в виде программ ЭВМ.

Таким образом, уже на этапе научно-исследовательских работ и проектирования исследователю предоставляется возможность решать некоторые технологические проблемы производства легкоплавких подшипниковых сплавов, модифицированных ультрадисперсной алмазографитовой шихтой, а именно: определить оптимальные технологические режимы производства с гарантированным выходом годных изделий; подобрать технологическое оборудование и средства контроля и измерений; определить оптимальный состав разрабатываемого подшипникового сплава. С помощью математического моделирования и компьютерного проектирования, варьируя технологическими параметрами и содержанием УДАГ, возможно получение материала с более высокими эксплуатационными характеристиками, причем с наименьшими экономическими затратами.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ и в рамках совместного проекта «БРФФИ-РФФИ» № Т04Р-100.

ЛИТЕРАТУРА

1. Витязь П.А., Жилинский О.В., Лактюшина Т.В. Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования // Физическая механика. - Томск, 2004. -Т. 7.-С. 3-11.
2. Витязь П.А., Жорник В.И., Прокопович Н.Н. Влияние углеродных наномодификаторов на трибо-технические свойства баббитов // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия: Материалы 6-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 6-7 апреля 2004 г. / Ред. кол. А.Ф. Ильюшенко и др. - Мн.: Тонпик, 2004. - С. 118 - 119.