

УДК 004.891.2

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.Б. Гитман

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29
E-mail: mygitman@gmail.com

В.Ю. Столбов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29
E-mail: valeriy.stolbov@gmail.com

С.Е. Батин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29
E-mail: sebatin@ya.ru

Ключевые слова: функциональные материалы, прочностные свойства, поддержка принятия решения, модель комплексного оценивания, зеренно-фазовая структура, теория нечетких множеств.

Аннотация: Рассматриваются постановка и методика решения задачи получения металлического функционального материала с заданным набором прочностных свойств. Показывается, что важной составляющей данной задачи является построение модели комплексного оценивания требуемых свойств материала на макроуровне в зависимости от параметров микроструктуры. Предлагается двухуровневая модель оценивания, основанная на теории нечетких множеств. Приводится пример применения разработанной модели поддержки принятия решений при оценивании прочностных свойств арматурной стали по имеющемуся набору экспериментально полученных цифровых фотографий микрорешетчатой структуры материала при различных режимах термообработки.

1. Введение

В последние годы в технике резко возросла роль так называемых металлических «функциональных материалов» [1], отличающихся заданным комплексом эксплуатационных характеристик (прочность, электропроводность, термостойкость и т.п.), формируемым за счет применения новых технологий получения материала и/или специальных технологий его дальнейшей физико-механической обработки и, как следствие, сформированной микроструктуры. При этом возрастает необходимость разработки новых средств автоматизированного анализа сложных зеренно-фазовых структур на мезо- или микромасштабных уровнях [2]. Это, в свою очередь, требует разработки экспертных систем поддержки принятия решений в условиях неопределенности, связанной с неполнотой исходной информации и субъективностью мнений экспертов [3].

2. Постановка задачи

Рассматривается задача получения металлического функционального материала с заданным набором физико-механических (прочностных) свойств.

Требуется найти такие технологии изготовления материала и/или специальные технологии его дальнейшей физико-механической обработки, в результате применения которых формируется заданный комплекс его эксплуатационных характеристик (прочность, пластичность, термостойкость и т.п.), который обозначим множеством Z . Будем считать, что возможные технологические процессы характеризуются множеством параметров X , в число которых входят начальные характеристики исходной заготовки и технологические режимы ее обработки.

Считается, что существует некоторый оператор F , который устанавливает однозначное отношение между элементами множеств, т.е.:

$$(1) \quad z = F(x), \quad x \in X, \quad z \in Z,$$

где x и z – конкретные значения параметров процесса получения функционального материала и соответствующий им набор значений эксплуатационных свойств.

Оператор F в зависимости от вида множеств X и Z может представлять собой некоторый функционал, вектор-функцию или дифференциальный оператор.

При создании функционального материала необходимо найти такие значения x^* , которые бы обеспечили получение наперед заданных значений характеристик z^* . Другими словами, необходимо решить следующую оптимизационную задачу:

$$(2) \quad \begin{aligned} &\text{найти такие параметры } x^* \in X, \\ &\text{при которых } \|z^* - z\| \Rightarrow \min \\ &\text{и выполняются ограничения в виде равенства (1).} \end{aligned}$$

Следует отметить, что задача (2) в зависимости от вида минимизируемого функционала и вида оператора F , может быть сведена либо к задаче оптимального управления, либо к задаче параметрической оптимизации.

Основной проблемой решения задачи (2) является построение оператора F . При этом следует отметить, что обычно такие операторы строятся для некоторых частных случаев. В частности, известен вид оператора, связывающего предел текучести материала с параметрами его термомеханической обработки [4]. Однако в общем случае для нескольких характеристик, особенно, если они рассматриваются совместно, эта задача является достаточно сложной и, в настоящее время, не существует не только ее аналитического решения, но и общих подходов к нему. Обычно каждое физико-механическое свойство материала на макроуровне описывается отдельной моделью процесса термомеханической обработки, что усложняет решение общей задачи (2).

Предлагается новый подход к решению этой задачи, заключающийся в декомпозиции исходной задачи на несколько задач, связанных между собой.

3. Методика решения задачи

3.1. Декомпозиция задачи. Двухуровневая модель

Первоначально вводится гипотеза о том, что комплекс требуемых физико-механических характеристик материала однозначно определяется его микроструктурой. В случае рассмотрения металлов и сплавов под микроструктурой будем понимать

зеренно-фазовую структуру материала. Обозначим Y множество параметров, описывающих микроструктуру материала. Тогда соотношение (1) примет вид:

$$(3) \quad z = F(y(x)), \quad x \in X, y \in Y, z \in Z,$$

где y – конкретные значения параметров зеренно-фазовой структуры материала.

Задачу формирования заданных свойств функционального материала можно разбить на две подзадачи: установление отношений между режимами обработки и параметрами получаемой зеренно-фазовой структуры материала и комплексной оценки его эксплуатационных свойств в зависимости от параметров микроструктуры.

Обозначим F_1 оператор, устанавливающий соотношения между значениями параметров, характеризующих процессы получения функционального материала, и значениями параметров формируемой зеренно-фазовой структуры, а F_2 – оператор, связывающий параметры микроструктуры со значениями получаемого набора эксплуатационных свойств.

Теперь соотношение (3) можно преобразовать к виду:

$$(4) \quad z = F(y(x)) = F_2(F_1(x)) = F_2(y),$$

где оператор F представляет собой суперпозицию операторов F_1 и F_2 , т.е. $F = F_1 \circ F_2$.

В данном исследовании не рассматривается первая задача, т.е. оставим в стороне вид оператора F_1 . Нас интересует только идентификация параметров полученной зеренно-фазовой структуры. Считается, что известны технологии получения требуемого функционального материала и, как следствие их применения, его зеренно-фазовая структура, которая представлена цифровыми изображениями микрошлифов этого материала при различных технологических режимах его изготовления. При этом накоплено значительное количество экспериментальных данных, позволяющее установить отношения между параметрами микроструктуры материала и технологическими режимами его получения.

Особый интерес представляет собой вторая задача, в которой необходимо по известному набору параметров зеренно-фазовой (микро)структуры материала провести комплексную оценку его физико-механических (макро)свойств. При рассматриваемом подходе речь идет, по-существу, о решении задачи: $z = F_2(y)$.

3.2. Решение задачи анализа параметров микроструктуры функционального материала

Эта задача решается в два этапа. Первый этап соответствует идентификации всех возможных параметров y полученной зеренно-фазовой структуры, а второй этап – определению количества *значимых* компонентов вектора y , характеризующего эту микроструктуру с точки зрения заданного комплекса макрохарактеристик материала. Опшем логическую связь этих этапов.

Начнем со второго этапа. Следуя выдвинутой гипотезе об однозначном соответствии макросвойств материала его микроструктуре, необходимо определить, какое минимальное количество и каких параметров микроструктуры однозначно определяет требуемый набор макрохарактеристик функционального материала. Другими словами, требуется найти такой $\tilde{y} \in Y$, при котором:

$$(5) \quad \exists F_2, \text{ что } \|\tilde{z} - F_2(\tilde{y})\| < \varepsilon,$$

где \tilde{z} – имеющиеся экспериментальные данные по требуемому набору макрохарактеристик, ε – наперед заданная точность.

Для обеспечения полноты \tilde{y} необходимо определить максимально возможное ко-

личество параметров микроструктуры. По-существу, речь идет об идентификации этих параметров по имеющемуся набору микрошлифов исследуемого материала.

При решении задач количественного анализа микроструктуры (для металлов и сплавов – количественной металлографии) активно используются разнообразные параметры зеренной структуры, такие как: площадь зерен, периметр границ, длины малой и большой оси зерна (среднее значение и разброс), приближенность к кругу, удлиненность, компактность и т.д. В последнее время в количественной металлографии большое распространение получили интеллектуальные технологии, основанные на применении методов компьютерного распознавания образов и осуществляющие поддержку принятия решений при анализе экспертом сложных микроструктур. В данной работе для решения задач классификации фаз и сегментации зерен использовалась автоматизированная система [5], позволяющая по цифровой фотографии микрошлифа вычислять параметры зеренно-фазовой структуры с заданной точностью. При этом появляется возможность значительно увеличить количество этих параметров, возможно оказывающих существенное влияние на комплекс исследуемых характеристик материала.

Определив параметры микроструктуры y можно перейти к задаче комплексного оценивания макросвойств функционального материала, т.е. к определению оператора F_2 общей задачи (4).

3.3. Решение задачи комплексного оценивания макросвойств функционального материала по заданному набору параметров микроструктуры

Рассмотрим данную задачу на примере комплексного оценивания прочностных свойств металлического функционального материала. Решая задачу анализа, можно выделить основные параметры зеренно-фазовой структуры, к которым отнесем: параметры фазового состояния, например, объемные доли фаз, а также параметры зеренной структуры, например, средний размер зерна, коэффициент вариации размера зерна, степень анизотропии зерен, объемная доля зерен и т.п. Количество выбранных параметров зеренно-фазовой структуры обозначим переменной k .

Требуется, исходя из анализа этих параметров зеренно-фазовой структуры функционального материала, оценить его эксплуатационные характеристики, в частности, прочностные свойства. Другими словами, речь об определении оператора F_2 для решения задачи $z = F_2(y)$.

Будем считать, что количество параметров z , характеризующих требуемый комплекс эксплуатационных свойств функционального материала, равно r .

Для нахождения F_2 построим нечеткие отношения S^i между параметрами зеренно-фазовой структуры и параметрами, характеризующими эксплуатационные свойства функционального материала [6].

Будем считать, что количество имеющихся экспериментов (микрошлифов и соответствующих каждому из них замеров эксплуатационных характеристик) равно l . Тогда

$$(6) \quad S^i = A^i \times B^i, \quad i = 1, \dots, l,$$

где A^i – специальное нечеткое множество, содержащее параметры зеренно-фазовой структуры для i -го эксперимента; B^i – специальное нечеткое множество, содержащее эксплуатационные характеристики для i -го эксперимента; \times – знак декартова произведения нечетких множеств [6].

Теперь оператор F_2 можно определить следующим образом:

$$(7) \quad F_2 = S = \bigcup_{i=1}^l S^i.$$

Более подробно методика построения оператора F_2 приведена в работе [7].

4. Пример оценивания прочностных свойств стали, подверженной термообработке

В качестве демонстрационного примера рассматривается получение арматурной стали с заданными прочностными свойствами путем термообработки, режимы которой исследовались в НИИ Наносталей при Магнитогорском государственном техническом университете [8]. В работе [9] приводятся результаты компьютерного распознавания зеренно-фазовой структуры по цифровым фотографиям микрошлифов исследуемого материала и оценивания его прочности по значениям параметров микроструктуры. Проведенное сравнение экспериментальных данных с теоретическими результатами оценивания твердости стали позволяет утверждать о применимости предложенной методики поддержки принятия решений.

5. Заключение

Рассмотрена постановка задачи получения функционального материала с заданными эксплуатационными характеристиками. Предлагается декомпозиция задачи на две подзадачи: установление отношений между режимами обработки и параметрами получаемой зеренно-фазовой структуры металлического материала и комплексной оценки его эксплуатационных свойств в зависимости от параметров микроструктуры.

Для решения второй подзадачи используется экспертная система поддержки принятия решений, включающая автоматизированное распознавание зеренно-фазовой структуры создаваемого функционального материала, основанное на технологии компьютерного зрения, и модель комплексного оценивания, основанную на теории нечетких множеств.

Приводится пример применения предложенной методики при получении арматурной проволоки с заданными прочностными свойствами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта RFMEFI58617X0055.

Список литературы

1. Functional Materials: Preparation, Processing and Applications // Eds. S. Banerjee, A.K. Tyagi. Elsevier, 2011. 730 p.
2. Каменева А.Л. Роль структуры и фазового состава в формировании физико-механических и трибологических свойств пленок на основе TiN // Вопросы материаловедения. 2012. № 1(69). С. 58-67.
3. Вожаков А.В., Гитман М.Б., Столбов В.Ю. Модели принятия коллективных решений в производственных системах // Управление большими системами. Выпуск 58. М.: ИПУ РАН, 2015. С. 161-178.
4. Малахов В. В. Проблемы диагностики функциональных материалов (обзор) // Завод. лаб. Диагностика материалов. 2011. Т. 77, № 2. С. 310-318.
5. Шарыбин С. И., Столбов В. Ю., Гитман М. Б., Барышников М. П. Разработка интеллектуальной системы распознавания сложных микроструктур на шлифах металлов и сплавов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2014. №12. С. 50-56.
6. Zadeh L. Fuzzy sets // Inform. Control. 1965. Vol. 8. P. 338-353.

7. Введение в математическое моделирование: Учеб. пособие / В.Н. Ашихмин, М.Б. Гитман, О.Б. Наймарк, В.Ю. Столбов и др. / Под ред. П.В.Трусова. М.: Логос, 2015. 440 с.
8. Барышников М.П., Долгий Д.К., Куранов К.Ю., Зайцева М.В. Исследование процесса механотермической обработки арматуры из высокоуглеродистых сталей // Сталь.2012. № 2. С. 89-97.
9. Gitman I.M., Klyuev A.V., Gitman M.B., Stolbov V.Yu. Multi-scale approach for strength properties estimation in functional materials // ZAngewMathMech. 2018. Vol. 98, No. 6. P. 945-953.