

УДК 541.18.046.8

О.В. Даринцев, А.Б. Мигранов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра Российской академии наук, Россия
Россия, г. Уфа, проспект Октября, 71

Использование методов искусственного интеллекта в системах управления техпроцессами получения наноструктурных материалов

O.V. Darincev, A.B. Migranov

*Institute of Mechanics of Ufa Branch, RAS, Russia
Russia, Ufa, Prospect Otyabrya, 71*

Use of Methods of Artificial Intelligence in Control Systems of Technical Processes of Manufacturing Nanostructured Materials

О.В. Даринцев, А.Б. Мигранов

Федеральна державна бюджетна установа науки Інститут механіки ім. Р.Р. Мавлютова Уфимського наукового центру Російської академії наук, Росія
Росія, м. Уфа, Проспект Жовтня, 71

Використання методів штучного інтелекту в системах управління техпроцесами отримання наноструктурних матеріалів

В статье рассматриваются вопросы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами получения наноструктурных (НС) материалов. Технологический процесс характеризуется нестационарностью параметров объекта и системы управления, отличается сложностью формализованного описания и априорной неопределенностью условий функционирования. Для повышения эффективности формирования ультрамелкозернистой структуры предлагается включение в контур управления нейросетевых блоков-предикторов.

Ключевые слова: наноструктурные материалы, технологический процесс, нейронная сеть, интеллектуальные алгоритмы.

The article discusses the construction of intelligent process control systems for the production of nanostructured (NS) materials. The technological process is characterized by a nonstationary object parameters and control system is complex and formalized description of the operating conditions of a priori uncertainty. To improve the efficiency of formation of ultrafine structure is proposed inclusion in the control loop of neural units-predictors.

Keywords: nano-structured materials, the manufacturing process, the neural network, intelligent algorithms.

У статті розглядаються питання побудови інтелектуальних систем управління технологічними процесами отримання наноструктурних (НС) матеріалів. Технологічний процес характеризується нестационарністю параметрів об'єкта і системи управління, відрізняється складністю формалізованого опису та априорної невизначеністю умов функціонування. Для підвищення ефективності формування ультрадрібнозернистої структури пропонується включення в контур управління нейромережних блоків-предикторів.

Ключові слова: наноструктурні матеріали, технологічний процес, нейронна мережа, інтелектуальні алгоритми.

Введение

Одним из актуальных направлений современных исследований являются проблемы получения новых материалов и изготовление на их основе изделий различного практического назначения с качественно новыми характеристиками, уникальными физическими и механическими свойствами. Перспективным способом достижения таких характеристик является применение наноструктурных (НС) объемных материалов, которые за счет специфического структурного состояния имеют повышенный комплекс механических свойств, превышающий серийные в 1,5 – 3 раза, и являются более технологичными за счет проявления эффектов высокоскоростной сверхпластичности при низких температурах и высокой скорости деформации. Наиболее перспективным методом формирования НС состояний в металлах и сплавах является интенсивная пластическая деформация (ИПД), которая в сочетании с регламентированным отжигом позволяет получать НС материалы с ультрамелкозернистой структурой, с размером зерен около 100 нанометров и широким спектром механических свойств [1]. При этом высокие прочность и пластичность металлических НС материалов открывают новые способы их конструктивных применений.

По данным центра прикладных разработок Лос-Аламосской национальной лаборатории наиболее очевидными отраслями промышленности, где можно ожидать эффективного использования НС металлических материалов, полученных ИПД, являются аэрокосмическая, автомобильная, медицинская и электротехническая отрасли. Например, НС высокопрочные алюминиевые сплавы могут использоваться для изготовления авиационных изделий сложной формы, используя низкотемпературную высокоскоростную сверхпластическую формовку [2]. В работе [3] показано, что НС никель, полученный методами ИПД в виде тонких пластин, обладает более предпочтительными свойствами, по сравнению с классическими технологиями, для изготовления деталей микроэлектромеханических систем (МЭМС) различного назначения: упругих элементов, мембран, деталей микродвигателей, элементов конструкций микростанков и микророботов, технических устройств, требующих высоких механических свойств.

Однако для использования этих преимуществ в условиях современных производств и для перспективных разработок требуется решение ряда научно-технических проблем, которые связаны как с пониманием процессов, проходящих при получении НС материалов, так и совершенствованием технологических процессов получения НС материалов, которые характеризуются большим набором нестационарных параметров, отличаются сложным формализованным описанием и априорной неопределенностью условий функционирования.

Целью данной работы является повышение эффективности формирования ультрамелкозернистой структуры за счет включения в контур управления нейросетевых блоков-предикторов.

Выбор регулируемых параметров технологического процесса

Технология получения наноструктурных изделий включает следующие этапы.

1) Термообработка заготовок. Используется электропечь, в которой заготовка выдерживается при определенной температуре. После окончания процесса выдержки заготовка остывает естественным образом. Необходимо реализовать контроль температуры в нескольких точках, чтобы обеспечить равномерный разогрев заготовки и требуемый градиент температуры.

2) Нагрев заготовки перед прессованием. Нагрев осуществляется также при помощи электропечи, после чего заготовка должна сразу же попасть на пресс. Аналогичные требования по контролю температуры.

3) Равноканальное угловое прессование. В качестве основного технологического оборудования используется гидравлический пресс большой мощности, в котором происходит не только сжатие заготовки, но и вращение, причем для получения изделий различных геометрических размеров и физических свойств используется различная технологическая оснастка прессы.

4) Отжиг заготовки. Как и в случае термообработки, используется аналогичный подход, отличающийся технологическими параметрами – временем и температурой выдержки.

5) Механическая обработка. Используется токарно-фрезерный станок с различной технологической оснасткой.

В настоящее время практически все приведенные выше технологические операции производятся в ручном режиме, что может привести к нарушениям технологического процесса и, следовательно, к разбросу характеристик получаемых изделий. В этой связи актуальным является выявление и изучение основных факторов влияния на технологические процессы получения НС материалов методами ИПД, а также разработка новых подходов и инженерных методик, которые предоставили бы возможность строить эффективные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) получения НС. Одним из подходов дальнейшего улучшения характеристик наноструктурных материалов может быть контроль параметров и адаптивное изменение режимов технологического процесса, при котором происходит формирование нового типа структуры. Использование устройств для автоматического контроля и поддержания заданных параметров на всех этапах технологического процесса предоставит возможность более эффективно формировать ультрамелкозернистые (УМЗ) структуры, что в сочетании с повышением производительности процесса положительно скажется на структурной однородности полученных материалов.

Проведенные исследования позволили сделать выбор основных регулируемых параметров для системы управления технологическим процессом получения НС материалов, которые оказывают наибольшее влияние на формирование ультрамелкозернистых структур при ИПД. Основными схемами реализации ИПД являются равноканальное угловое прессование (РКУП) и кручение под высоким давлением (КД).

Управляемые переменные прессы интенсивной пластической деформации как объекта управления можно подразделить на две группы: переменные устройств прессы и технологические переменные прессы (рис. 1).



Рисунок 1 – Управляемые переменные при интенсивной пластической деформации

Если в процессе ИПДК не происходит истечения материала образца из полости, толщина диска остается постоянной, и истинная деформация кручением γ определяется как:

$$\gamma = (r / h)\varphi,$$

где r – расстояние от центра диска, φ – угол кручения в радианах, а h – толщина образца. Имеется также модифицированное соотношение для случаев, когда в процессе ИПДК происходит истечение материала из полости с образованием заусенца, сопровождающееся уменьшением величины h [1]. Для сравнения с другими методами ИПД истинная эквивалентная деформация (ε) может быть рассчитана, используя соотношение:

$$\varepsilon = (1 / a)\gamma,$$

где коэффициент a либо принимает значения из критерия пластического течения (где $a = \sqrt{3}$ по Мизесу), или из теории Тейлора для поликристаллов (где $a = 1.65$, для безтекстурных металлов с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой, понижается до более низких значений при непрерывной деформации).

При проведении ИПДК существенное измельчение структуры металлов и сплавов наблюдается при деформации уже в половинный или полный оборот. Для получения однородной наноструктуры со средним размером зерна около 100 нм и меньше необходима деформация в несколько оборотов.

Важнейшую роль в технологическом процессе играет как непосредственно деформирование, так и подготовка заготовки к деформированию, а именно определение её химического состава, геометрические размеры, твердость, нагрев заготовки, время транспортировки от электропечи к прессу. Заготовка, поступающая в пресс, должна иметь строго определенную температуру, от правильности выбора этой температуры, равномерности ее распределения по сечению заготовки зависит состояние микроструктуры. Наиболее сложным вопросом управления электропечами является определение сроков окончания процесса нагрева заготовки. Если определить температуру поверхности еще возможно, то задача определения нагрева центра заготовки является сложной и неразрешимой в промышленном производстве.

Таким образом, технологический процесс получения НС материалов характеризуется большим набором нестационарных параметров (показатели геометрии заготовки, температура прокатываемого НС металла, силы и моменты, действующие на заготовку и т.д.), отличается сложным формализованным описанием и априорной неопределенностью условий функционирования (распределение температуры по сечению заготовки). Для решения проблемы управления технологическими процессами в условиях неопределенности достаточно эффективно могут быть использованы интеллектуальные методы, основанные, в частности, на нейросетевых алгоритмах [4].

Использование нейросетевого предиктора в задаче управления технологическим процессом

Рассматриваемый подход основан на синтезе интеллектуальной системы управления с блоком предсказания (предиктором), построенным в нейросетевом базисе и использующем в процессе функционирования как текущую доступную информацию с сенсорных систем, так и результаты экспериментов на заготовках с периодической адаптацией ее под текущие технологические условия.

Общий принцип построения нейросетевой прогнозирующей модели управления может быть представлен в виде концептуальной схемы, изображенной на рис. 3.

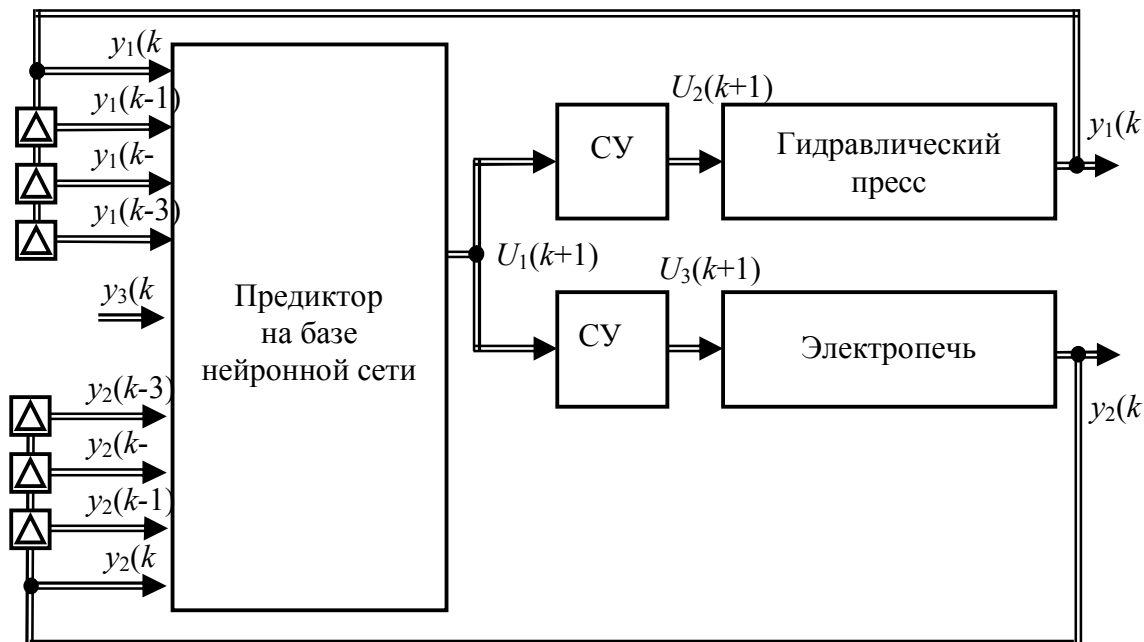


Рисунок 3 – Прогнозирующее управление техпроцессом получения НС материалов

Применение в вышеприведенной схеме нейронной сети основано на ее способности аппроксимировать нелинейные функции, при этом обработка входных параметров нейросетевого предиктора осуществляется как для отдельных данных, так и для набора параметров, описывающих предысторию технологического процесса.

Задача управления решается на основе следующих данных:

- $y_1(k)$, $y_1(k-1)$, $y_1(k-2)$, $y_1(k-3)$ – сигналы обратной связи текущего состояния гидравлического пресса, получаемые с сенсорных систем (координаты и скорости движения заготовок из НС металла, силы и моменты, действующие на заготовку), а также их значения за один, два и три такта назад ($y_1(k-1)$, $y_1(k-2)$, $y_1(k-3)$);
- $y_2(k)$, $y_2(k-1)$, $y_2(k-2)$, $y_2(k-3)$ – сигналы обратной связи, получаемые с электропечи, о температуре прокатываемого НС металла, а также их значения за один, два и три такта назад ($y_2(k-1)$, $y_2(k-2)$, $y_2(k-3)$);
- $y_3(k)$ – предыстория технологического процесса с адаптацией ее под текущие производственные условия (материал заготовки).

На выходе предиктора формируется двоичный сигнал $U_1(k+1)$, определяющий окончание процесса нагрева заготовки.

При $U_1(k+1) = 0$ на этом же такте генерируются сигналы управления $U_3(k+1)$ работой нагревательной печи. При $U_1(k+1) = 1$ включается в работу основное технологическое оборудование, в качестве которого используется гидравлический пресс большой мощности.

Нагрев центра заготовки выражается в виде ожидаемого вектора параметров управления технологическим процессом $U_1(k+1)$:

$$U_1(k+1) = NN(y_1(k), y_2(k), y_3(k), y_1(k-1), y_1(k-2), y_1(k-3), y_2(k-1), y_2(k-2), y_2(k-3)),$$

где NN – проводимое сетью преобразование вход – выход.

Предиктор может строиться в виде одношагового блока прогнозирования на базе прямонаправленной трехслойной нейронной сети с радиально-базисными активационными функциями нейронов скрытого слоя (РБФ-сети):

$$f_i(Y, c_i, \sigma_i) = \exp\left(-\frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{j=1}^V (Y_j - c_{i,j})^2\right), \quad i = \overline{1, H},$$

где $Y = (y_1(k), y_2(k), y_3(k), \dots, y_2(k-3))$ – вектор входных сигналов сети; $c_i = (c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,V})$ – вектор координат центра активационной функции i -о нейрона скрытого слоя; σ_i – ширина окна активационной функции; V – количество нейронов во входном слое сети; H – количество нейронов в скрытом слое.

Настраиваемыми параметрами сети являются параметры активационных функций нейронов скрытого слоя, а также синаптические связи между нейронами скрытого слоя и выходным нейроном. Как объект настройки, РБФ-сеть описывается совокупностью $(V+2)H$ параметров. При увеличении объема входной информации размерность поискового пространства возрастает, а, следовательно, увеличивается число входных нейронов. Для обеспечения устойчивой работы в таком пространстве решений возникает потребность в мощном поисковом методе, в качестве которого могут быть использованы генетические алгоритмы.

Для обучения нейросетевого предиктора может быть использована схема контролируемого обучения (рис. 4). В классическом варианте обучения РБФ-сети [5] предусматривается размещение центров активационных функций нейронов скрытого слоя в точках входного пространства, для которых известен желаемый выход сети. Под желаемым выходом сети в рассматриваемой задаче понимаются данные о законченности процесса нагрева заготовки в электропечи, а также тестовый набор переменных различных материалов с очевидным выходным вектором для большей репрезентативности обучающей выборки.

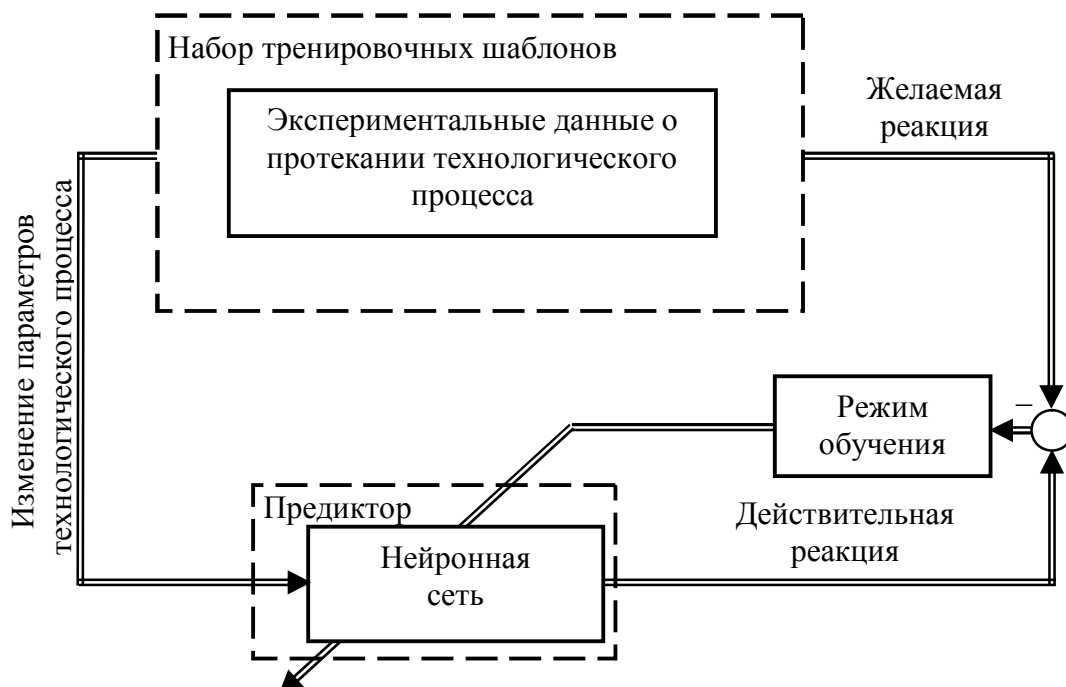


Рисунок 4 – Схема контролируемого обучения нейросетевого предиктора для техпроцесса получения наноструктурных материалов

Главной отличительной особенностью рассмотренной концепции интеллектуальной системы управления технологическим процессом является использование нейросетевым предиктором знаний о прошлом протекании технологического процесса, которые аккумулируются в архитектуре и настроечных параметрах нейронной сети, для предсказания ближайшего состояния технологического процесса – окончания процесса нагрева заготовки по известному текущему состоянию, а также предыстории внешних управляющих воздействий.

Вывод

Использование предиктора для определения сроков окончания процесса нагрева заготовки возможно даже при отсутствии прямой информации о температуре нагрева центра заготовки, достаточно только косвенных данных и результатов, описывающих предысторию технологического процесса. Также не требуется проведения дополнительного статистического анализа входных и выходных сигналов объектов управления и исследований по выявлению взаимосвязей его параметров, так как аппарат нейронных сетей не предъявляет каких-либо жестких требований к характеру входной информации, позволяя получить при этом высокий уровень обобщения.

Рассмотренный подход по использованию методов искусственного интеллекта является перспективным при получении наноструктурных материалов, поскольку технологический процесс характеризуется нестационарностью параметров объекта и системы управления, отличаясь при этом сложностью формализованного описания и априорной неопределенностью условий функционирования. Дальнейшие работы по данной тематике предполагают получение экспериментальных результатов с реального технологического оборудования, формирование набора тренировочных шаблонов (НТШ) и выбор оптимальной структуры нейронной сети по быстродействию и широкой репрезентативности НТШ.

Благодарность

Авторы выражают признательность за финансовую поддержку проводимых исследований РФФИ (грант 12-08-97082-р_поволжье_a).

Литература

1. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М. : Логос, 2000.
2. Красильников Н.А. Влияние интенсивной деформации на формирование ультрамелкозернистых структур в никеле / Н.А. Красильников, Г.И. Рааб, Д.В. Павленко // Сб. науч. тр. «Проблемы нанокристаллических материалов». – Екатеринбург : УрО РАН, 2002. – С. 564-572.
3. Excellent mechanical properties of nickel obtained high pressure technique /[Krasilnikov N.A., Pakiel Z., Lojkowski W., Valiev R.Z.] // Sol. St. Phen. – 2005. – V. 101-102. – P. 49-54.
4. Даринцев О.В. Использование методов искусственного интеллекта в системах управления микроманипуляционными устройствами / О.В. Даринцев, А.Б. Мигранов // Искусственный интеллект. – 2004. – № 3. – С. 684-688.
5. Haykin S. Neural Networks. A comprehensive foundation / Haykin S. – New-York, N.-Y. : Macmillan, 1994. – 696 p.

Literatura

1. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoj plasticheskoj deformaciej. – M.: Logos, 2000.

2. Krasil'nikov N.A., Raab G.I., Pavlenko D.V. Vlijanie intensivnoj deformacii na formirovanie ul'tramelkozernistykh struktur v nikele. V sb. nauch. tr. «Problemy nanokristallicheskih materialov». Ekaterinburg: UrO RAN, 2002. – s. 564-572.
3. Krasil'nikov N.A., Pakiela Z., Lojkowski W., Valiev R.Z. Excellent mechanical properties of nickel obtained high pressure technique. // Sol. St. Phen. – 2005. – V. 101-102. – P. 49-54.
4. Darincev O.V., Migranov A.B. Ispol'zovanie metodov iskusstvennogo intellekta v sistemah upravlenija mikromanipuljacionnymi ustrojstvami // Iskusstvennyj intellekt. – 2004. – № 3. – S. 684-688.
5. Haykin S. Neural Networks. A comprehensive foundation. – New York, NY : Macmillan, 1994. – 696 p.

RESUME

O.V. Darincev, A.B. Migranov

Use of Methods of Artificial Intelligence in Control Systems of Technical Processes of Manufacturing Nanostructured Materials

The article discusses the designing of intelligent process control systems for the manufacturing of nanostructured materials. The technological process is characterized by a set of time-dependent parameters (workpiece geometry parameters, the temperature of the strained metal, the forces and moments acting on the workpiece, etc.), is a sophisticated and formalized description of a priori uncertainty of operating conditions (temperature distribution over the cross section of the material). Authors are offered to use intellectual methods for a solution of the control problems which are linked with the uncertainty conditions of process. This approach is based on a synthesis of intelligent control system with predicting block (predictor), built in the neural network basis and is used in the operation of both the current information available to the sensor systems and the results of experiments on workpieces with its periodic adaptation to the current technological conditions. The main feature of the approach proposed by the authors is the use of neural network predictor of knowledge about the past, the flow of the process, which accumulate in the architecture and the tuning parameters of a neural network to predict the next state of the process – the end of the process of heating the workpiece based on the known current state and the history of external control actions.

Статья поступила в редакцию 04.04.2013.